

بررسی خصوصیات بتن آسفالتی گرم حاوی پلیمر ضایعاتی PET¹ و قیر لاستیکی

حسن طاهرخانی، استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
محمدرضا ارشدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mreza.arshadi@znu.ac.ir

دریافت: 95/02/05 - پذیرش: 95/06/18

Formatted: Font: 11 pt, Font color: Auto, Complex Script Font: 11 pt

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Times New Roman), Underline, Font color: Auto, Complex Script Font: +Headings CS (Times New Roman)

Formatted: Font: (Default) +Body (Calibri), No underline, Font color: Auto, Complex Script Font: B Lotus

چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر پلیمر ضایعاتی PET بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی، PET با دو اندازه مختلف و در مقادیر 2، 4، 6 و 8 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 استقامت و روانی مارشال و کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. همچنین، آزمایش خزش دینامیکی با استفاده از دستگاه UTM-10، در سطح تنش 300kPa و دمای 40°C به منظور ارزیابی تغییر شکل ماندگار (شیار افتادگی) مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف PET با دو اندازه 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 10 درصد PET شد. همچنین نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نشان داد که اضافه کردن PET به مقدار 2 درصد باعث افزایش مقاومت کششی غیرمستقیم شد و با اضافه کردن مقادیر بیشتر PET مقاومت کششی غیرمستقیم کاهش یافت. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان داد که مخلوط‌های آسفالتی گرم حاوی PET رفتار متفاوتی در برابر بارگذاری دینامیکی 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. نتایج آزمایشات استقامت مارشال، نسبت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و خزش دینامیکی نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET با اندازه ذرات کوچک‌تر نسبت به مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET با اندازه بزرگ‌تر، مقاومت بیشتری دارند.

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

1- مقدمه

ایجاد تسهیلات حمل و نقل ایمن تر و کارآمدتر برای جابجایی و تحویل محصولات منجر شده است (Ahmadinia et al., 2012). برای این منظور از وسایل نقلیه بزرگ‌تر که مقدار بار

در دو دهه اخیر، تقریباً تمام کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته با مسئله رقابت اقتصادی مواجه شده‌اند. رقابت اقتصادی موجب افزایش بی‌سابقه‌ای در تولید کالا و همچنین

محوری بیشتر و فشار باد لاستیک بالاتر دارند، استفاده می‌شود. بنابراین، تعداد این نوع وسایل نقلیه سنگین به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است (Ahmadinia et al., 2012; Baghaee Moghaddam et al., 2014; Tayfur et al., 2007; Baghaee Moghaddam et al., 2011). افزایش تعداد بارهای محوری بر راه‌های موجود، موجب خرابی روسازی‌های آسفالتی زودتر از زمان انتظار می‌شود (Baghaee Moghaddam et al., 2014; Tayfur et al., 2007; Tortum et al., 2005; Baghaee Moghaddam et al., 2014). از طرف دیگر، افزایش تقاضا برای روسازی‌های با کیفیت بالاتر و عملکرد ضعیف بعضی مخلوط‌های آسفالتی موجب شد تا محققان به دنبال ارائه روش‌های طراحی جدید برای بهبود عملکرد و افزایش عمر سرویس‌دهی مخلوط‌های آسفالتی باشند (Ahmadinia et al., 2012).

شکل‌های مختلفی از خرابی در روسازی آسفالتی وجود دارد، که هر کدام از این نوع خرابی‌ها به علت خاصی از جمله طراحی و ساخت ضعیف مخلوط و همچنین شرایط آب و هوایی به وجود می‌آیند. از جمله خرابی‌های مهم رویه‌های آسفالتی می‌توان به ترک‌های خستگی، تغییر شکل ماندگار یا شیار افتادگی، آسیب رطوبتی و ... اشاره کرد. شیار افتادگی در اثر بارگذاری تکراری، که باعث تجمع و افزایش تغییر شکل دائمی می‌باشد، به وجود می‌آید و همچنین از زهکشی عرضی آب ناشی از بارندگی نیز جلوگیری می‌کند. شیار افتادگی اولیه با کاهش حجم هوا، به‌طوری‌که تغییر حجم فقط با تغییر شکل عمودی است، رخ می‌دهد. اما، شیار افتادگی ثانویه به دلیل تنش برشی که با حرکت عمودی و جانبی مواد همراه است، اتفاق می‌افتد (Mallick and El-Korchi, 2013). برای ارزیابی خصوصیات شیار افتادگی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش‌های مختلفی از جمله آزمایش ردچرخ²، آزمایشات خزش استاتیکی و دینامیکی³ (Baghaee Moghaddam et al., 2014; Tayfur et al., 2007)، مقاومت مارشال⁴ (Tayfur et al., 2007)، نسبت مارشال (MQ)⁵ (Baghaee Moghaddam et al., 2014; Tayfur et al., 2011; Tayfur et al., 2004; Hınıslioglu and Agar, 2007) و آزمایش کشش غیرمستقیم⁶ (Baghaee Moghaddam et al., 2014; Tayfur et al., 2011; Tayfur et al., 2007) وجود دارد.

آزمایش خزش ارتباط بسیار خوبی با عمق شیار واقعی و

همچنین قابلیت بالایی برای تخمین شیار افتادگی در لایه‌های آسفالتی دارد (Baghaee Moghaddam et al., 2014). نسبت مارشال (MQ) برابر است با نسبت استقامت مارشال به روانی، که معیار شناخته شده‌ای برای ارزیابی مقاومت مواد نسبت به تنش برشی، تغییر شکل دائمی و در نتیجه شیار افتادگی می‌باشد. مقدار MQ بالاتر نشان‌دهنده سختی بیشتر مخلوط و در نتیجه نشان‌دهنده مقاومت بیشتر مخلوط آسفالتی نسبت به تغییر شکل دائمی می‌باشد (Baghaee Moghaddam et al., 2014; Tayfur et al., 2007). یکی دیگر از ویژگی‌های مهم بتن آسفالتی، مقاومت آن در برابر بارهای کششی و در نتیجه ترک‌خوردگی است. آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم (ITS) نشان‌دهنده مشخصات کششی مخلوط آسفالتی می‌باشد، که می‌توان آن را به خصوصیات ترک‌خوردگی روسازی نسبت داد (Rashdul Islam et al., 2015).

