

مقایسه تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترفتالات (PET) بر عملکرد بتن آسفالتی حاوی قیر اصلاح نشده و اصلاح شده با لاستیک ضایعاتی

حسن طاهرخانی*، دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

محمدرضا ارشدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۶/۱۵ - پذیرش: ۹۷/۱۱/۰۵

صفحه ۳۶۱-۳۴۷

چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر پلیمر ضایعاتی PET بر عملکرد بتن آسفالتی حاوی قیر لاستیکی و قیر اصلاح نشده، ذرات PET در مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد (بر اساس وزن قیر) به مخلوط‌های آسفالتی افزوده شد. پس از تعیین مقدار قیر بهینه مربوط به ترکیب‌های مختلف، مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET تحت آزمایش‌های مارشال، کشش غیرمستقیم و خزش دینامیکی قرار گرفتند. آزمایش خزش دینامیکی با استفاده از دستگاه UTM-10، در سطح تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال و دمای ۴۰ سانتی‌گراد، به منظور ارزیابی تغییر شکل ماندگار (شیار افتادگی) مخلوط‌ها به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که اضافه کردن PET به مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی باعث بهبود مقاومت مارشال و نسبت مارشال نسبت به نمونه شاهد شد، به طوری که بیشترین مقدار مقاومت و نسبت مارشال مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد PET شد. اما، در مخلوط آسفالتی حاوی قیر اصلاح نشده بیشترین استقامت و نسبت مارشال با افزودن ۴٪ PET حاصل می‌گردد. همچنین، نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم بر روی نمونه‌های حاوی درصد فضای بین ۶/۵ تا ۷/۵٪ نشان داد که بیشترین استقامت در هر دو مخلوط با افزودن ۲٪ PET به دست می‌آید، اما، در مخلوط‌های حاوی درصد فضای خالی در محدوده ۳ تا ۵٪ مقاومت کششی با افزایش PET کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی PET رفتار متفاوتی در برابر بارگذاری دینامیکی نسبت به استاتیکی دارند. افزودن PET به مخلوط‌های آسفالتی باعث کاهش مقاومت نسبت به تغییر شکل دائمی (شیار افتادگی) تحت بارگذاری دینامیکی شد، به طوری که با افزایش مقدار PET مقاومت نسبت به تغییر شکل دائمی کاهش یافت. اما، تاثیر PET بر مقاومت شیار شدگی مخلوط حاوی قیر لاستیکی کمتر از آن بر مخلوط حاوی قیر اصلاح نشده است.

واژه‌های کلیدی: بتن آسفالتی، پلیمر ضایعاتی PET، قیر لاستیکی، خزش دینامیکی

۱- مقدمه

آمریکا گزارش نمود که در سال ۲۰۱۳ بیش از ۲۹۰ میلیون حلقه لاستیک ضایعاتی در آمریکا تولید گردیده است (Presti, 2013). در اروپا نیز سالانه ۳۵۵ میلیون حلقه لاستیک تولید می‌شود که ۲۴٪ از تولید لاستیک در کل دنیا را تشکیل می‌دهد (ETREMA statistics, 2012). اغلب این لاستیکها در طبیعت رها شده و بخش کمی از آنها بازیافت شده و مجدداً

حجم زیاد تولید مواد پسماند جامد به یکی از مشکلات اصلی در مدیریت شهری تبدیل شده است. یکی از مهمترین بخش‌های ضایعات جامد جوامع امروزی انواع لاستیک‌ها و پلاستیک‌ها هستند. از میان لاستیک‌ها، لاستیک ضایعاتی خودروها و از میان پلاستیک‌ها پلیمر پلی اتیلن ترفتالات (PET) مهمترین بخش از این ضایعات را تشکیل می‌دهند. موسسه حفظ محیط زیست

سنگدانه می‌شود. در این حالت مقاومت مخلوط افزایش و درصد قیر کاهش می‌یابد. تفاوت اصلی بین استفاده از لاستیک و پلاستیک در این است که؛ پلاستیک‌های ضایعاتی می‌توانند پیوستگی بین سنگدانه‌ها را بهبود بخشند و باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی شوند، اما لاستیک‌ها نیاز به فرایند جذب و واکنش دارند تا خصوصیات قیر را بهبود بخشند و این فرایند برای پلاستیک‌ها نیاز نیست (Lastra-Gonzalez et al., 2016). الاستومرها مانند لاستیک و SBS، معمولا برای گسترش بیشترین و کمترین دماهای سرویس‌دهی قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که پلاستومرها مانند PET برای دماهای سرویس‌دهی بالا، مناسب هستند (Ameri et al., 2013; Modarres and Hamedi, 2014b). استفاده از یک اصلاح‌کننده غالبا به سختی می‌تواند تمام مشکلات روسازی را برطرف نماید. در نتیجه منطقی است که از دو یا چند افزودنی برای اصلاح مخلوط‌های آسفالتی استفاده شود، که باعث بهبود خصوصیات بیشتری از مخلوط می‌شود (Xu et al., 2016).

۲- پیشینه تحقیق

خرده لاستیک حدود ۵۰ سال در صنعت روسازی مورد استفاده قرار گرفته است (Tang et al., 2016). مطالعات زیادی بر روی خصوصیات مخلوط آسفالتی حاوی خرده لاستیک ضایعاتی انجام شده است، این تحقیقات نشان دادند که افزودن لاستیک- ضایعاتی به قیر باعث بهبود خصوصیات مکانیکی قیر می‌شود (Xu et al., 2016; Gonzalez et al., 2010). خرده لاستیک باعث افزایش ویسکوزیته قیر می‌شود و با افزایش مقدار خرده لاستیک، ویسکوزیته قیر نیز افزایش می‌یابد. افزایش ویسکوزیته قیر باعث افزایش ضخامت قیر اطراف سنگدانه‌ها شده و در نتیجه باعث افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی می‌شود (Kim and Lee, 2015). مطالعات قبلی نشان داده‌اند که استفاده از قیرهای حاوی خرده لاستیک ضایعاتی باعث بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی از جمله افزایش مقاومت به شیار افتادگی، کاهش ترک‌های حرارتی و انعکاسی، کاهش خستگی و همچنین باعث کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود

