بررسی مدول برجهندگی و عمر خستگی بتن آسفالتی گرم حاوی پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترافثالات

مقاله علمی - پژوهشی

حسن طاهرخانی*، دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
محمدرضا ارشدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
مهرزاد موبدی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
فرشاد سراوکی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵- پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۵
صفحه ٦٦-٤٩

چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر مقدار و اندازه ذرات پلیمر ضایعاتی پلی‌اتیلن ترافثالات (PET) بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی، ذرات PET با دو اندازه مختلف ریز و درشت و در مقادیر ۰، ۲، ٤ و ٦ درصد (بر اساس وزن قیر) به بتن آسفالتی اضافه شد. مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET، تحت آزمایش‌های مدول برجهندگی در سه دمای (۵، ۲۵ و ٤٠ درجه سانتیگراد) و آزمایش خستگی به روش خمش چهار نقطه‌ای در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند. نتایج نشان داد نمونه‌های حاوی ذرات ریز پلیمر، در دمای ۵ درجه سانتیگراد رفتاری مشابه با ذرات درشت داشته‌اند، بطوری که با افزایش مقدار پلیمر مدول برجهندگی نیز افزایش می‌یابد، و بیشترین مقدار مدول برجهندگی در این دما برای مخلوط‌های حاوی ٦٪ PET ریز و درشت، به ترتیب، ۱۷۵۵۷ و ۱۸۲۲۹ مگاپاسکال می باشد. اما در دماهای ۲۵ و ٤٠ درجه سانتیگراد نمونه‌های حاوی ۲ درصد PET بیشترین مقدار مدول برجهندگی را به ترتیب، به مقدار، ۳٫۵ و ۰٫۸۰۸ مگاپاسکال داشته‌اند. در مخلوط‌های آسفالتی حاوی ذرات درشت پلیمر نمونه‌ی حاوی ٤ درصد PET بیشترین سختی خمشی و کمترین عمر خستگی را به مقدار، به ترتیب، ۳۸۰۳ مگاپاسکال و ۱۶۲۶۰ داشته است. نمونه‌های حاوی ٦ درصد PET (برای هر دو اندازه ریز و درشت) بیشترین عمر خستگی را داشتند، که به ترتیب، ۱۰۰۰۰۰ و ۶۳۲۵۰ می باشد. مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی ذرات درشت پلیمر از مدول برجهندگی نمونه‌های حاوی ذرات ریز PET بیشتر بوده، اما عمر خستگی نمونه‌های حاوی ذرات ریز پلیمر ضایعاتی بیشتر از عمر خستگی نمونه‌های حاوی ذرات درشت PET می باشد.

واژه‌های کلیدی: مخلوط آسفالتی، پلیمر ضایعاتی PET، عمر خستگی، مدول برجهندگی

۱- مقدمه

بتن آسفالتی گرم یکی از رایج‌ترین انواع مخلوط‌های آسفالتی است که سالانه میلیون‌ها تن از آن در راه‌ها استفاده می‌شود. برای ساخت این مخلوط از منابع بکر طبیعی از جمله سنگدانه و قیر استفاده می‌شود. شرایط محیطی و بارهای ترافیک مختلف موجب ایجاد خرابی‌های مختلف و در نتیجه باعث کاهش عمر سرویس‌دهی آن می‌شوند. در نتیجه، بهبود خصوصیات مقاومتی آن در برابر آسیب‌ها، جهت حفظ محیط زیست، استفاده از منابع طبیعی کمتر و انرژی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مواد

مختلفی از جمله پلیمرها به عنوان افزودنی جهت بهبود خصوصیات مکانیکی و فیزیکی مخلوط‌های آسفالتی استفاده می‌شوند. یکی از مزیت‌های استفاده از پلیمرها در مخلوط آسفالتی، کاهش مقدار قیر (در حدود ۱۰ درصد) می‌باشد که در نتیجه باعث کاهش هزینه ساخت راه می‌شود (Giri et al., 2018). 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 و میانی) می‌شود (Xu et al., 2016; Gonzalez et al., 2012). استفاده از پلیمرها باعث افزایش پیوستگی قیر و همچنین باعث افزایش چسبندگی قیر با مصالح سنگی می‌شود (Ahmadinia et al., 2011; Kok and Colak, 2011; Ahmadinia et al., 2012). اگرچه استفاده از افزودنی‌های بکر می‌تواند باعث بهبود خصوصیات مخلوط آسفالتی شود، اما هزینه‌های ساخت را افزایش می‌دهد. در نتیجه، استفاده از مواد ضایعاتی برای افزایش مقاومت مخلوطهای آسفالتی مورد توجه قرار گرفته است. این امر سبب کاهش استفاده از مواد طبیعی و کاهش هزینه‌های ساخت شده و همچنین راه‌حل مناسبی برای دفع مواد ضایعاتی می‌باشد (Fatemi and Imaninasab, 2016). از طرف دیگر، با توجه به گسترش شهرنشینی و افزایش جمعیت، تولید ضایعات به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. حجم زیاد ضایعات، برای محیط زیست خطرناک و همچنین مدیریت شهری را دچار مشکل کرده است. پلاستیک‌ها از جمله مواد ضایعاتی هستند که علاوه بر تولید زیاد به صورت زیست محیطی تجزیه نمی‌شوند. به همین دلیل مدت زمان زیادی در محیط زیست باقی مانده و خطرات جدی برای محیط زیست و انسان به وجود می‌آورند. پلیمر پلی اتیلن ترافتالات (PET) یکی از پرکاربردترین مواد پلاستیکی می‌باشد که به مقدار زیادی در مصارف مختلف استفاده شده و بعد از مصرف به صورت ضایعات دور ریخته می‌شود. یکی از مهمترین کاربردهای این پلیمر ساخت بطری‌های نوشیدنی و بسته بندی 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 و یا در طبیعت رها می‌گردند که مشکلات زیادی را برای محیط زیست ایجاد می‌کند. بنابراین، با توجه به مشکلات زیست محیطی پلاستیک‌های ضایعاتی استفاده مجدد از آنها به شکلی سازگار با محیط زیست ضروری به نظر می‌رسد. با در نظر گرفتن موارد فوق، استفاده از PET به عنوان افزودنی در مخلوط آسفالتی نیازمند بررسی جنبه‌های مختلف آن می‌باشد. پلاستیک‌های ضایعاتی (PET) از جمله پلیمرهای ضایعاتی هستند که در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است (Baghaee Moghaddam et al., 2012; 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 می‌یابد. پلاستیک‌های ضایعاتی می‌توانند پیوستگی بین سنگ‌دانه‌ها را بهبود بخشند و باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی شوند و برای بهبود خصوصیات قیر نیاز به فرایند جذب و واکنش ندارند (Lastra-Gonzalez et al., 2016). همچنین، این مواد برای دماهای سرویس‌دهی بالا مناسب هستند (Ameri et al., 2013; Modarres and Hamedi, 2014b). در تحقیقات مختلف از PET به دو صورت خشک و تر برای اصلاح مخلوطهای آسفالتی استفاده شده است. در حالت خشک، PET جایگزین سنگدانه‌ها می‌گردد و در حالت تر با قیر مخلوط شده و از قیر اصلاح شده در ساخت مخلوط استفاده می‌شود. در تحقیقی PET با مقادیر ۲، ٤، ٦، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر به روش خشک به بتن آسفالتی گرم اضافه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن PET به میزان۲ تا ٤ درصد باعث بهبود خصوصیات مخلوط از جمله مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیر مستقیم و همچنین آسیب رطوبتی شد. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان داد که افزودن PET به بتن آسفالتی گرم موجب کاهش مقاومت در برابر شیارشدگی می‌شود (Taherkhani and Arshadi, 2017). بقائی‌مقدم و همکارانش به بررسی خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر از ۰,۱ تا 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. آنها نشان دادند که