برای ساختن یک روسازی با دوام‌تر دو راه حل وجود دارد: 1) ساخت یک روسازی با ضخامت بیشتر، که هزینه‌های ساخت را بالا می‌برد. 2) ساخت روسازی‌های اصلاح‌شده (Baghaee Moghaddam et al., 2011). یک روش متداول برای بهبود عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، استفاده از افزودنی‌ها می‌باشد. انواع مختلف الیاف‌ها و پلیمرها برای این منظور استفاده می‌شوند (Baghaee Moghaddam et al., 2012; Modarres and Hamed, 2014b). در سال‌های اخیر، استفاده از پلیمرها در مخلوط‌های آسفالتی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا کرده است (Lastra-Gonzalez et al., 2016; Xu et al., 2016). افزودن پلیمرها به قیر باعث بهبود خصوصیات سرویس‌دهی، افزایش خاصیت الاستیک و چسبندگی، کاهش تغییر شکل‌های دائمی (در دماهای بالا) و ترک‌های حرارتی و خستگی (در دماهای پایین) می‌شود (Xu et al., 2016; Gonzalez et al., 2012). دلیل اصلی استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری در قیر، گسترش و بیشتر کردن دمای سرویس‌دهی مخلوط آسفالتی یا کاهش حساسیت آن نسبت به دما می‌باشد (Modarres and Hamed, 2014a). استفاده از پلیمرها باعث افزایش پیوستگی قیر و همچنین باعث افزایش چسبندگی قیر با مصالح سنگی می‌شود (Ahmadinia et al., 2011; Vural Kok and Colak, 2011; Ahmadinia et al., 2012).

اگرچه استفاده از افزودنی‌های بکر می‌تواند باعث بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی شود اما در بسیاری از موارد

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 (Rodriguez-Alloza et al., 2014; Vural Kok and Colak, 2011; 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).

پلاستیک‌های ضایعاتی نیز مشکل دفع کردن دارند و عموماً دفن و یا سوزانده می‌شوند، که هر دو روش برای محیط‌زیست آسیب جدی به‌شمار می‌آیند. یک روش ایمن برای دفع پلاستیک‌های ضایعاتی استفاده از آنها در لایه‌های راه می‌باشد (Ahmed, 1993). در تحقیقی، بقای مقدم و همکارانش به بررسی خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر 0/1، 0/2، 0/3، 0/4، 0/5، 0/6، 0/7، 0/8، 0/9 و 1 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 می‌یابند. 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 (SMA) حاوی PET با مقادیر 0، 2، 4، 6،

هزینه‌های ساخت را بسیار بالا می‌برد. بنابراین، تحقیقات بسیاری بر روی مخلوط‌های حاوی مواد ضایعاتی برای بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی، انجام شده است. استفاده مجدد از مواد ضایعاتی باعث کاهش استفاده از مواد بکر و همچنین راه حلی برای دفع مواد ضایعاتی می‌باشد (Modarres and Hamed, 2014a; Baghaee Moghaddam et al., 2012; Baghaee Moghaddam et al., 2014; Baghaee Moghaddam et al., 2011; Ahmadinia et al., 2011; Ibrahim et al., 2015; Moreno et al., 2013; Kofteci, 2016; Modarres And Hamed, 2014b; Fatemi And Imaninasab, 2016).

لاستیک‌ها و پلاستیک‌های ضایعاتی (PET) از جمله پلیمرهای ضایعاتی هستند که در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده‌اند. در بین مواد ضایعاتی لاستیک‌ها و پلیمرهای بازیافتی بیشترین استفاده را داشته‌اند (Baghaee Moghaddam et al., 2016; 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 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 SBS، معمولاً 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, Vural Kok and Colak, 2013, Modarres and Hamed, 2014b). استفاده از یک اصلاح‌کننده غالباً 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).

2- مروری بر پیشینه تحقیق

خرده لاستیک حدود 50 سال در صنعت روسازی مورد استفاده قرار گرفته است (Tang et al., 2016). مطالعات زیادی

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 2، 4، 6، 8 و 10 درصد وزن قیر پرداختند و همچنین آزمایشات ITS و مدول برجهندگی را برای در دو دمای 5 و 20 درجه سانتی‌گراد انجام دادند. آنان نشان دادند که اضافه کردن PET باعث بهبود خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود و مقادیر مدول برجهندگی برای مخلوط‌های حاوی PET در محدوده مجاز می‌باشد و همچنین اضافه کردن PET به میزان 2 درصد وزن قیر، بیشترین مقاومت کششی و سختی را دارد (Modarres and Hamed, 2014a; Modarres and Heamed, 2014b). بر اساس تحقیقات گذشته، مطالعات نسبتاً کمی روی تاثیر استفاده بطری‌های پلاستیکی (PET) بر مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی انجام شده است و هنوز مطالعات کامل و همه‌جانبه‌ای بر روی مخلوط‌های آسفالتی حاوی این مواد به طور همزمان، انجام نشده است. در این پژوهش، پلیمر ضایعاتی PET، با درصد‌های مختلف و در دو اندازه، به مخلوط‌های آسفالتی با قیر لاستیکی اضافه شده است. در واقع هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر استفاده همزمان این دو نوع پلیمر ضایعاتی و همچنین تاثیر اندازه PET بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد.