استفاده می‌شوند و بخشی از آنها نیز به عنوان سوخت استفاده می‌شوند. به دلیل دوام زیاد، لاستیک در طبیعت مشکلات زیادی را برای سلامت مردم و محیط زیست ایجاد می‌کند. خطر آتش سوزی، ایجاد محلی برای لانه حشرات و حیوانات موزی از جمله خطرات لاستیک‌های ضایعاتی برای انسانها می‌باشند. اغلب کشورها برای دفع لاستیک‌های ضایعاتی از آنها به عنوان پرکننده استفاده می‌کنند. اما، محدودیت جا و پتانسیل به کار گیری از لاستیک‌های ضایعاتی در سایر مصارف باعث شده است که خیلی از کشورها این عمل را محدود نمایند. با توجه به افزایش تولید لاستیک‌های ضایعاتی در دنیا و عدم وجود برنامه ای مشخص برای بازیافت آنها استفاده از آنها به شکل پودر لاستیک در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند باعث بهبود محیط زیست گردد (دانش و همکاران، ۱۳۹۶). پلیمر PET نیز به مقدار زیادی در مصارف مختلف استفاده شده و بعد از مصرف به صورت ضایعات دور ریخته می‌شود. یکی از مهمترین کاربرد این پلیمر در بطری‌های نوشیدنی‌ها و بسته بندی‌های مواد غذایی است. گزارش گردیده که در سال ۲۰۱۰ به مقدار ۲۶۷۵ تن از این پلیمر در ایالات متحده آمریکا دور ریز شده است که تنها ۲۹٪ از آن بازیافت گردیده است (Container Recycling Institute, 2015). باقیمانده این ضایعات سوزانده، دپو، دفن یا در طبیعت رها می‌گردند که مشکلات زیادی را برای محیط زیست ایجاد می‌کند. بنابراین، با توجه به مشکلات زیست محیطی لاستیک‌ها و پلاستیک‌های ضایعاتی استفاده مجدد از آنها به شکلی سازگار با محیط زیست ضروری به نظر می‌رسد. از طرف دیگر، صنعت روسازی حجم زیادی از منابع طبیعی را به صورت سنگدانه، قیر، سیمان و خاک مصرف می‌کند و سازگاری با محیط زیست در این صنعت در سالهای اخیر مورد توجه قرار گرفته است. افزایش عمر مصالح روسازی و استفاده از مواد ضایعاتی در انواع مختلف مصالح روسازی در همین راستا می‌باشد. لاستیک‌ها و پلاستیک‌های ضایعاتی (PET) از جمله پلیمرهای ضایعاتی هستند که در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده‌اند (Baghaee Moghaddam et al., 2012; Arabani et al., 2010; Xu et al., 2016). زمانی که مواد ضایعاتی پلیمری با سنگدانه‌های داغ مخلوط می‌شوند، یک لایه نازک اطراف سنگدانه تشکیل می‌دهند که باعث افزایش چسبندگی بین قیر و

مابقی درصدها کمتر می‌باشد. این درصد از PET باعث کاهش عمق شیار تا ۲۹ درصد نسبت به مخلوط کنترلی می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، مخلوط اصلاح شده با PET سخت‌تر و در نتیجه نسبت به شیار افتادگی مقاوم‌تر است. همچنین نتایج آزمایش ریزش قیر نشان داد که با افزایش مقدار PET، مقدار ریزش قیر کاهش یافت (Ahmadinia et al., 2012). بقائی مقدم و همکارانش، به بررسی خصوصیات دینامیکی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۰ درصد وزن مصالح سنگی را با حداکثر اندازه ذرات ۲/۳۶ میلی‌متر پرداختند و دریافتند که سختی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد به طوری که کمترین سختی مربوط به بیشترین مقدار PET، یعنی ۱/۰ درصد وزن قیر می‌باشد. همچنین خصوصیات خستگی مخلوط‌های حاوی PET بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به مخلوط‌های کنترلی بهبود یافت (Baghaee Moghaddam et al., 2012). در مطالعه‌ای دیگر، بقائی مقدم و همکارانش، آزمایش خزش دینامیکی را بر روی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۰ درصد وزن مصالح سنگی انجام دادند. آزمایش خزش دینامیکی را در دو تنش ۳۰۰ و ۴۰۰ کیلو پاسکال و سه دمای ۱۰، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند و دریافتند که خصوصیات تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. به طوری که کرنش دائمی مخلوط‌های حاوی PET در تمامی تنش‌ها و دماها از نمونه‌ی شاهد (بدون PET) کمتر شده است (Baghaee Moghaddam et al., 2014). مدرس و حامدی، به بررسی سختی و خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر پرداختند و همچنین آزمایشات ITS و مدول برجهنگی را برای در دو دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند. آنان نشان دادند که اضافه کردن PET باعث بهبود خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و مقادیر مدول برجهنگی برای مخلوط‌های حاوی PET در محدوده مجاز می‌باشد و همچنین اضافه کردن PET به میزان ۲ درصد وزن قیر، بیشترین مقاومت کششی و سختی را دارد (Modarres and Hamed, 2014a; Modarres and Hamed, 2014b). بر اساس

(Rodriguez-Alloza et al., 2014; Wang et al., 2013; Xiao et al., 2009; Gonzalez et al., 2010; Xu et al., 2016; Kim and Lee, 2015; Lee, 2010; Xiao, 2006; Huang et al., 2002; Shen et al., 2006; Cong et al., 2013; Moreno et al., 2012; Ching and Wing-gun, 2007). در چند سال اخیر، مطالعات مختلفی به قابلیت استفاده از پلیمر PET در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته و خواص آنها را مطالعه نموده‌اند. بقائی مقدم و همکارانش به بررسی خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ و ۱ درصد وزن مصالح سنگی پرداختند و آزمایشات مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و همچنین آزمایشات تغییر شکل دائمی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی را انجام دادند. آنان نشان دادند که با افزایش مقدار PET، مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که مخلوط‌های حاوی PET رفتار متفاوتی در مقابل بارگذاری استاتیکی و دینامیکی از خود نشان می‌دهند به طوری که تحت بارگذاری استاتیکی، با افزایش مقدار PET مقدار کرنش دائمی افزایش می‌یابد اما تحت بارگذاری دینامیکی با افزایش مقدار PET مقدار کرنش دائمی کاهش می‌یابد (Baghaee Moghaddam et al., 2014). احمدی‌نیا و همکارانش، خصوصیات حجمی و مکانیکی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA³) حاوی PET با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر را مورد آزمایش قرار دادند و مشاهده کردند که اضافه کردن PET، به میزان ۶ درصد وزن قیر بیشترین مقاومت و نسبت مارشال را نتیجه می‌دهد (Ahmadinia et al., 2011). در تحقیقی دیگر، احمدی‌نیا و همکارانش، آزمایشات رد چرخ^۲، آسیب رطوبتی و مدول برجهنگی را بر روی مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر انجام دادند و نتایج آزمایش مدول برجهنگی نشان داد که، اضافه کردن PET تا مقدار ۶ درصد باعث افزایش مدول برجهنگی تا ۱۶ درصد بیشتر نسبت به نمونه کنترلی می‌شود. در نتیجه اضافه کردن PET به مخلوط باعث سخت‌تر شدن آن می‌شود. نتایج آزمایش ردچرخ که نشان دهنده‌ی مقاومت در برابر شیار افتادگی است، نشان داد که عمق شیار برای مخلوط حاوی ۴ درصد PET از