با افزایش مقدار PET، مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم کاهش می‌یابند. همچنین، نشان داده شد که مخلوط‌های حاوی PET رفتار متفاوتی در مقابل بارگذاری استاتیکی و دینامیکی از خود نشان می‌دهند، به طوری‌که، 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 ۰، ۲، ٤، ٦، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر را مورد آزمایش قرار دادند و مشاهده کردند که اضافه کردن PET، به میزان ٦ 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 ۰، ۲، ٤، ٦، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر را انجام دادند و نتایج آزمایش مدول برجهندگی نشان داد که، اضافه کردن PET تا مقدار ٦ درصد باعث افزایش مدول برجهندگی تا ۱٦ درصد بیشتر 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 ٤ درصد PET از 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). بقائی‌مقدم و همکارانش، به بررسی خصوصیات دینامیکی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیرمختلف پرداختند و دریافتند که سختی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به طوری‌که، کمترین سختی مربوط به بیشترین مقدار PET، یعنی ۱ درصد وزن مصالح سنگی می‌باشد. همچنین، خصوصیات خستگی مخلوط‌های حاوی PET بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به مخلوط‌های کنترلی بهبود یافت (Baghaee Moghaddam et al., 2012). در مطالعه‌ای دیگر، بقائی‌مقدم و همکارانش دریافتند که خصوصیات تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت، به طوری‌که، 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 ۲تا ۱۰ درصد وزن قیر پرداختند و همچنین آزمایشات ITS و مدول برجهندگی را برای دو دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند. آنها 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. همچنین، اضافه کردن PET به میزان ۲ درصد وزن قیر، بیشترین مقاومت کششی و سختی را دارد (Modarres and Hamedi, 2014a; Modarres and Heamedi, 2014b). مشان و همکارانش با بررسی تاثیر مقادیر مختلف PET بر روی قیر و مخلوط‌های آسفالتی دریافتند که مقدار ٦ تا ۸٪ (نسبت به وزن قیر) بهترین مقدار برای بهبود رفتار سختی و الاستیسیته قیر می باشد، و مقدار ۸٪ افزودنی بیشترین بهبود را در پایداری و مقاومت به شیار شدگی نتیجه داد. این محققین پیشنهاد دادند که مطالعه بیشتر در مورد خستگی و مدول سختی انجام گیرد (Mashaan et al., 2021). قابچی و همکارانش از مقادیر مختلف PET به صورت میکرونیزه شده به قیر اضافه نموده و خصوصیات قیر و مخلوط‌های آسفالتی را مطالعه نمودند. آنها نتیجه‌گیری نمودند که افزودن PET میکرونیزه به قیر باعث افزایش قابل توجه چسبندگی به مصالح سنگی، ویسکوزیته قیر و مقاومت به آسیب رطوبتی گردید. همچنین، در مخلوط‌ها نیز باعث افزایش مقاومت به ترک خوردگی، شیارشدگی و آسیب رطوبتی گردید (Ghabchi et al., 2021). لوگیامو و همکارانش قابلیت جایگزینی بخشی از قیر در آسفالت SMA را با پلیمر PET بررسی کردند. آنها دریافتند که می توان ۱۰٪ از قیر را با PET بدون تاثیر در خصوصیات عملکردی مورد نیاز مخلوط جایگزین نمود. مخلوط حاوی ۱۰٪ PET مقاومت بهتری در برابر آسیب رطوبتی، ترک