3- مواد آزمایش و اختلاط

3-1- مشخصات مواد و مصالح مصرفی

در این تحقیق خرده لاستیک ضایعاتی با قیر 70-60 به روش تر در آزمایشگاه شرکت عمران عایق شیمی مخلوط شد. جدول 1، شرایط اختلاط قیر مصرفی در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. مصالح سنگی در این پژوهش از شرکت نگین گستران راه زندیگان، 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 2 و جدول 3 آورده شده است. در این تحقیق دانه‌بندی شماره 4 از آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران، انتخاب گردید. شکل 1 نشان‌دهنده محدوده دانه‌بندی آیین‌نامه و دانه‌بندی مخلوط مورد استفاده در

8 و 10 درصد وزن قیر را مورد آزمایش قرار دادند و مشاهده کردند که اضافه کردن PET، به میزان 6 درصد وزن قیر بیشترین مقاومت و نسبت مارشال را نتیجه می‌دهد (Ahmadinia et al., 2011). در تحقیقی دیگر، احمدی‌نیا و همکارانش، آزمایشات رد چرخ، آسیب رطوبتی و مدول برجهندگی را بر روی مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر 0، 2، 4، 6، 8 و 10 درصد وزن قیر انجام دادند و نتایج آزمایش مدول برجهندگی نشان داد که، اضافه کردن PET تا مقدار 6 درصد باعث افزایش مدول برجهندگی تا 16 درصد نسبت به نمونه کنترلی می‌شود. در نتیجه، اضافه کردن PET به مخلوط باعث سخت‌تر شدن آن می‌شود. نتایج آزمایش ردچرخ که نشان دهنده مقاومت در برابر شیار افتادگی است، نشان داد که عمق شیار برای مخلوط حاوی 4 درصد PET از مابقی درصدها کمتر می‌باشد. این درصد از PET باعث کاهش عمق شیار تا 29 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). بقائیه مقدم و همکارانش، به بررسی خصوصیات دینامیکی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر 0، 2، 4، 6، 8، 10 و 1/0 درصد وزن مصالح سنگی را با حداکثر اندازه ذرات 2/36 میلی‌متر پرداختند و دریافتند که سختی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به طوری‌که، کمترین سختی مربوط به بیشترین مقدار PET، یعنی 1/0 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، بقائیه مقدم و همکارانش، آزمایش خزش دینامیکی را بر روی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر 0، 2، 4، 6، 8، 10 و 1/0 درصد وزن مصالح سنگی انجام دادند. آزمایش خزش دینامیکی را در دو تنش 300 و 400 کیلو پاسکال و سه دمای 10، 25 و 40 درجه سانتی‌گراد انجام دادند و دریافتند که خصوصیات تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. به طوری‌که کرنش دائمی مخلوط‌های حاوی PET

Formatted: Line spacing: Multiple 1.1 li

این مطالعه است. مشخصات پلاستیک ضایعاتی (PET) به کار رفته در آزمایش‌ها، در جدول 4 نشان داده شده است.

جدول 1. مشخصات قیر مصرفی در آزمایش‌ها

مقدار خرده لاستیک ضایعاتی	اندازه ذرات خرده لاستیک ضایعاتی	دمای اختلاط (°C)	سرعت اختلاط (rpm)	مدت زمان اختلاط (دقیقه)	قیر پایه
6 درصد وزن قیر	0-2 میکرون	180	1000	120	60-70

جدول 2. مشخصات مصالح سنگی مورداستفاده در تحقیق

نتایج آزمایش		روش آزمایش	مشخصه
ریزدانه	درشت‌دانه		
78	-	AASHTO-T176	ارزش ماسه‌ای
-	27	AASHTO-T96	درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس
-	100 در یک جبهه 98 در دو جبهه	ASTM-D5821	درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره 4
20		-	درصد سیلیس مصالح سنگی (SiO ₂)
3	-	AASHTO-M6	ضریب نرمی ماسه
-	20	BS-812	درصد تورق
0/7	1/3	AASHTO-T104	درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم
بیش از 95 درصد		ASTM-D1664	درصد آندود به قیر مصالح سنگی
-	ندارد	ASTM-D4791	درصد دانه‌های پهن و دراز

جدول 3. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

وزن مخصوص (gr/cm ³)		درصد جذب آب	
حقیقی	ظاهری		
2/65	2/71	0/8	مصالح سنگی مانده روی الک شماره 8
2/65	2/73	1/2	مصالح سنگی رد شده از الک شماره 8 و مانده روی الک 200
2/660		-	مصالح سنگی رد شده از الک 200

جدول 4. مشخصات PET به کاررفته در آزمایشات

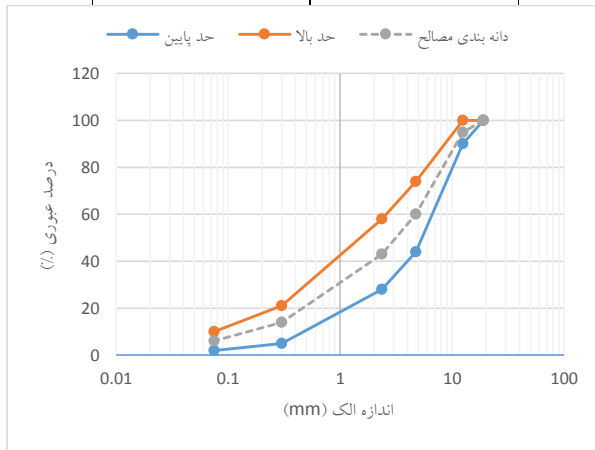
مقدار	استاندارد	خصوصیات
1/35	ASTM-D792	چگالی (gr/cm ³)
0/1	ASTM-D570	جذب آب (%)
250	-	دمای ذوب (سانتی‌گراد)

جدول 5. اندازه ذرات PET به کاررفته در آزمایشات

اندازه الک (mm)	درصد عبوری (%)
مشخصات ذرات PET درشت	

Formatted Table

100	2/36 (الک #8)
5	1/18 (الک #16)
مشخصات ذرات PET ریز	
100	0/6 (الک #30)
5	0/3 (الک #50)



شکل 1. محدوده دانه بندی آیین نامه و دانه بندی مخلوط مورد استفاده در مطالعه



شکل 2. شکل ظاهری PET با دو اندازه مختلف

2-3- طرح اختلاط و آماده سازی نمونه ها

نتایج در محدوده مجاز آیین نامه بود. نمونه های آسفالتی، براساس روش مارشال با ارتفاع تقریبی 67 میلی متر و قطر 101/6 میلی متر در شرایط آزمایشگاهی، طبق استاندارد ASTM D1559 ساخته شدند. نمونه ها با استفاده از چکش مارشال، با 75 ضربه به هر طرف نمونه، با در نظر گرفتن شرایط ترافیک سنگین، متراکم شدند. به منظور مطالعه تأثیر اندازه و

مقدار قیر بهینه برای نمونه شاهد بر اساس طرح اختلاط مارشال، 6 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 D1559). برای این منظور، استقامت مارشال، روانی مارشال و درصد هوای نمونه های حاوی PET تعیین شد و

دائمی می‌باشد (Ameri et al., 2013).