عایق شیمی در تبریز مخلوط شد. جدول ۱، شرایط اختلاط قیر مصرفی در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. مصالح سنگی در این پژوهش از شرکت نگین گستران راه زندیگان در استان زنجان، تهیه شد. جنس مصالح سنگی استفاده شده، آهکی دولومیتی است. مشخصات مصالح سنگی و وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی به ترتیب در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است. دانه بندی شماره ۴ از آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، انتخاب گردید. شکل ۱ نشان‌دهنده محدوده دانه‌بندی آیین‌نامه و دانه‌بندی مخلوط مورد استفاده در این مطالعه است. پلیمر ضایعاتی PET به کار رفته در این پژوهش از بطری های ضایعاتی آب معدنی به دست آمد که بعد از جدا کردن لیبل ها و شستن با ماشین خرد کن مخصوص به صورت ذرات ریز تهیه گردید (شکل ۲). مشخصات پلاستیک ضایعاتی (PET) به کار رفته در آزمایش‌ها، در جدول ۴ نشان داده شده است. اندازه ذرات PET بر اساس مطالعات انجام‌گرفته در گذشته (Ahmadinia et al., 2011; Modarres and Hamed, 2014a; Ahmadinia et al., 2012; Baghaee Moghaddam et al., 2014; Modarres and Hamed, 2014b) مطابق با جدول ۵ در نظر گرفته شد.

تحقیقات گذشته، مطالعات بر روی تاثیر استفاده بطری‌های پلاستیکی (PET) بر مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی انجام نشده است. هدف این تحقیق، بررسی تاثیر استفاده از پلیمر PET در درصد‌های مختلف در دو نوع بتن آسفالتی و مقایسه آنها با همدیگر است. یکی از مخلوط‌ها با قیر اصلاح شده با پودر لاستیک و دیگری با قیر اصلاح نشده ساخته شده اند. انتظار می رود تفاوت‌هایی در روند تغییرات خصوصیات مخلوط با درصد PET وجود داشته باشد.

۳- مواد آزمایش و اختلاط

۳-۱- مشخصات مواد و مصالح مصرفی

در این تحقیق از دو نوع قیر، یک نوع از مصالح سنگی و پلیمر ضایعاتی PET برای ساخت نمونه‌ها استفاده گردیده است. یک نوع قیر PG58-16 تولید شده توسط شرکت نفت پاسارگاد تهران و یک نوع قیر خالص درجه نفوذی ۷۰-۶۰ اصلاح شده با خرده لاستیک مورد استفاده قرار گرفته است. خرده لاستیک ضایعاتی با قیر ۷۰-۶۰ به روش تر در آزمایشگاه شرکت عمران

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی در آزمایش‌ها

قیر پایه	مقدار خرده لاستیک ضایعاتی	اندازه ذرات خرده لاستیک ضایعاتی	دمای اختلاط (سانتی گراد)	سرعت اختلاط (rpm)	مدت زمان اختلاط (دقیقه)
۶۰-۷۰	۶ درصد وزن قیر	۰ تا ۲ میکرون	۱۸۰	۱۰۰۰	۱۲۰

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده در تحقیق

نتایج آزمایش		روش آزمایش	مشخصه
ریزدانه	درشت‌دانه		
۷۸	-	AASHTO-T176	ارزش ماسه‌ای
-	۲۷	AASHTO-T96	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس
-	۱۰۰	ASTM-D5821	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴
	در یک جبهه		
	۹۸		در دو جبهه
۲۰		-	درصد سیلیس مصالح سنگی (SiO ₂)
۳	-	AASHTO-M6	ضریب نرمی ماسه
-	۲۰	BS-812	درصد تورق
۰/۷	۱/۳	AASHTO-T104	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم
بیش از ۹۵ درصد		ASTM-D1664	درصد اندود به قیر مصالح سنگی
-	ندارد	ASTM-D4791	درصد دانه‌های پهن و دراز

جدول ۳. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

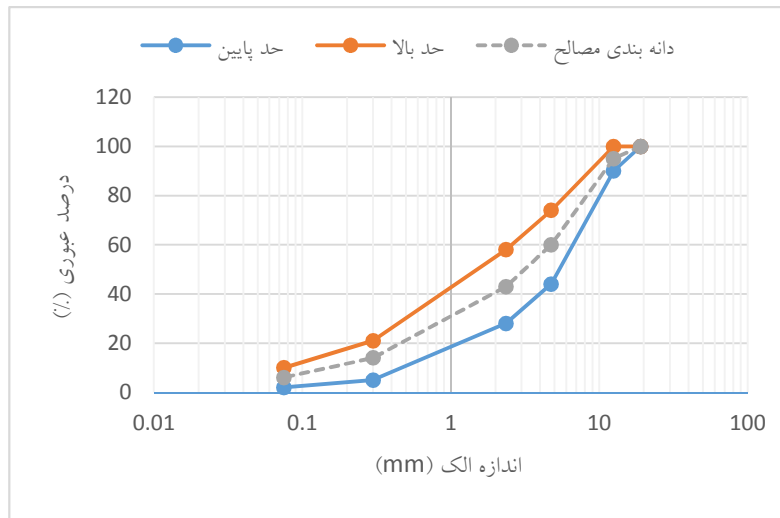
وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)		درصد جذب آب	
حقیقی	ظاهری		
۲/۶۵	۲/۷۱	۰/۸	مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸
۲/۶۵	۲/۷۳	۱/۲	مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک ۲۰۰
۲/۶۶۰		-	مصالح سنگی رد شده از الک ۲۰۰

جدول ۴. مشخصات PET به کاررفته در آزمایشات

مقدار	استاندارد	خصوصیات
۱/۳۵	ASTM-D792	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)
۰/۱	ASTM-D570	جذب آب (%)
۲۵۰	-	دمای ذوب (سانتی‌گراد)

جدول ۵. اندازه ذرات PET به کاررفته در آزمایشات

درصد عبوری (%)	اندازه الک (میلی متر)
۱۰۰	۰/۶ (الک #۳۰)
۵	۰/۳ (الک #۵۰)



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



شکل ۲. شکل ظاهری PET با دو اندازه مختلف

۲-۳- طرح اختلاط و آماده سازی نمونه ها

(D1559). برای این منظور، استقامت مارشال، روانی مارشال و درصد فضای خالی نمونه های حاوی PET محاسبه شد که نتایج در محدوده مجاز مشخصات فنی قرار گرفتند. نمونه های آسفالتی، براساس روش مارشال با ارتفاع تقریبی ۶۷ میلی متر و قطر ۱۰۱/۶ میلی متر در شرایط آزمایشگاهی، طبق استاندارد ASTM

مقدار قیر بهینه برای نمونه های فاقد PET، برای مخلوط های ساخته شده با هر دو نوع قیر، بر اساس طرح اختلاط مارشال، ۶ درصد به دست آمد. با توجه به مطالعات قبلی، مخلوط های حاوی PET دارای مقدار قیر بهینه برابر با نمونه شاهد هستند (Baghaee Moghaddam et al., 2014; ASTM)

ASTM D1559 انجام شد. علاوه بر این، نسبت مارشال (MQ) (نسبت استقامت به روانی مارشال (میلی‌متر) نیز برای نمونه‌های مختلف محاسبه شد. نسبت مارشال بالاتر نشان دهنده مقاومت بهتر در برابر تنش برشی و تغییر شکل‌های دائمی می‌باشد (Ameri et al., 2013).