خوردگی خستگی و ترک حرارتی نشان داد، اما در دماهای بالا و فرکانس بارگذاری کم عملکرد ضعیفتری نشان داد. حیدر و حفیظ با افزودن ۹٪ از PET (بر حسب وزن قیر) به صورت تر و خشک به مخلوط آسفالتی با سنگدانه‌های مختلف به مطالعه آسیب رطوبتی مخلوطها به روشهای مختلف پرداختند و پیشنهاد نمودند که برای بهترین عملکرد از ضایعات PET به همراه مصالح سنگی آهکی استفاده گردد (Haider and Hafeez, 2021). ما و هسپ ز ضایعات PET به صورت الیاف در مخلوط آسفالتی کرده و اثر مشخصات الیاف مانند مورفولوژی، اندازه و طول الیاف را برمقاومت ترک خوردگی بررسی نمودند. آنها دریافتند که الیاف طولانی تر با بافت زبرتر و ضخامت بیشتر باعث افزایش طاقت مخلوطهای آسفالتی در دماهای مختلف می‌گردند. در نرخ‌های بارگذاری بالا، شکست در مخلوط از طریق سنگدانه رخ داده و اثر الیاف بر افزایش مقاومت مشاهده نگردید (Ma and Hesp, 2022). مشان و همکارانش اثر ترکیب نانو سیلیس با پلیمر ضایعاتی PET را برخصوصیات مخلوط آسفالتی SMA بررسی نمودند. آنها دریافتند که افزودن ٤ تا ٨ درصد نانوسیلیس به همراه ٦٪ PET باعث بهبود مقاومت شیار شدگی، سختی، نسبت مقاومت کششی و مقاومت به ترک خوردگی می‌شود. ترکیب بهینه نانوسیلیس و PET مقدار ٦٪ از هر کدام نتیجه‌گیری گردید (Mashaan et al., 2022). فرییرا و همکارانش به بررسی قیر و مخلوط آسفالتی اصلاح شده با درصدهای مختلف PET پرداخته و دریافتند که افزودن PET مقاومت کششی و مدول برجهندگی را کاهش داده، اما مقاومت به آسیب رطوبتی افزایش یافت. آنها همچنین دریافتند که در مقدار قیر یکسان، با افزایش PET ضخامت قیر دور سنگدانه‌ها کاهش و حجم فضای خالی افزایش یافت (Feriera et al., 2022). بن زئیر و همکارانش به مرور جامعی از تحقیقات مختلف که بر روی استفاده از PET در قیر و آسفالت انجام شده است پرداخته‌اند. نتیجه گیری آنها در این مقاله مروری این است که PET خصوصیات مکانیکی و دوام روسازی را بهبود می‌دهد، و استفاده از PET در آسفالت روش سازگار با محیط زیست برای جایگزینی دپوی ضایعات PET بوده که در ضمن روسازی‌های با کیفیتی را تولید می‌کند (Ben Zair et al., 2021). با توجه به تناقضات موجود در نتایج حاصل از افزودن PET به مخلوط‌های SMA و HMA و همچنین از آنجایی که مطالعه‌ای بر روی تاثیر اندازه ذرات PET بر مقاومت خستگی و مدول برجهندگی مخلوط HMA انجام نشده است، لذا، در این پژوهش، پلیمر ضایعاتی PET، با درصدهای مختلف و در دو اندازه ریز و درشت، به مخلوط‌های آسفالتی اضافه و آزمایش‌های خستگی و مدول برجهندگی بر روی نمونه‌ها انجام شده است. انجام این تحقیق بر روی کاربرد پلیمر ضایعاتی PET در مخلوط‌های آسفالتی زمینه را برای به کارگیری آنها در صنعت روسازی آماده‌تر نموده و باعث کاهش هزینه تولید آسفالت و حفاظت از محیط زیست خواهد شد. همچنین، این تحقیق کمک خواهد کرد تا مشخص شود برای رسیدن به عملکردهای خاص از مخلوط‌های آسفالتی چه اندازه‌هایی از ذرات PET مناسبتر خواهند بود.

۳- مواد آزمایش و اختلاط

۳-۱- مشخصات مواد و مصالح مصرفی

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل قیر خالص، مصالح سنگی آهکی و پلیمر ضایعاتی پلی‌اتیلن ترافثالات (PET) می‌باشد. قیر مورد استفاده قیر خالص PG64-16 تولید شده در شرکت نفت پاسارگارد می‌باشد که مشخصات فنی لازم را دارا می‌باشد. مصالح سنگی آهکی دولومیتی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت نگین گستران راه زندیگان در شهر زنجان، تهیه شد. مشخصات مصالح سنگی و وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی، به ترتیب، در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. دانه‌بندی شماره ٤ از آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر برای مصالح سنگی مخلوطها انتخاب گردید. شکل ۱ نشان دهنده محدوده دانه‌بندی آیین‌نامه و دانه‌بندی مخلوط مورد استفاده در این مطالعه است. پلیمر ضایعاتی PET مورد استفاده در این تحقیق از بطری‌های ضایعاتی آب معدنی تهیه گردید. بطری‌ها توسط دستگاه خرد کن مخصوص ریز شده و ذرات PET در دو اندازه مختلف ریز و درشت مطابق جدول ۳ جدا گردیدند. اندازه ذرات PET بر اساس مطالعات قبلی انجام‌گرفته (Ahmadinia et al., 2011; Modarres and Hamedi, 2014a; Ahmadinia et al., 2012; Baghaee Moghaddam et al., 2014;

Modarres and Hamedi, 2014b) در نظر گرفته شد. شکل ۲ نیز ذرات PET ریز و درشت را نشان می‌دهد.