2-4- 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 25°C و با چک مارشال که دارای سرعت 50/8mm/min بود، صورت گرفت. مقدار فضای خالی نمونه‌های آسفالتی در این آزمایش، 7±0/5 درصد بود. معادله 1 برای محاسبه مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها، استفاده می‌شود:

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

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

3-4- آزمایش خزش دینامیکی (شیار افتادگی)

آزمون‌های آزمایشگاهی مختلفی همچون خزش استاتیکی، خزش دینامیکی، ردچرخ و آزمایش‌های کشش غیرمستقیم، برای ارزیابی پتانسیل تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی، استفاده می‌شود. در میان روش‌های ارزیابی پتانسیل تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی، آزمایش خزش دینامیکی، یکی از بهترین روش‌ها است. براساس گزارش NCHRP، در میان آزمون‌های آزمایشگاهی بررسی شده، آزمایش خزش دینامیکی همبستگی بسیار خوبی با عمق شیار اندازه‌گیری شده دارد و دارای ظرفیت بالایی، در تخمین پتانسیل شیار افتادگی لایه‌های آسفالت، می‌باشد. آزمایش خزش دینامیکی، به عنوان یک روش آزمایشگاهی، برای ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده و اصلاح نشده، در برابر تغییر شکل دائمی، مناسب است (Khodaii and Mehrara, 2009).

نمودار کرنش عمودی به ازای تعداد بار اعمالی، که نمونه آن در شکل 3، نشان داده شده است، مهم‌ترین خروجی آزمایش خزش دینامیکی است که به منحنی خزش موسوم است. منحنی خزش به سه ناحیه تقسیم می‌شود. در ناحیه اول، نرخ کرنش

مقدار PET بر مشخصات مهندسی و مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی، PET در مقادیر 2، 4، 6، 8 و 10 درصد بر اساس وزن قیر، در دو اندازه ریز (مانده روی الک #50 و درشت (مانده روی الک #16) به نمونه‌های آسفالتی اضافه شد و با نمونه شاهد مقایسه گشتند.

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., 2012, Ahmadinia et al., 2011). با توجه به نقطه ذوب بالای PET (حدوداً 250 درجه سانتی‌گراد) اگر به روش تر، ابتدا با قیر اختلاط شود، PET نمی‌تواند در مخلوط آسفالتی همگن شود (Modarres and Hamed, 2014a). در نتیجه در این تحقیق، نمونه‌های حاوی PET به روش سوم ساخته شدند؛ به طوری که ابتدا قیر و سنگ‌دانه‌ها به مدت 5 دقیقه با هم اختلاط شدند سپس PET اضافه گردید و به مدت 2 دقیقه عمل اختلاط ادامه یافت تا PET و سنگ‌دانه‌ها به طور کامل به قیر آغشته شدند (Ahmadinia et al., 2011, Ahmadinia et al., 2012).

4- 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. آزمایش‌های انجام شده به شرح زیر است:

1-4- آزمایش استقامت و روانی مارشال

آزمایش استقامت و روانی مارشال بر روی نمونه شاهد و نمونه‌های دارای درصد‌های مختلف PET، طبق استاندارد ASTM D1559 انجام شد. علاوه بر این، نسبت مارشال (MQ) (نسبت استقامت (Kg) به روانی مارشال (mm)) نیز روی نمونه‌های مختلف محاسبه شد. نسبت مارشال بالاتر نشان دهنده مقاومت بهتر در برابر تنش برشی و تغییر شکل‌های

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

در این تحقیق، برای ارزیابی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر شیار افتادگی، آزمایش خزش دینامیکی با استفاده از دستگاه UTM-10⁷ ساخت کشور آلمان، به منظور اعمال بار محوری تکرار شونده بر روی نمونه‌های آسفالتی، با اندازه‌گیری تغییر شکل‌های عمودی، استفاده شد. در این دستگاه، برای کنترل دمای محیط نمونه‌های آزمایش، سیستم بارگذاری داخلی یک محفظه محیطی قرار گرفته است. داده‌های ورودی در این دستگاه، شامل ابعاد نمونه (قطر و ارتفاع)، پیش بارگذاری، مقدار تنش تماسی، تنش انحرافی، فرکانس اعمال تنش، تعداد سیکل بارگذاری و دمای محیط است، که توسط یک نرم‌افزار کنترل می‌شوند.

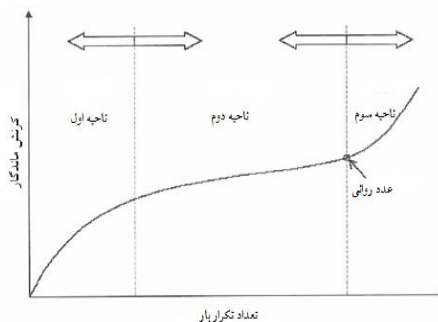
5- نتایج و بحث

5-1- نتایج آزمایش مارشال

شکل 4 نتایج آزمایش استقامت مارشال مربوط به مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف PET در دو اندازه را نشان می‌دهد. نتایج از آزمایش سه نمونه برای هر ترکیب و میانگین-گیری از آنها بدست آمده است. مطابق نتایج حاصل، استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET، با افزایش مقدار PET، افزایش می‌یابد. همچنین مخلوط‌های حاوی PET با اندازه ذرات کوچک‌تر مقاومت بیشتری نسبت به مخلوط‌های حاوی PET با اندازه ذرات درشت‌تر دارند و بیشترین مقدار استقامت (1774/72kg) متعلق به مخلوط آسفالتی حاوی 10 درصد PET است.

PET با اندازه ذرات کوچک‌تر سطح مخصوص بیشتری دارد و با توجه به زمان اختلاط PET با مخلوط آسفالتی و همگن بودن آن در مخلوط، بیشتر به چسبندگی قیر و مصالح سنگی کمک و از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین، با افزایش پیوستگی مصالح سنگی، سختی مخلوط آسفالتی را افزایش داده و در نتیجه استقامت مارشال و مقاومت مخلوط را افزایش می‌دهد.