۴-۲- آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS)

یکی از ویژگی‌های مهم بتن آسفالتی، مقاومت آن در برابر بارهای کششی و در نتیجه ترک‌خوردگی است. مقاومت کششی بتن آسفالتی از طریق آزمایش کشش غیرمستقیم تعیین می‌شود. روش استاندارد ASTM-D6931 برای ارزیابی مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش در دمای ۲۵ سانتی‌گراد و با جک مارشال که دارای سرعت دقیقه/ میلی‌متر ۵۰/۸ بود، صورت گرفت. معادله ۱ برای محاسبه مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، استفاده گردید.

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

که در آن، S_t : مقاومت کششی (kPa)، P : حداکثر بار اعمالی (N)، t : ارتفاع نمونه (میلی‌متر) و D : قطر نمونه (میلی‌متر) است. آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌هایی با درصد فضای خالی در محدوده ۶/۵ تا ۷/۵ و ۳ تا ۵٪ انجام گرفت تا اثر فضای خالی بر روند تغییرات مقاومت کششی بررسی شود.

۴-۳- آزمایش خزش دینامیکی (شیار افتادگی)

آزمایش خزش دینامیکی بر روی نمونه‌ها طبق استاندارد EN 12697-25 و با استفاده از دستگاه UTM⁴-10 انجام گرفت. شرایط انجام آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است. سطوح تنش پایین در آزمایش خزش دینامیکی نمی‌تواند رفتار واقعی مخلوط‌های آسفالتی، به خصوص مخلوط‌های اصلاح شده، را نشان دهد (Khodaii and Mehrara, 2009). به همین دلیل، در این مطالعه سطح تنش ۳۰۰ کیلو پاسکال برای ارزیابی نمونه‌ها در نظر گرفته شد.

D1559 ساخته شدند. نمونه‌ها با استفاده از چکش مارشال، با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با در نظر گرفتن شرایط ترافیک سنگین، متراکم شدند. به منظور مطالعه تأثیر اندازه ذرات و مقدار PET بر مشخصات مهندسی و مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی، PET در مقادیر ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد بر اساس وزن قیر به نمونه‌های آسفالتی ساخته شده با هر دو نوع قیر اضافه شد و با نمونه شاهد مقایسه شدند. روش‌های مختلفی برای ساخت مخلوط‌های حاوی PET وجود دارد. PET می‌تواند به قیر اضافه شده و سپس سنگ‌دانه‌ها و قیر حاوی PET. با هم مخلوط شوند که به روش تر موسوم است. اما، در روش خشک، PET ابتدا با سنگ‌دانه مخلوط شده سپس قیر به سنگ‌دانه‌های حاوی PET افزوده می‌شود (Abtahi et al., 2010). و روش دیگر، افزودن PET در حین اختلاط قیر با سنگ‌دانه‌ها است (Ahmadinia et al., 2011, Ahmadinia et al., 2012). با توجه به نقطه ذوب بالای PET (حدوداً ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) اگر به روش تر، ابتدا با قیر اختلاط شود، PET نمی‌تواند در مخلوط آسفالتی همگن شود (Modarres and Hamedi, 2014a). در نتیجه، در این تحقیق، نمونه‌های حاوی PET به روش سوم ساخته شدند. به طوری که، ابتدا قیر و سنگ‌دانه‌ها به مدت ۵ دقیقه با هم اختلاط شدند سپس PET اضافه گردید و به مدت ۲ دقیقه عمل اختلاط ادامه یافت تا PET و سنگ‌دانه‌ها به طور کامل به قیر آغشته شدند (Ahmadinia et al., 2011, Ahmadinia et al., 2012).

۴-۴- شرح آزمایش‌های انجام شده

برای بررسی تأثیر مقدار و اندازه PET بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش‌های استقامت و روانی مارشال، کشش غیرمستقیم و آزمایش خزش دینامیکی (جهت بررسی پتانسیل شیار افتادگی مخلوط‌ها)، استفاده شد. به آزمایش‌های انجام شده اشاره خواهد شد.

۴-۱- آزمایش استقامت و روانی مارشال

آزمایش استقامت و روانی مارشال بر روی نمونه شاهد و نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف PET، طبق استاندارد

جدول ۶. شرایط آزمایش خزش دینامیکی

تنش (کیلو پاسکال)	فرکانس (هرتز)	زمان بارگذاری (ثانیه)	زمان استراحت (ثانیه)	تعداد بار اعمالی	دمای آزمایش (سانتی گراد)	قطر نمونه (میلی متر)	ارتفاع نمونه (میلی متر)
۳۰۰	۰/۵	۰±۱/۰۵	۰±۱/۰۵	۱۰۱۰۰	۴۰	۱۰۱/۶	۱±۶۷

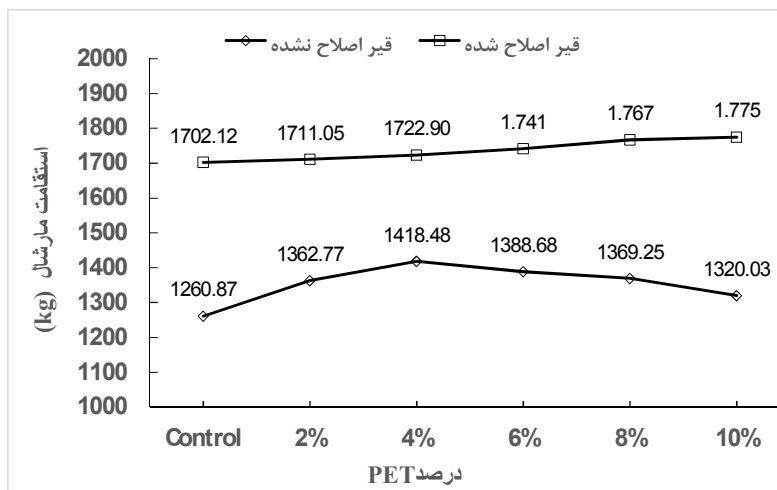
علاوه بر این، یک فرآیند پیش بارگذاری به مدت ۱۰ دقیقه، که شامل یک تنش استاتیکی به بزرگی ۱۰ درصد تنش دینامیکی بود، قبل از شروع آزمایش خزش دینامیکی اعمال شد. فرآیند پیش بارگذاری قبل از خزش دینامیکی تضمین می‌کند که سطوح نمونه و صفحات بارگذاری به طور کامل در تماس با یکدیگر قرار گرفته‌اند و قسمت‌های آزاد در سطوح نمونه، حرکات تغییر شکلی خود را انجام داده‌اند. همچنین، طبق مطالعات انجام شده در گذشته، برای اطمینان از اینکه دمای نمونه به دمای آزمایش رسیده باشد، تمامی نمونه‌ها به مدت حداقل دو ساعت قبل از شروع آزمایش، در داخل محفظه هم دمای آزمایش (محفظه دستگاه UTM) قرار گرفتند (Khodaii and Mehrara, 2009; Katman et al., 2015).