مشخصات پلاستیک ضایعاتی (PET) به‌کار رفته در آزمایش‌ها، در جدول ٤ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات مصالح سنگی مورداستفاده در تحقیق

مشخصه	روش آزمایش	نتایج آزمایش	
		درشت‌دانه	ریزدانه
ارزش ماسه‌ای	AASHTO-T176	-	۷۸
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس‌آنجلس	AASHTO-T96	۲۷	–
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ٤	ASTM-D5821	در یک جبهه ۱۰۰ در دو جبهه ۹۸	–
درصد سیلیس مصالح سنگی (Sio_2)	–	۲۰	
ضریب نرمی ماسه	AASHTO-M6	–	۳
درصد تورق	BS-812	۲۰	–
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	AASHTO-T104	۱,۳	۰,۷
درصد اندود به قیر مصالح سنگی	ASTM-D1664	بیش از ۹۵ درصد	
درصد دانه‌های پهن و دراز	ASTM-D4791	ندارد	–

جدول ۲. وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح سنگی

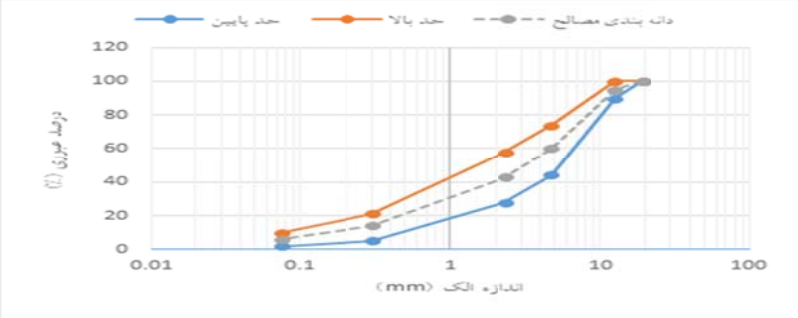
مشخصه	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)		جذب آب (٪)
	ظاهری	حقیقی	
مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸	۲,۷۱	۲,٦٥	۰,۸
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰	۲,۷۳	۲,٦٥	۱,۲
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰	۲,٦٦		-

جدول ۳. اندازه ذرات PET به‌کار رفته در آزمایشات

اندازه الک (میلی‌متر)	درصد عبوری(٪)
مشخصات ذرات PET درشت	
۲,۳٦ (الک #۸)	۱۰۰
۱,۱۸ (الک #۱٦)	٥
مشخصات ذرات PET ریز	
۰,٦ (الک #۳۰)	۱۰۰
۰,۳ (الک #٥۰)	٥

جدول٤. مشخصات PET به‌کاررفته در آزمایشات

خصوصیات	استاندارد	مقدار
چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	ASTM-D792	۱,۳۵
جذب آب (٪)	ASTM-D570	۰,۱
دمای ذوب (سانتی‌گراد)	-	۲۵۰



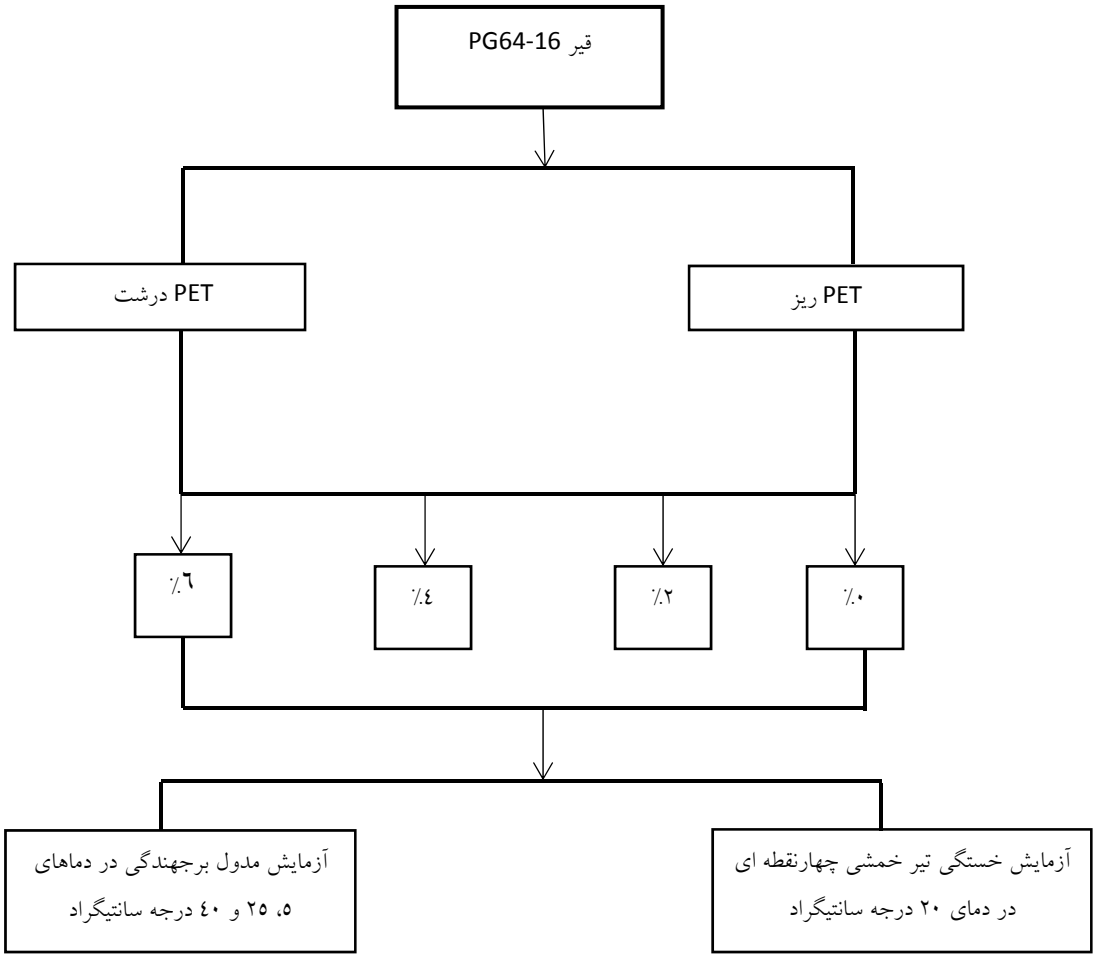
شکل ۱. محدوده دانه‌بندی آیین‌نامه و دانه‌بندی مخلوط مورداستفاده در مطالعه