شکل 5 نشان‌دهنده نتایج بدست آمده برای نسبت مارشال (MQ)، برای هر دو اندازه می‌باشد. استفاده از PET در مخلوط، موجب افزایش مقدار نسبت مارشال شده و با افزایش مقدار PET، نسبت مارشال نیز افزایش می‌یابد. مخلوط‌های



شکل 3. نمودار کرنش حاصل از آزمایش خزش دینامیکی

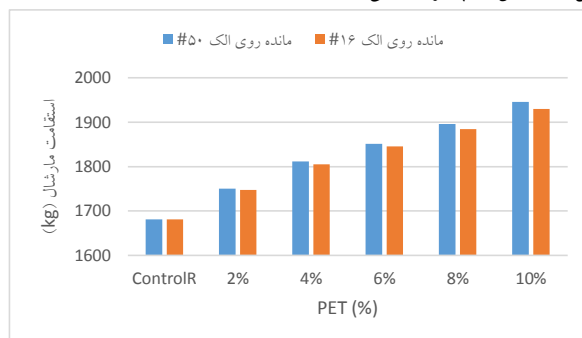
آزمایش خزش دینامیکی طبق استاندارد EN 12697-25 انجام شد (Al Nageim et al., 2012). رفتار نمونه‌ها، تحت شرایط آزمایش که در جدول 6 ارائه شده است، مورد ارزیابی قرار گرفت. سطوح تنش پایین در آزمایش خزش دینامیکی نمی‌تواند رفتار واقعی مخلوط‌های آسفالتی، به خصوص مخلوط‌های اصلاح شده، را نشان دهد (Khodaii and Mehrara, 2009). به همین دلیل، در این مطالعه سطح تنش 300kPa برای ارزیابی نمونه‌ها در نظر گرفته شد. همچنین، به منظور از بین بردن تأثیرات احتمالی تفاوت‌های

جدول 6. شرایط آزمایش خزش دینامیکی

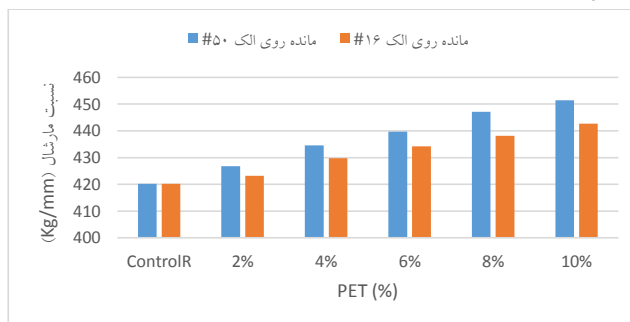
تنش (kPa)	فرکانس (Hz)	زمان بارگذاری (s)	زمان استراحت (s)	تعداد بار اعمالی	دمای آزمایش (°C)	قطر نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)
300	0.5	0±1/05	0±1/05	10100	40	101.6	1±67

و بهترین نتیجه برای مخلوط‌های حاوی 10 درصد PET بدست آمده است. اضافه کردن PET به مخلوط‌های آسفالتی باعث افزایش پیوستگی بین سنگدانه‌ها می‌شود. این امر موجب افزایش سختی و در نهایت افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی می‌شود.

حاوی PET با اندازه کوچک‌تر، MQ بیشتری نسبت به مخلوط‌های حاوی PET با اندازه ذرات بزرگتر دارند. نتایج نشان می‌دهد که، استفاده از PET در مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی، باعث افزایش نسبت مارشال می‌شود و این نشان دهنده افزایش مقاومت، در برابر تنش برشی و تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی این دو پلیمر ضایعاتی است



شکل 4. استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف PET برای هر دو اندازه



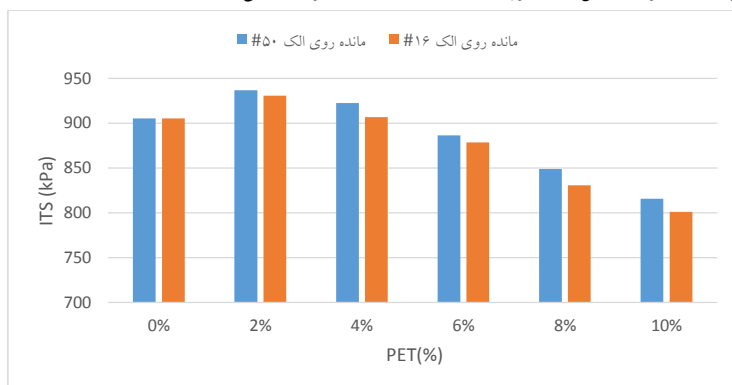
شکل 5. نسبت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف PET برای هر دو اندازه

غیرمستقیم مربوط به نمونه‌های حاوی 2 درصد PET است، که مشابه با تحقیقات گذشته (Modarres and Hamed, 2014a) می‌باشد. در مقادیر بالاتر PET، به قیر بیشتری برای پوشش PET نیاز است و با توجه به ثابت بودن مقدار قیر بهینه برای تمامی مخلوط‌ها، افزایش مقدار PET باعث کاهش ضخامت قیر

5-2- نتایج و تحلیل آزمایش کشش غیرمستقیم (ITS) متوسط مقادیر مقاومت کششی مربوط به دو اندازه مختلف، در شکل 6 آورده شده است. مشاهده می‌شود که مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی با افزودن PET با هر دو اندازه ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین مقاومت کششی

ذرات PET سطح موثر آنها بیشتر می‌شود و برای پوشش آنها نیاز به قیر بیشتری است. اما این اختلاف، جزئی و قابل چشم‌پوشی می‌باشد. از طرف دیگر ذرات کوچک‌تر بهتر در مخلوط پخش و همگن می‌شوند و بهتر می‌توانند به مقاومت مخلوط آسفالتی کمک کنند.