۵- نتایج و بحث

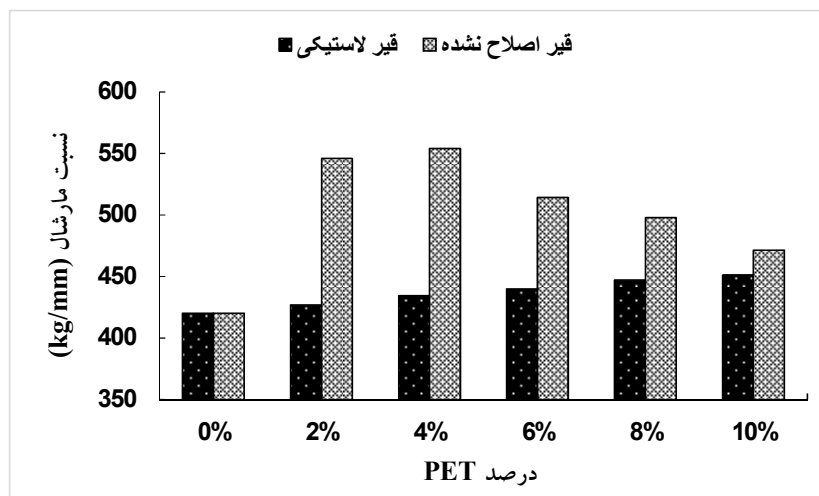
۱-۵- آزمایش استقامت و روانی مارشال

شکل ۳ مقادیر استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر اصلاح شده با لاستیک و قیر معمولی که حاوی درصد‌های مختلفی از پلیمر ضایعاتی PET هستند را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، در مخلوط ساخته شده با قیر لاستیکی استقامت مارشال مخلوط‌ها با افزایش مقدار PET در مخلوط افزایش می‌یابد و از مقدار ۱۷۰۲/۱۲ کیلوگرم برای مخلوط فاقد PET به مقدار ۱۷۷۵ کیلوگرم برای مخلوط حاوی ۱۰٪ از PET می‌رسد، که نشان‌دهنده حدود ۴٪ رشد در مقاومت می‌باشد. این روند اما در مخلوط‌های ساخته شده با قیر معمولی متفاوت است. در مخلوط‌های ساخته شده با قیر معمولی مقدار استقامت مارشال تا ۴٪ از محتوی PET افزایش یافته و بعد از آن افزودن PET باعث کاهش در استقامت می‌گردد. در این مخلوط‌ها،

استقامت مارشال مخلوط حاوی ۴٪ PET به مقدار حدود ۱۲/۵ درصد از استقامت مخلوط فاقد PET بیشتر است. با اینحال، همه مخلوط‌های حاوی PET دارای استقامتی بیشتر از مخلوط کنترل فاقد PET می‌باشند. دلیل افزایش در استقامت می‌تواند افزایش سختی مخلوط در اثر افزایش در PET باشد. اما، در مخلوط‌های بدون لاستیک، افزایش سختی شونده‌گی بیشتر بوده و در مقادیر زیاد PET این سختی‌شدگی باعث ترد تر شدن مخلوط و کاهش استقامت گردیده است. اما، در مخلوط‌های ساخته شده با قیر لاستیکی انعطاف بیشتر قیر باعث شده تا اثر ترد شونده‌گی دیده نشود. به نظر می‌رسد در مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی در درصد‌های بالاتر PET این حالت دیده شده و کاهش در استقامت ملاحظه گردد. شکل ۴ نشان‌دهنده نتایج بدست آمده برای نسبت مارشال (MQ) مخلوط‌ها می‌باشد که از تقسیم استقامت مارشال به روانی آنها به دست آمده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، نسبت مارشال مخلوط‌های حاوی قیر لاستیکی با افزایش درصد PET افزایش می‌یابد که به دلیل اثر سخت شونده‌گی آنها می‌باشد. اما، در مخلوط‌های ساخته شده با قیر اصلاح نشده نسبت مارشال تا ۴٪ افزودن PET افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابد. نتایج همچنین بیانگر این است که اثر افزودنی PET در مخلوط‌های ساخته شده با قیر اصلاح نشده بیشتر است. اضافه کردن PET به مخلوط‌های آسفالتی باعث افزایش پیوستگی بین سنگدانه‌ها می‌شود، که این امر موجب افزایش سختی و در نهایت افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی می‌شود. همانگونه که قبلاً ذکر شد، افزایش نسبت مارشال به افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل ارتباط می‌یابد.



شکل ۳. استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف PET برای هر دو اندازه



شکل ۴. نسبت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف PET برای هر دو اندازه

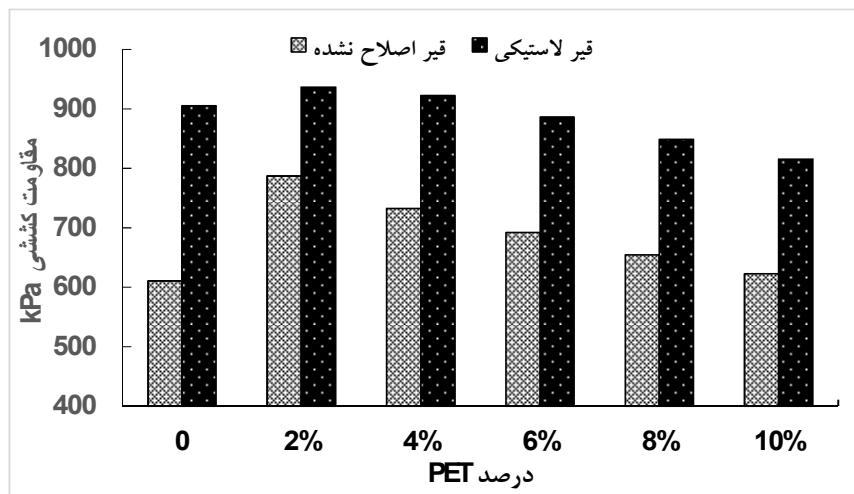
۵-۲- نتایج و تحلیل آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS)

شکل ۵ نتایج مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی ساخته شده با قیر لاستیکی و قیر اصلاح نشده که حاوی درصدهای مختلفی از PET می‌باشند را نشان می‌دهد. این نتایج مربوط به مخلوط‌هایی است که درصد فضای خالی آنها بین ۶/۵ تا ۷/۷ درصد است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، مقاومت کششی مخلوط‌ها با افزودن ۲٪ از PET به حداکثر مقدار رسیده و با افزایش بیشتر PET مقاومت کششی کاهش می‌یابد. تحقیقات قبلی نیز بر روی بتن آسفالتی نشان داده که با افزودن ۲٪ از PET