شکل۲. شکل ظاهری PET با دو اندازه مختلف

۳-۲- برنامه آزمایش‌ها، طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

شکل ۳ نشان دهنده برنامه آزمایش‌های انجام گرفته در این تحقیق است. ۷ نوع مخلوط مختلف استفاده شده و بر روی هرکدام ۲ آزمایش مدول برجهندگی و خستگی انجام گرفته است. مخلوطها شامل مخلوط کنترل ساخته شده با قیر خالص PG64-16، و سه نوع مخلوط حاوی ۲، ٤ و ٦٪ از ذرات PET درشت و ریز می‌باشند. آزمایش مدول برجهندگی در ۳ دمای ۵، ۲۵ و ٤۰ درجه سانتیگراد انجام گرفته و آزمایش خستگی در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد و کرنش ثابت ۷۰۰ میکروکرنش انجام گرفته‌اند. مقدار قیر بهینه برای نمونه شاهد بر اساس طرح اختلاط مارشال، ٤,۵ درصد به دست آمد. با توجه به مطالعات قبلی، مخلوطهای حاوی PET دارای مقدار قیر بهینه برابر با نمونه شاهد هستند (Baghaee Moghaddam et al., 2014a, 2014b). نمونه‌های مورد استفاده شامل نمونه‌های استوانه‌ای برای آزمایش مدول برجهندگی و نمونه‌های تیر شکل برای آزمایش خستگی می‌باشد. نمونه‌های آسفالتی، براساس روش مارشال با ارتفاع تقریبی ٦۷ میلی‌متر و قطر ۱۰۱,٦ میلی‌متر در شرایط آزمایشگاهی، طبق استاندارد ASTM D1559 ساخته شدند. با استفاده از چکش مارشال، با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با در نظر گرفتن شرایط ترافیک سنگین، متراکم شدند. نمونه‌های آسفالتی به شکل تیرچه به طول ٦±۳۸۰ میلی‌متر، عرض ٦±٦۳ میلی‌متر و ارتفاع ٦±۵۰ میلی‌متر از برش دالهای آسفالتی طبق روش AASHTO-T321 ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور مطالعه تأثیر اندازه و مقدار PET بر مشخصات مهندسی مخلوطهای آسفالتی، PET در مقادیر ۲، ٤ و ٦ درصد بر اساس وزن قیر، در دو اندازه ریز (مانده روی الک ۵۰#) و درشت (مانده روی الک ١٦#) به نمونه‌های آسفالتی

اضافه شد و با نمونه شاهد مقایسه شدند. بر طبق تحقیقات قبلی، مقدار ٤٪ پلاستیک ضایعاتی مقدار ایده‌آل توصیه شده در آسفالت برای رسیدن به خصوصیات خوب از نظر مقاومت، پایداری، سختی، دوام و مقاومت به شیار شدگی است (Ahmad, 2007; Casey et al., 2008; Sara et al., 2017; Hınıslıoğlu and Ağar, 2004; Ameri and Nasri, 2017;). از طرف دیگر، مطالعاتی نیز ٦٪ پلاستیک ضایعاتی را برای افزایش عمر خستگی و مقاومت به ترک خوردگی پیشنهاد داده‌اند (Ben Zair et al., 2021; Khan et al., 2016; Yu et al., 2014). 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). 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 روش‌تر، ابتدا با قیر اختلاط شود، PET نمی‌تواند در مخلوط آسفالتی همگن شود (Modarres and Hamedi, 2014a). از طرف دیگر، روش‌تر نیازمند تجهیزات خاص می‌باشد که هزینه‌بر می‌باشد. اما، در روش خشک به سادگی می‌توان PET را به مخلوط اضافه کرد. 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 مخلوط 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).



شکل ۳. فلوچارت برنامه آزمایش‌ها

٤- شرح آزمایش‌های انجام شده

برای بررسی تأثیر مقدار و اندازه PET بر خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی، از آزمایش‌های مدول برجهندگی و آزمایش خستگی استفاده شده است. آزمایش‌های انجام شده به شرح زیر است.

٤-١- آزمایش مدول برجهندگی

در این تحقیق، آزمایش مدول برجهندگی مطابق استاندارد ASTM D4123 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتیمتر و ضخامت تقریبی ٤ سانتی متر در سه دمای ۵، ۲۵ و ٤۵ درجه سانتیگراد انجام گرفت. آزمایش با دستگاه UTM-10 انجام شد. نمونه‌ها ٤ ساعت قبل از شروع آزمایش در محفظه دستگاه قرار گرفته تا دمای آنها به طور یکنواخت به دمای آزمایش برسد. بارگذاری نمونه‌ها در جهت قطری به مقدار حدود ۱۵٪ مقاومت کششی آنها در ۵ سیکل با فرکانس ۱ هرتز (۰,۱ ثانیه بارگذاری و ۰,۹ ثانیه استراحت) اعمال شد. با استفاده از رابطه (۱) مقدار مدول برجهندگی در هر سیکل بارگذاری محاسبه و میانگین ۵ سیکل به عنوان مدول برجهندگی مورد استفاده قرار گرفت.