اطراف سنگدانه‌ها و در نهایت باعث کاهش مقاومت کششی مخلوط می‌شود. با توجه به شکل 6 مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET با اندازه کوچک‌تر نسبت به مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET با اندازه بزرگ‌تر، بیشتر است. با توجه به این که با کوچک شدن اندازه

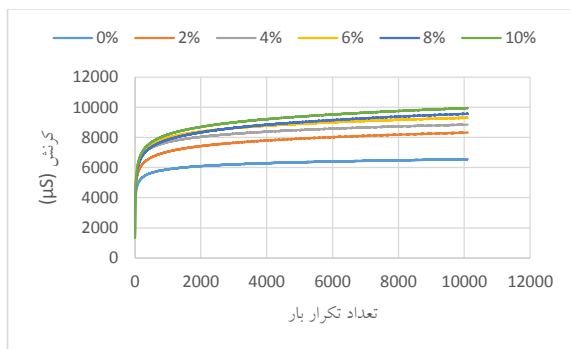


شکل 6. مقاومت کششی مربوط به نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET برای هر دو اندازه

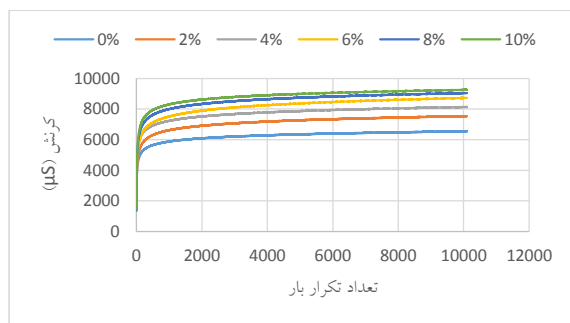
که، چون اندازه دانه‌های مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) نسبت به بتن آسفالتی گرم بزرگ‌تر است و ریزدانه کمتری دارد، PET بهتر می‌تواند به پیوستگی سنگدانه‌ها کمک کند. در نتیجه می‌توان گفت که دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET دلیل این تناقض باشد. اما، مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی مخلوط‌های حاوی PET با اندازه کوچک‌تر نسبت به مخلوط‌های حاوی PET با اندازه بزرگ‌تر، برای هر کدام از درصدها، بیشتر است. برای مثال، در شکل 9 نمودار خزش مربوط به مخلوط‌های حاوی 10 درصد PET برای هر دو اندازه آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی PET با اندازه کوچک‌تر، مقاومت بیشتری در مقابل تغییر شکل دائمی دارند. PET با اندازه ذرات کوچک‌تر شکل هندسی تقریباً ثابتی دارد و همه ذرات به صورت تخت می‌باشند. اما، ذرات بزرگ‌تر شکل هندسی نامنظمی دارند، به طوری که حالت لوله‌شدگی و نفوذپذیر دارند. این اختلاف باعث می‌شود که در زمان بارگذاری دینامیکی، کرنش بازگشت‌پذیر کمتری داشته باشند و تغییر شکل دائمی بیشتری از خود نشان دهند.

3-5- آزمایش خزش دینامیکی (شیار افتادگی)

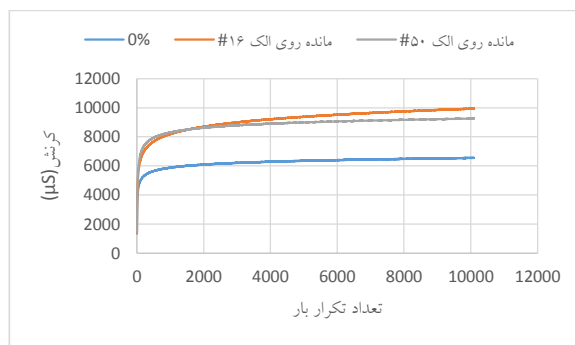
این آزمایش طبق استاندارد EN 12697-25 در سطح تنش 300kPa، دمای 40 °C و فرکانس 0/5 هرتز برای مقادیر مختلف و هر دو اندازه PET انجام شد. با استفاده از نمودارهای کرنش بر حسب تعداد سیکل بارگذاری، مقاومت مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف PET مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل‌های 7 و 8، نمودارهای کرنش ماندگار مربوط به نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف PET با دو اندازه را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج، مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی نمونه‌های حاوی PET نسبت به نمونه شاهد کمتر می‌باشد، این روند برای هر دو اندازه از PET مشابه می‌باشد. نتایج به دست آمده از آزمایش خزش دینامیکی با نتایج حاصل از تحقیق قبلی (Earnest, 2015) که PET را به صورت خشک به بتن آسفالتی گرم اضافه کرد مشابه است. اما، با نتایج حاصل از برخی از مطالعات (Baghaee Moghaddam et al., a 2014; Baghaee Moghaddam et al., b 2014) که PET را به صورت خشک به مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) اضافه کرده‌اند متناقض است. می‌توان گفت



شکل 7. نمودار خزش مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف PET با اندازه مانده روی الک #16



شکل 8. نمودار خزش مخلوط‌های حاوی درصد‌های مختلف PET با اندازه مانده روی الک #50



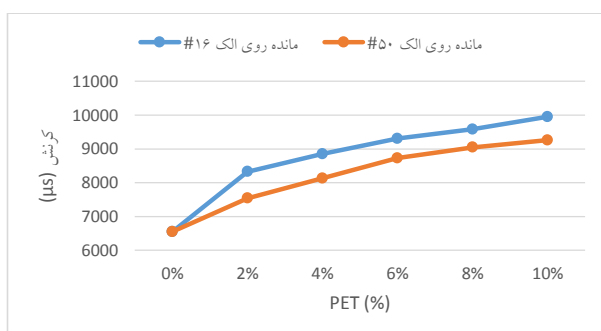
شکل 9. نمودار خزش مخلوط‌های حاوی 10 درصد PET با دو اندازه مختلف

براساس این نمودار می‌توان نمودار تغییرات سختی‌خزشی را ترسیم نمود. شکل 11، تغییرات سختی‌خزشی برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، افزودن PET باعث کاهش سختی‌خزشی شده

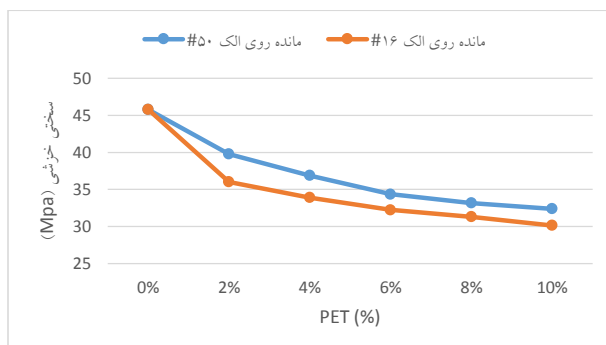
شکل 10، تغییرات کرنش‌نهایی برای مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف PET را نشان می‌دهد. اضافه کردن PET به مخلوط‌های آسفالتی باعث افزایش کرنش‌نهایی و در نتیجه باعث کاهش مقاومت نسبت به تغییر شکل دائمی می‌شود.