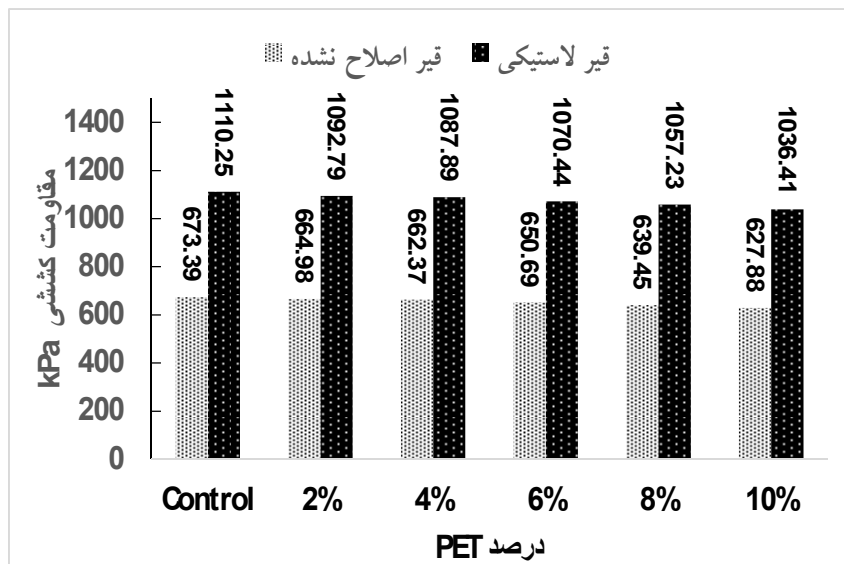
بیشترین مقاومت کششی حاصل می‌شود (Modarres and Hamed, 2014a). با این وجود، در مخلوط‌های ساخته شده با هر دو نوع قیر مقاومت کششی مخلوط‌های حاوی هر اندازه از PET بیشتر از آن برای مخلوط‌های بدون PET می‌باشد. در مقادیر بالاتر PET، به قیر بیشتری برای پوشش ذرات PET نیاز است و با توجه به ثابت بودن مقدار قیر بهینه برای تمامی مخلوط‌ها، افزایش مقدار PET باعث کاهش ضخامت قیر اطراف سنگدانه‌ها و در نهایت باعث کاهش مقاومت کششی مخلوط می‌شود. نتایج

انجام گرفت، که نتایج آنها در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد. همانگونه که دیده می‌شود، در این مخلوطها با افزایش درصد PET در مخلوط مقاومت کششی کاهش می‌یابد. برای هر دو نوع مخلوط افزایش ۱۰٪ از PET در مخلوط مقاومت را حدود ۶٪ نسبت به مقاومت مخلوط بدون PET کاهش می‌دهد.

همچنین نشان می‌دهند که افزودن PET به مخلوطهای ساخته شده با قیر اصلاح نشده تاثیر بیشتری بر مقاومت کششی نسبت به مخلوطهای ساخته شده با قیر لاستیکی دارد، که به دلیل اثر بیشتر در سخت شوندگی مخلوطهای حاوی قیر اصلاح نشده است. در این تحقیق، همچنین آزمایش مقاومت کششی بر روی مخلوطهایی که درصد فضای خالی در محدوده ۳ تا ۵٪ داشتند



شکل ۵. مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET برای هر دو اندازه (۷/۵-۶/۵٪)

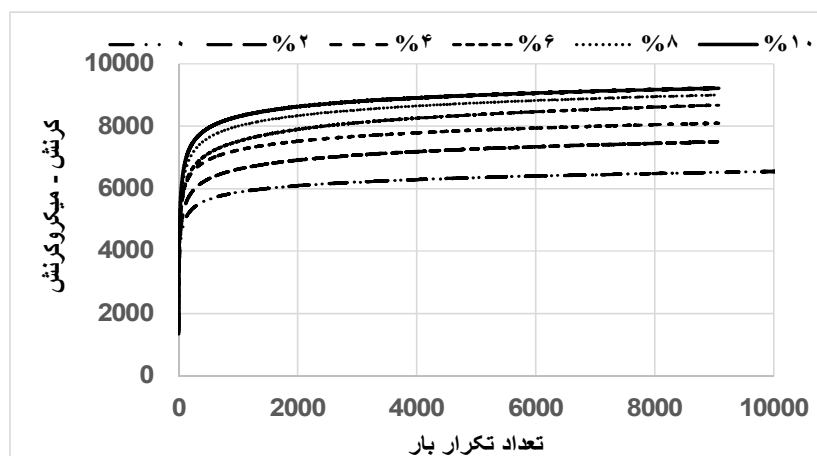


شکل ۶. مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET برای هر دو اندازه (۵-۳٪)

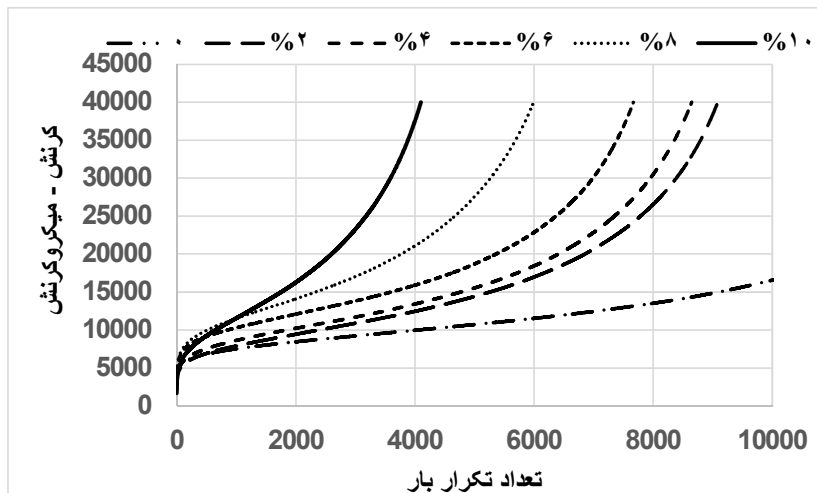
۳-۵- آزمایش خزش دینامیکی (شیار افتادگی)

خزش دینامیکی مقدار کرنش تجمعی و سختی خزشی مخلوطها محاسبه شده و در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه گردیده اند. کرنش تجمعی مخلوطهای ساخته شده با قیر اصلاح نشده در ۲۰۰۰ سیکل بارگذاری و در مخلوطهای ساخته شده با قیر اصلاح شده بعد از ۱۰۰۰۰ سیکل بارگذاری است. سختی خزشی نیز از تقسیم میزان تنش عمودی به مقدار کرنش تجمعی محاسبه گردیده است. همانگونه که ملاحظه می گردد مقدار کرنش تجمعی مخلوطها با افزایش PET افزایش و سختی خزشی با افزایش PET کاهش می‌یابد. مقدار افزایش در کرنش تجمعی و کاهش در سختی خزشی در اثر افزودن PET در مخلوطهای ساخته شده با قیر لاستیکی کمتر از آن در مخلوطهای ساخته شده با قیر اصلاح نشده است. همانگونه که در شکل ۳ و ۴ ملاحظه گردید، افزودن PET می تواند استقامت و نسبت مارشال را افزایش دهد که در تناقض با نتایج خزش دینامیکی است. بنابراین، می‌توان استنباط نمود که مخلوطهای حاوی PET می توانند تحت بارگذاری استاتیکی مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل داشته باشند و برای کاربردهایی از روسازی که بارگذاری استاتیکی است مناسبتر هستند. ولی، تحت بارگذاری دینامیکی مقاومت به تغییر شکل کاهش می‌یابد و برای جبران این ضعف باید ملاحظاتی را اندیشید.