$$M_r = \frac{P(\nu + 0.2734)}{\delta t} \qquad (۱)$$

که در آن M_r مدول برجهندگی بر حسب مگاپاسکال، P بار وارده بر حسب نیوتن، t ضخامت نمونه بر حسب میلیمتر، δ تغییر شکل بازگشت پذیر نمونه در جهت ضخامت بر حسب میلی‌متر و ν نسبت پواسون مخلوط آسفالتی می‌باشد. نسبت پواسون در دماهای مختلف (T) با استفاده از رابطه (۲) تعیین گردید.

$$\nu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(3.1849 - 0.042T)}} \qquad (۲)$$

٤-۲- آزمایش خستگی

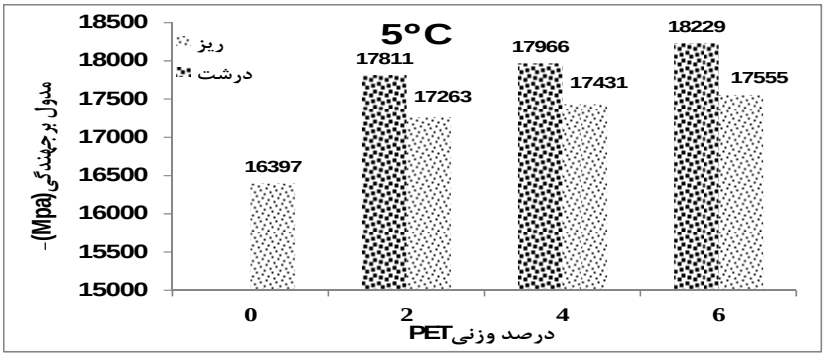
آزمایشات مختلفی برای بررسی رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی انجام می‌شود. یک روش قابل اعتماد برای یررسی خصوصیات خستگی نمونه‌های آسفالتی، آزمایش تیر خمشی چهار نقطه‌ای می‌باشد. در این تحقیق برای بررسی تاثیر مقدار و اندازه PET در رفتار خستگی مخلوط‌های آسفالتی از آزمایش خستگی به روش تیر خمشی چهار نقطه‌ای استفاده شد. براساس AASHTO T321 آزمایش خستگی به روش کرنش ثابت و در کرنش ۷۰۰ میکروکرنش، با بارگذاری نیم سینوسی و فرکانس ۱۰هرتز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای رسیدن نمونه‌ها به دمای آزمایش، قبل از شروع بارگذاری نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در محفظه دستگاه در دمای مورد نظر قرار داده شدند.

۵- نتایج

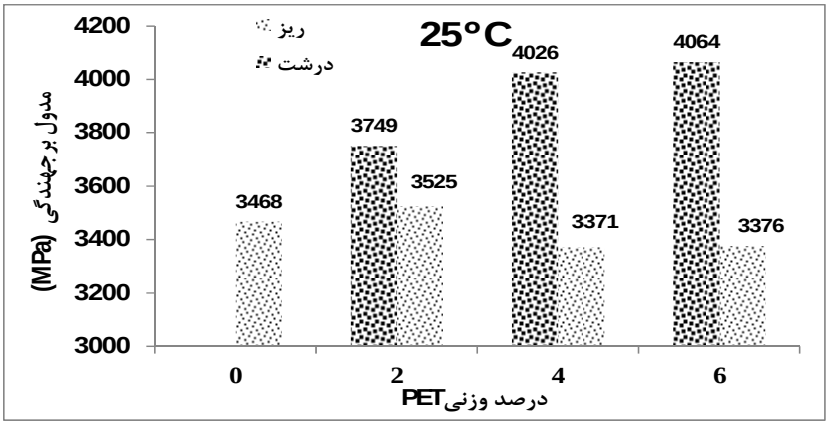
۵-۱- نتایج مدول برجهندگی

نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه‌های آسفالتی در شکل‌های ٤ تا ٦ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، افزودن PET با اندازه درشت باعث افزایش مدول برجهندگی نمونه‌ها شده است، و با افزایش مقدار PET مدول برجهندگی نیز افزایش می‌یابد. بیشترین مدول برجهندگی مربوط به نمونه حاوی ٦ درصد PET می‌باشد که در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد ۱۱,۱ درصد، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ۱۷,۱ درصد و در دمای ٤۰ درجه سانتی گراد ۱۰,٦ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. نمونه‌های حاوی ذرات ریز PET روند متفاوتی در دماهای مختلف از خود نشان داده‌اند. در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد بیشترین مدول برجهندگی مربوط به نمونه حاوی ٦ درصد PET به میزان ۷,۰٦ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته، در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد نمونه حاوی ۲ درصد PET به میزان ۱,٦٤ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته و در دمای ٤۰ درجه سانتی‌گراد نمونه حاوی ۲ درصد PET به میزان ۸,۳ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. اندرکنش بین قیر و مواد افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده می‌تواند بر عملکرد مخلوط آسفالتی تاثیر گذارد. مطالعات قبلی نشان می‌دهند که این اندرکنش با افزایش

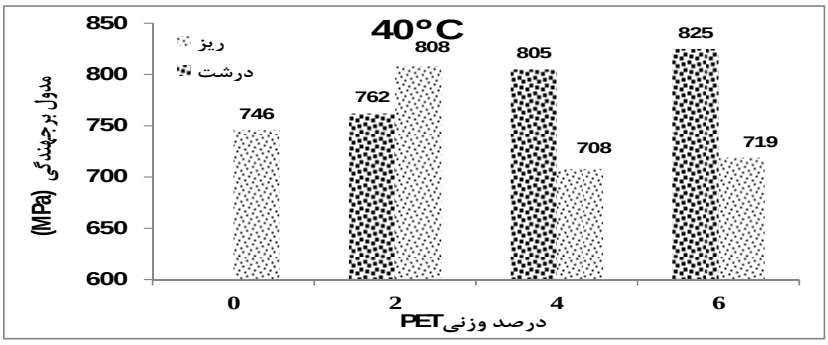
مقدار افزودنی تغییر می‌کند. در مقدارهای بالاتر پلیمر، فاز پلیمری غالب شده، در صورتی که در مقدار بهینه از افزودنی، اندرکنش بین قیر و ماده افزودنی باعث بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی می‌شود (Modarres and Hamedi, 2014a). در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد افزودن PET ریز موجب افزایش مدول برجهندگی شده و با افزایش مقدار PET مدول برجهندگی نیز افزایش یافت. اما در دماهای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه‌های حاوی ۲ درصد PET بیشترین مقدار مدول برجهندگی را دارند. در هر ۳ دما، بیشترین مقدار مدول برجهندگی مربوط به نمونه‌های حاوی ٦درصد PET درشت می‌باشد.