که ملاحظه می‌شود، با افزایش مقدار PET نسبت مارشال افزایش اما سختی خزشی کاهش پیدا می‌کند. این موضوع بیانگر این است که نسبت مارشال نمی‌تواند معیار خوبی برای بیان مقاومت در برابر تغییر شکل باشد.

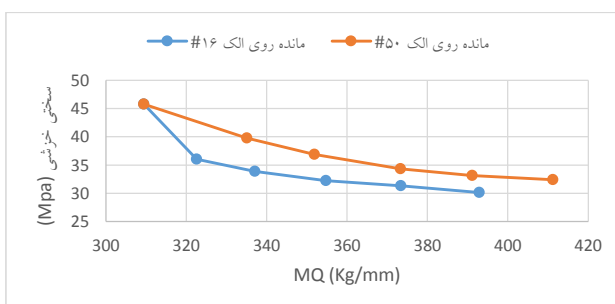
است. همچنین مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET با اندازه ذرات کوچک‌تر، سختی خزشی بیشتری دارند. سختی خزشی و نسبت مارشال هر دو پارامتری برای بررسی مقاومت به تغییر شکل دائمی می‌باشند. شکل 12 این دو پارامتر را برای مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف PET مقایسه می‌کند. همان‌گونه



شکل 10. نمودار تغییرات کرنش نهایی مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه مختلف



شکل 11. نمودار تغییرات سختی خزشی مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه مختلف



شکل 12. نمودار تغییرات نسبت مارشال نسبت به سختی خزشی برای مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه مختلف

نتیجه گرفت که مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET، رفتار متفاوتی در برابر بارگذاری استاتیکی و دینامیکی دارند. علاوه بر این، نتایج MQ نمی‌تواند نشان‌دهنده مقاومت به تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی باشد.

7- با مقایسه نتایج آزمایش خزش حاصل از این تحقیق و مطالعات گذشته می‌توان گفت که دانه‌بندی مخلوط آسفالتی حاوی PET بر نتایج آزمایش خزش دینامیکی تأثیرگذار است.

7- پی‌نوشت‌ها

- 1- Polyethylene Terephthalate
- 2- Wheel Track
- 3- Static and Dynamic Creep tests
- 4- Marshall Test
- 5- Marshall Quotient
- 6- Indirect Tensile Strength
- 7- Universal Testing Machine

8- 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.
- Aksoy, A., Şamlioglu, K., Tayfur, S. and Özen, H. (2005), "Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures". Construction and building materials, Vol.19, No. 1, pp.11-18.
- 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 behavior 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.

6- نتیجه‌گیری

بر اساس آزمایش‌های انجام شده بر روی تأثیر اضافه کردن PET با دو اندازه مختلف به مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر لاستیکی، نتایج زیر حاصل شد:

1- 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 10 درصد PET می‌باشد. PET باعث ایجاد پیوستگی بین مصالح سنگی شده و در نتیجه مقاومت فشاری مخلوط آسفالتی را افزایش می‌دهد.

2- PET با افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه باعث افزایش مقاومت کششی مخلوط آسفالتی شد. مخلوط‌های حاوی 2 درصد PET بیشترین مقاومت کششی را داشتند. می‌توان گفت مقادیر بیشتر PET باعث کاهش ضخامت لایه قیری اطراف سنگدانه می‌شود و در نتیجه با افزایش مقدار PET مقاومت کششی مخلوط آسفالتی کاهش می‌یابد.

3- منحنی‌های خزش نشان دادند، اضافه کردن PET به بتن آسفالتی گرم باعث کاهش مقاومت نسبت به تغییر شکل دائمی تحت بارگذاری دینامیکی می‌شود.

4- با توجه به این که PET ویسکوزیته قیر را افزایش می‌دهد، PET با اندازه ذرات کوچک‌تر سطح ویژه بیشتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر دارد، در نتیجه مخلوط‌های حاوی ذرات کوچک‌تر PET ویسکوزیته بیشتری دارند. افزایش ویسکوزیته موجب افزایش ضخامت قیر در اطراف سنگدانه‌ها می‌شود که در نتیجه باعث افزایش مقاومت نسبت به تغییر شکل دائمی (شیار افتادگی) مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET با اندازه ذرات کوچک‌تر می‌شود.

5- نتایج آزمایشات استقامت مارشال، نسبت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم نشان دادند که مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET عملکرد خوبی در مقابل بارگذاری استاتیکی دارند. در نتیجه می‌توان از این ماده ضایعاتی در محل‌هایی مانند پارکینگ‌ها، ایستگاه‌های اخذ عوارض و ... که بارگذاری استاتیکی دارند استفاده کرد.

6- با توجه به نتایج آزمایشات استقامت مارشال و نسبت مارشال که بارگذاری استاتیکی دارند و همچنین نتایج آزمایش خزش دینامیکی که در این تحقیق انجام گرفت، می‌توان

(PET) Modified Asphalt”.