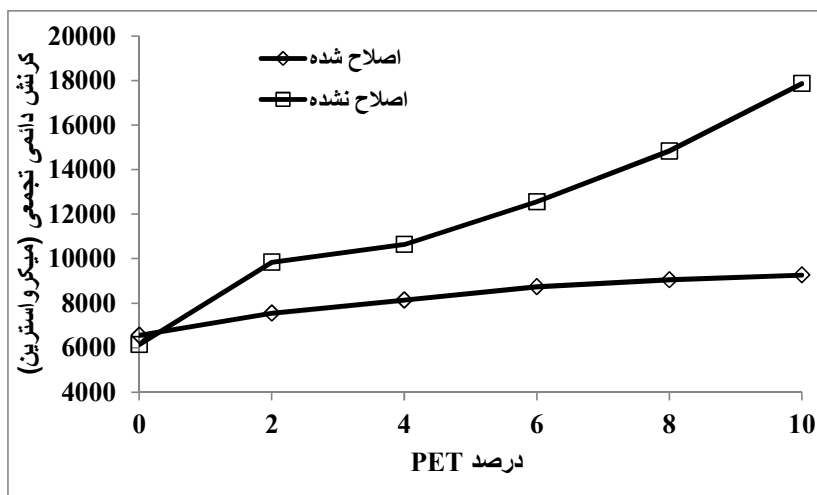
شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات کرنش تجمعی عمودی با سیکل‌های بارگذاری و درصد PET را، به ترتیب، برای مخلوطهای ساخته شده با قیر اصلاح نشده و قیر لاستیکی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می گردد، افزایش PET باعث کاهش مقاومت در برابر تغییر شکل مخلوطها می‌شود. نتایج به دست آمده از آزمایش خزش دینامیکی با نتایج حاصل از تحقیق انجام گرفته توسط ارنست (Earnest, 2015) که PET را به صورت خشک به بتن آسفالتی گرم اضافه کرد مشابه است، اما با نتایج حاصل از تحقیقات دیگر (Baghaee Moghaddam et al., 2014a; Baghaee Moghaddam et al. 2014b) که PET را به صورت خشک به مخلوطهای آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) اضافه کرده‌اند متناقض است. این تناقض به تفاوت در دانه بندی آسفالت ماستیک درشت دانه و بتن آسفالتی ارتباط می یابد. در آسفالت ماستیک درشت دانه به علت حجم بیشتر درشت دانه ها، ذرات PET بهتر می‌توانند به پیوستگی سنگدانه‌ها کمک کند. مقایسه شکل ۷ و ۸ نشان می دهد که تاثیر PET در مخلوطهای ساخته شده با قیر اصلاح نشده بیشتر است و کاهش بیشتری را در مقاومت ایجاد کرده است. این موضوع می‌تواند به دلیل سازگاری بیشتر پلیمر PET با خرده لاستیک باشد. به منظور درک بهتر این اثرات، با استفاده از نتایج آزمایش



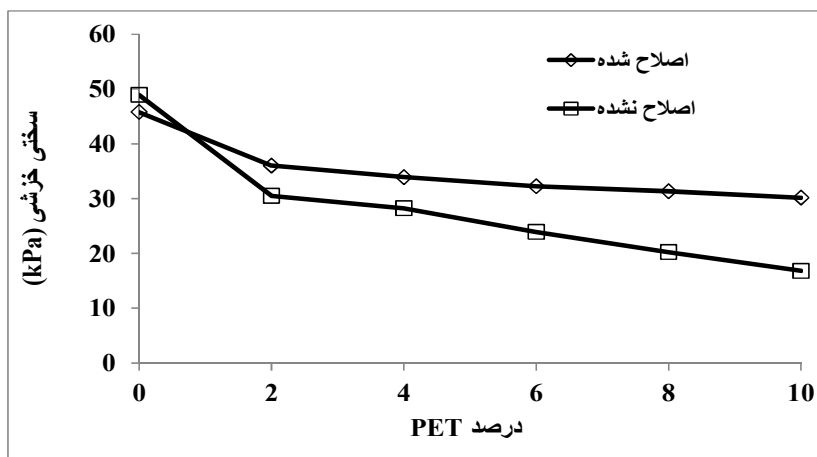
شکل ۷. نمودار خزش مخلوطهای حاوی قیر اصلاح شده و درصدهای مختلف PET



شکل ۸. نمودار خزش مخلوط‌های حاوی قیر اصلاح نشده



شکل ۹. نمودار تغییرات کرنش نهایی مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه مختلف



شکل ۱۰. نمودار تغییرات سختی خزشی مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه مختلف

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر افزودن PET بر برخی از خصوصیات بتن آسفالتی ساخته شده با دو نوع قیر، شامل قیر اصلاح نشده و اصلاح شده با لاستیک ضایعاتی مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج کلی زیر از این تحقیق حاصل گردید.

اضافه کردن PET به مخلوطهای آسفالتی حاوی قیر لاستیکی موجب افزایش استقامت و نسبت مارشال شد، به طوری که بیشترین مقاومت و نسبت مارشال مربوط به نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد PET می‌باشد. اما، در مخلوطهای ساخته شده با قیر اصلاح نشده بیشترین استقامت و نسبت مارشال با افزودن ۴٪ از PET حاصل می‌شود و بعد از آن روند کاهشی در این مقادیر ملاحظه می‌گردد.

تاثیر افزودن PET به مقاومت کششی مخلوطهای آسفالتی به نوع قیر و میزان فضای خالی و درصد PET بستگی دارد. در مخلوطهای حاوی فضای خالی بین ۶/۵ تا ۷/۵ بیشترین مقاومت کششی با افزودن ۲٪ از PET حاصل می‌گردد که افزایش مقاومت کششی در مخلوط ساخته شده با قیر اصلاح نشده بیشتر است. در مخلوطهای حاوی فضای خالی بین ۵-۳٪، مقاومت کششی با افزایش درصد PET کاهش می‌یابد و این کاهش در برای هر دو نوع قیر تقریباً یکسان است.