شکل ٤. نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه ریز و درشت در دمای ۵ درجه سانتی‌گراد

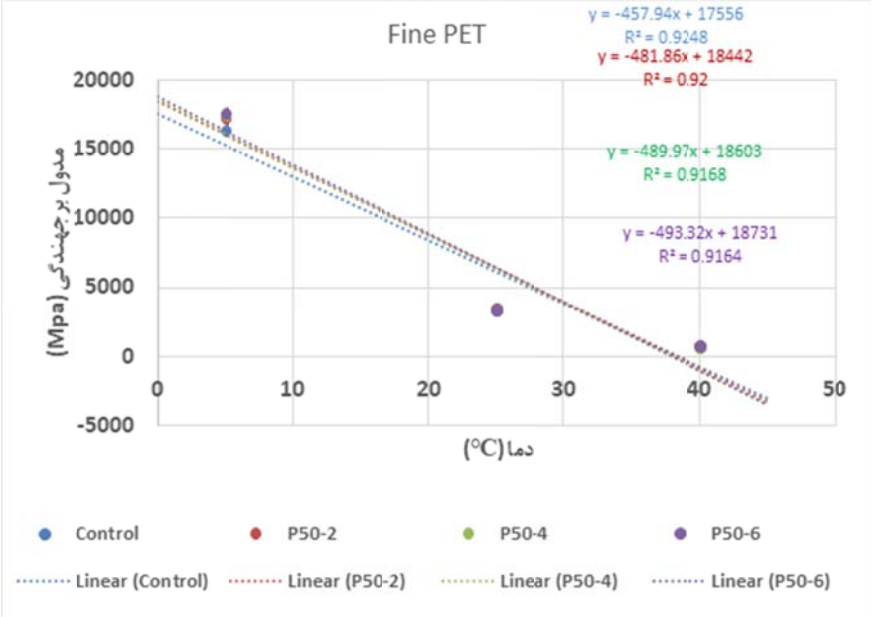


شکل ۵. نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه ریز و درشت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد

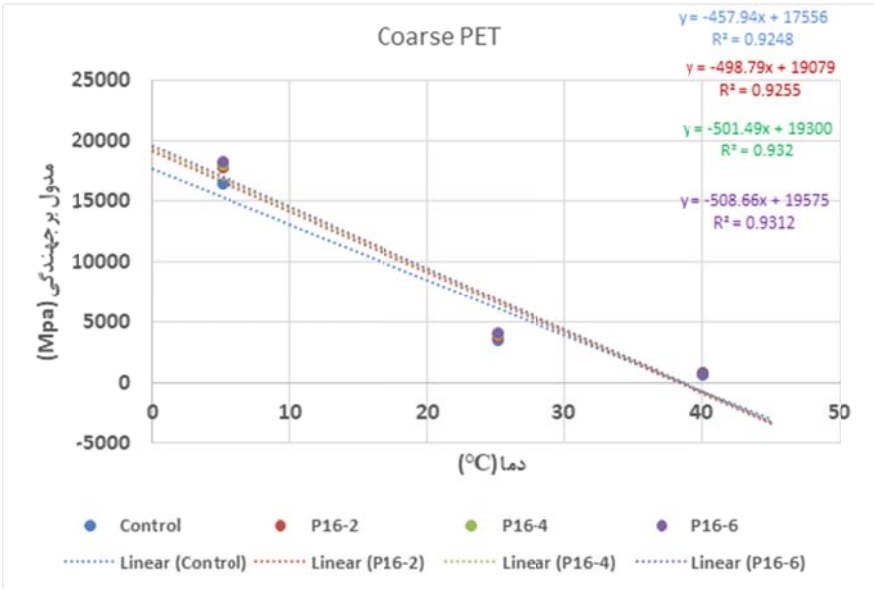


شکل ٦. نتایج آزمایش مدول برجهندگی برای نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه ریز و درشت در دمای ٤٠ درجه سانتی‌گراد

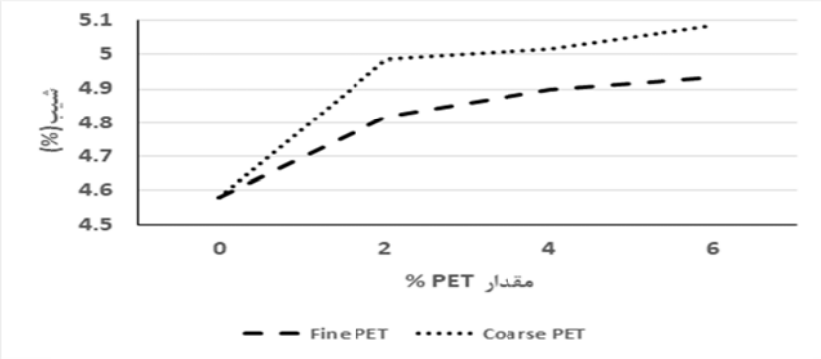
برای ارزیابی حساسیت دمایی مخلوطهای آزمایش شده، تغییرات مدول برجهندگی با افزایش دما بررسی شد. شکل‌های ۷ و ۸ تغییرات مدول برجهندگی نسبت به دما را برای دو اندازه ریز و درشت PET نشان می‌دهند. شیب این خطوط نشان‌دهنده حساسیت مخلوطهای آزمایش شده نسبت به دما می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش مقدار PET شیب افزایش یافته است و این روند برای هر دو اندازه PET مشابه می‌باشد. شکل شماره ۹ تغییرات شیب را برای درصدهای مختلف PET برای هر اندازه نشان می‌دهد، بطور کلی می‌توان گفت که مخلوطهای حاوی ذرات درشت PET حساسیت بیشتری نسبت به دما دارند.