- Fatemi, S., & Imaninasab, R. (2016), “Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials”. *Construction and Building Materials*, Vol. 120, pp. 450-456.
- 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), “Thermo mechanical properties of bitumen modified with crumb tire rubber and polymeric additives”. *Fuel Processing Technology*, Vol. 91, No. 9, pp. 1033-1039.
- Himshoğlu, S., & Açar, E. (2004), “Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix”. *Materials letters*, Vol. 58, No. 3, pp.267-271.
- 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.
- Islam, M. R., Hossain, M. I., & Tarefder, R. A. (2015), “A study of asphalt aging using Indirect Tensile Strength test”. *Construction and Building Materials*, Vol.95, pp. 218-223.
- Ibrahim, I. M., Fathy, E. S., El-Shafie, M., & Elnaggar, M. Y. (2015), “Impact of incorporated gamma irradiated crumb rubber on the short-term aging resistance and rheological properties of asphalt binder”. *Construction and Building Materials*, Vol. 81, pp. 42-46.
- Kök, B. V., & Çolak, H. (2011), “Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt”. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 8, pp. 3204-3212.
- Kalyoncuoglu, S. F., & Tigdemir, M. (2011), “A model for dynamic creep evaluation of SBS modified HMA mixtures”. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 2, pp. 859-866.
- 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
- Ahmadiania, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M. and Ahmadiania, E., (2012), “Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt”. *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 984-989.
- Al Nageim, H., Al-Busaltan, S.F., Atherton, W. and Sharples, G. (2012), “A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials”. *Construction and building materials*, Vol. 36, pp.743-748.
- Ameri, M., Hesami, S. and Goli, H. (2013), “Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag”. *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 611-617.
- 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.
- 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.
- Dachowski, R., & Kostrzewa, P. (2016), “The Use of Waste Materials in the Construction Industry”. *Procedia Engineering*, Vol. 161, pp. 754-758.
- Earnest, M. D. (2015), “Performance Characteristics of Polyethylene Terephthalate

- Hot Mix Asphalt Mixtures". In *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 174, pp. 82-90.
- Shen, J., Amirkhanian, 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.
 - Tortum, A., Çelik, C., & Aydin, A. C. (2005), "Determination of the optimum conditions for tire rubber in asphalt concrete". *Building and Environment*, Vol. 40, No.11, pp. 1492-1504.
 - Tayfur, S., Ozen, H. and Aksoy, A., (2007), "Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers". *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 2, pp. 328-337.
 - 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.
 - Uzarowski, L. (2006), "The development of asphalt mix creep parameters and finite element modeling of asphalt rutting" (Doctoral dissertation, University of Waterloo).
 - 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., Amirkhanian, 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., Amirkhanian, 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.
 - 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., & Indacochea-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., & Martínez-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 mixes to plastic deformation". *Materials & Design*, Vol. 47, pp. 274-280.
 - Mallick, R. B., & El-Korchi, T. (2013), "Pavement engineering: principles and practice", 2th Edition, CRC Press. Taylor & Francis Group.
 - Modarres, A., & Hamed, H. (2014) "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. (2014), "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.
 - 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

Investigating the Properties of Asphalt Concrete Containing Waste PET and Rubber Asphalt

Hasan Taherkhani¹, Mohammad Reza Arshadi

M. R. Arshadi, M.Sc.,² Graduate Student in Highway and Transportation Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Corresponding Author e-mail: mreza.arshadi@znu.ac.ir

Received: May 2016-Accepted: August 2016

ABSTRACT

In this research the effects of waste polymer of PET on the performance of asphaltic mixtures containing rubber asphalt are investigated. To this end, two different sizes of waste PET particles were added into an asphalt concrete at different percentages of 2, 4, 6, 8 and 10% (by the weight of asphalt binder). After determination of the optimum binder content of each mixture, they were subjected to different tests of Marshall Stability, indirect tensile strength and dynamic creep tests. Dynamic creep tests were conducted using UTM-10 under 300kPa and temperature of 40°C for evaluating the permanent deformation behavior of the mixtures containing different percentages of PET. The results showed that the addition of PET into the asphaltic mixtures containing rubber asphalt resulted in the improvement of Marshall Stability and Marshall Quotient compared with the control mixture without PET, with the highest stability was obtained for the mixtures containing 10% of PET. The indirect tensile strength tests results showed that, for both sizes, the highest indirect tensile strength was obtained by the addition of 2% of PET, beyond which the indirect tensile strength decreased with increasing PET content. The dynamic creep test results showed that the mixtures containing PET have a different behavior under dynamic loading compared with that under static loading. It was found that the addition of PET results in the reduction of resistance against permanent deformation under dynamic loading, such that, the resistance decreased with increasing PET content. The Marshall stability, indirect tensile and dynamic creep tests results showed that the mixtures containing finer PET particles have a higher resistance than those containing coarser particles.

Keywords: Asphalt Concrete, Waste Polymer of PET, Rubber Asphalt, Dynamic Creep

Formatted: Font: 11 pt, Not Bold, Italic, Complex Script Font: 11 pt, Bold, Italic

Formatted: Font: 11 pt, Complex Script Font: 11 pt

Formatted: Font: 11 pt, Not Bold, Italic, Complex Script Font: 11 pt, Bold, Italic

Formatted: Font: 11 pt, Complex Script Font: 11 pt

Formatted: Font: 11 pt, Italic, Complex Script Font: 11 pt, Italic

Formatted: Font: 11 pt, Complex Script Font: 11 pt

Formatted: Font: 11 pt, Italic, Complex Script Font: 11 pt, Italic

Formatted: Font: 11 pt, Italic, Complex Script Font: 11 pt, Italic

Formatted: Font: times, 11 pt, Not Bold, Italic, Complex Script Font: 11 pt, Bold, Italic, Not Superscript/ Subscript

Formatted: Font: times, 11 pt, Not Bold, Italic, Complex Script Font: 11 pt, Bold, Italic, Not Superscript/ Subscript

Formatted: Font: times, 11 pt, Not Bold, Italic, Underline, Complex Script Font: 11 pt, Bold, Italic, Not Superscript/ Subscript

Formatted: Font: times, 11 pt, Not Bold, Italic, Underline, Complex Script Font: 11 pt, Bold, Italic, Not Superscript/ Subscript

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Times New Roman), Font color: Auto, Complex Script Font: +Headings CS (Times New Roman), 16 pt, (Complex) Persian

Formatted: Font: (Default) +Headings CS (Times New Roman), Complex Script Font: +Headings CS (Times New Roman), 16 pt, (Complex) Persian

Formatted: Font: times, 11 pt, Not Bold, Italic, Complex Script Font: 11 pt, Bold, Italic, Not Superscript/ Subscript