افزودن PET به مخلوطهای آسفالتی ساخته شده با هر دو نوع قیر باعث کاهش مقاومت به تغییر شکل می‌شود که این کاهش برای مخلوطهای ساخته شده با قیر اصلاح نشده بیشتر است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن PET به مخلوطهای آسفالتی باعث افزایش مقاومت آنها به تغییر شکل تحت بارگذاری استاتیکی می‌شود، اما مقاومت تحت بارگذاری دینامیکی را کاهش می‌دهد. بنابراین، نسبت مارشال شاخص مناسبی برای مقاومت به تغییر شکل در برابر بارگذاری دینامیکی نمی‌تواند باشد.

۷- پی‌نوشت‌ها

- 1- Polyethylene Terephthalate
- 2- Wheel Track
- 3- Stone Matrix Asphalt
- 4- Universal Testing Machine

۸- مراجع

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

-Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M., & Shafiqh, P. (2011), "Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt". *Materials & Design*, Vol. 32, No. 10, pp. 4844-4849.

-Arabani, M., Mirabdolazimi, S. M., & Sasani, A. R. (2010), "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.

-Ahmed, I. (1993), "Use of waste materials in highway construction", USA: Noyes Data Corporation.

-Ameri, M., Mansourian, A., & Sheikhmotevali, A. H. (2013), "Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumen's and mixtures based upon performance related parameters". *Construction and Building Materials*, Vol. 40, pp. 438-447.

-Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M. and Ahmadinia, E., (2012), "Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt". *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 984-989.

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

-Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M., & Karim, M. R. (2014), "Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test". *Materials & Design*, Vol. 53, pp. 317-324.

- Huang, B., Mohammad, L., Graves, P., & Abadie, C. (2002), "Louisiana experience with crumb rubber-modified hot-mix asphalt pavement". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1, No. 1789, pp. 1-13.
- Kim, H. H., & Lee, S. J. (2015), "Effect of crumb rubber on viscosity of rubberized asphalt binders containing wax additives". *Construction and Building Materials*, Vol. 95, pp. 65-73.
- Katman, H.Y., Ibrahim, M.R., Karim, M.R., Salim Mashaan, N. and Koting, S. (2015), "Evaluation of Permanent Deformation of Unmodified and Rubber-Reinforced SMA Asphalt Mixtures Using Dynamic Creep Test". *Advances in Materials Science and Engineering*. vol. 2015, Article ID 247149.
- Khodaii, A. and Mehrara, A. (2009), "Evaluation of permanent deformation of unmodified and SBS modified asphalt mixtures using dynamic creep test". *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 7, pp. 2586-2592.
- Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, Á. & Indacoechea-Vega, I. (2016), "Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste". *Construction and Building Materials*, Vol. 112, pp. 1133-1140.
- Lee, S. J. (2007), "Characterization of recycled aged CRM binders" (Doctoral dissertation, University of Clemson).
- Moreno, F., Rubio, M. C., & Martinez-Echevarria, M. J. (2012), "The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage". *Construction and Building Materials*, Vol. 26, No. 1, pp. 466-474.
- Moreno, F., Sol, M., Martín, J., Pérez, M., & Rubio, M. C. (2013), "The effect of crumb rubber modifier on the resistance of asphalt
- Baghaee Moghaddam, T., Karim, M.R. and Abdelaziz, M., (2011), "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes". *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, No. 4, pp. 670-682.
- Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M. and Karim, M.R., (2014), "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.
- Baghaee Moghaddam, T., Karim, M. R., & Syammaun, T. (2012), "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles". *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 236-242.
- Chen, H., Xu, Q., Chen, S. and Zhang, Z. (2009), "Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures". *Materials & Design*, Vol.30, No. 7, pp. 2595-2603.
- Cong, P., Xun, P., Xing, M., & Chen, S. (2013), "Investigation of asphalt binder containing various crumb rubbers and asphalts". *Construction and Building Materials*, Vol. 40, pp. 632-641.
- Container Recycling Institute (www.containerrecycling.org/index.php/pet-bottle-sales-and-wasting-in-the-us).
- Earnest, M. D. (2015), *Performance Characteristics of Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt*. (Master's thesis), Georgia Southern University, United States.
- González, V., Martínez-Boza, F. J., Gallegos, C., Pérez-Lepe, A., & Páez, A. (2012), "A study into the processing of bitumen modified with tire crumb rubber and polymeric additives". *Fuel processing technology*, Vol. 95, pp. 137-143.
- González, V., Martínez-Boza, F. J., Navarro, F. J., Gallegos, C., Pérez-Lepe, A., & Páez, A. (2010) "Thermomechanical properties of bitumen modified with crumb tire rubber and polymeric additives". *Fuel Processing Technology*, Vol. 91, No. 9, pp. 1033-1039.

- Tang, N., Huang, W., & Xiao, F. (2016), "Chemical and rheological investigation of high-cured crumb rubber-modified asphalt". *Construction and Building Materials*, Vol. 123, pp. 847-854.
- Wong, C. C., & Wong, W. G. (2007), "Effect of crumb rubber modifiers on high temperature susceptibility of wearing course mixtures". *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 8, pp. 1741-1745.
- Wang, H., Dang, Z., Li, L., & You, Z. (2013), "Analysis on fatigue crack growth laws for crumb rubber modified (CRM) asphalt mixture". *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 1342-1349.
- Xiao, F., Amir Khanian, S. N., Shen, J., & Putman, B. (2009), "Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures". *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 2, pp. 1028-1034.
- Xiao, F. (2006), "Development of fatigue predictive models of rubberized asphalt concrete (RAC) containing reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures" (Doctoral dissertation, University of Clemson).
- Xu, O., Xiao, F., Han, S., Amir Khanian, S. N., & Wang, Z. (2016), "High temperature rheological properties of crumb rubber modified asphalt binders with various modifiers". *Construction and Building Materials*, Vol. 112, pp. 49-58.
- mixes to plastic deformation". *Materials & Design*, Vol. 47, pp. 274-280.
- Modarres, A., & Hamed, H. (2014a), "Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes". *Materials & Design*, Vol. 61, pp. 8-15.
- Modarres, A., & Hamed, H. (2014b), "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.
- Presti, D. L. (2013), "Recycled tyre rubber modified bitumen's for road asphalt mixtures: A literature review" *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 863-881.
- Rodríguez-Alloza, A. M., Gallego, J., Pérez, I., Bonati, A., & Giuliani, F. (2014), "High and low temperature properties of crumb rubber modified binders containing warm mix asphalt additives". *Construction and Building Materials*, Vol. 53, pp. 460-466.
- Shen, J. N., Xie, Z. X., Xiao, F.P. and Fan, W.Z. (2012) "September. Evaluations of Nano-Sized Hydrated Lime on the Moisture Susceptibility of Hot Mix Asphalt Mixtures". In *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 174, pp. 82-90.
- Shen, J., Amir Khanian, S., Lee, S. J., & Putman, B. (2006) "Recycling of laboratory-prepared reclaimed asphalt pavement mixtures containing crumb rubber-modified binders in hot-mix asphalt". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1, No. 1962, pp. 71-78.