شکل۷. رابطه بین مدول برجهندگی و دما برای نمونه‌های حاوی ذرات ریز PET



شکل ۸. رابطه بین مدول برجهندگی و دما برای نمونه‌های حاوی ذرات ریز PET



شکل ۹. شیب خط حاصل از برازش نتایج مدول برجهندگی در ۳ دما برای دو اندازه ریز و درشت PET

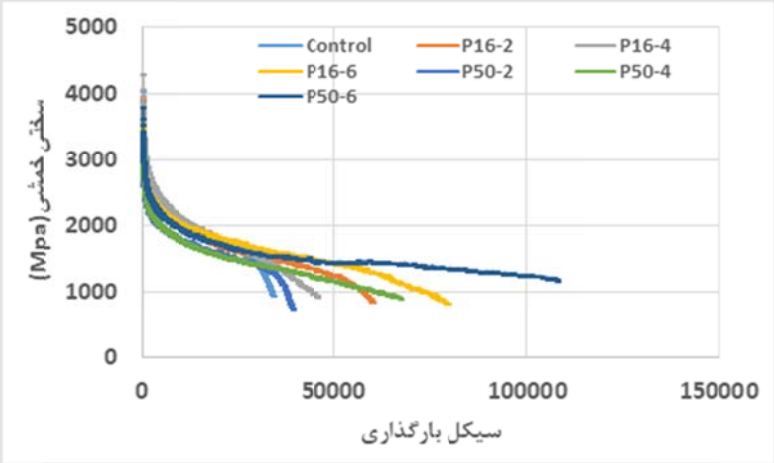
۵-۲- نتایج آزمایش خستگی

۵-۲-۱-نتایج سختی خمشی

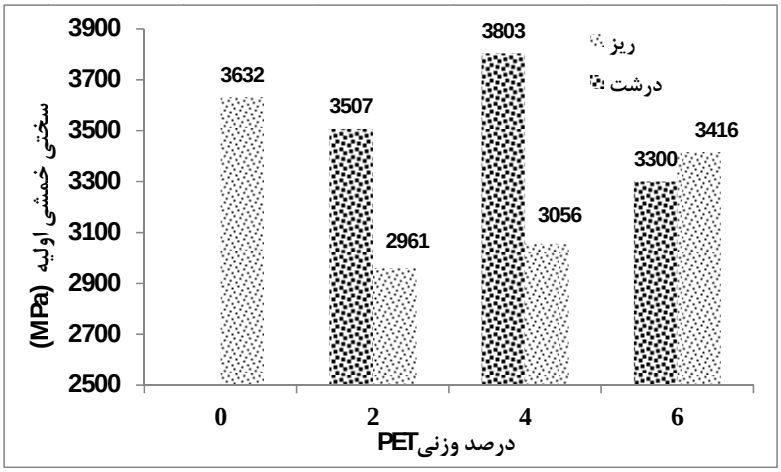
سختی خمشی یک مشخصه مهم برای عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌باشد. در آزمایش خستگی به روش تیر خمشی چهار نقطه‌ای سختی خمشی اولیه برابر با سختی خمشی در سیکل ۵۰ام بارگذاری می‌باشد. این مشخصه نشان دهنده مقاومت اصلی نمونه آسفالتی در برابر تغییر شکل خمشی می‌باشد (Rasouli et al., 2018). شکل ۱۰ نمودار سختی خمشی و شکل ۱۱ سختی خمشی اولیه مربوط به نمونه‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه ریز و درشت را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که، به صورت کلی، افزودن PET باعث کاهش سختی اولیه مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. با توجه به دمای ذوب بالای PET (حدودا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) و دمای اختلاط نمونه‌های آسفالتی (حدودا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد) می‌توان گفت که قسمت آمورف PET در مخلوط آسفالتی ذوب شده و به پیوستگی بین قیر و سنگدانه کمک می‌کند. قسمت کریستال PET همانند سنگدانه در مخلوط آسفالتی عمل می‌کند. با توجه به سختی کم آنها نسبت به مصالح سنگی، باعث کاهش سختی مخلوط آسفالتی در اثر بارگذاری می‌شود. با توجه به شکل ۱۱ روند تغییرات سختی خمشی اولیه نمونه‌های حاوی ذرات ریز و درشت PET با هم متفاوت می‌باشد. نمونه‌های حاوی ذرات ریز سختی کمتری نسبت به نمونه شاهد دارند و با افزایش مقدار PET سختی خمشی نیز افزایش یافته و از نمونه شاهد کمتر می‌باشد. اما، در نمونه‌های حاوی ذرات درشت PET، سختی خمشی اولیه ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته و بیشترین مقدار سختی خمشی مربوط به نمونه حاوی ٤ درصد PET می‌باشد. ذرات ریز PET سطح مخصوص بیشتری نسبت به ذرات درشت دارند و این امر موجب می‌شود که بیشتر به پیوستگی و چسبندگی قیر و سنگدانه کمک کنند و انعطاف پذیری مخلوط بیشتر شود.

۵-۲-۲- نتایج عمر خستگی

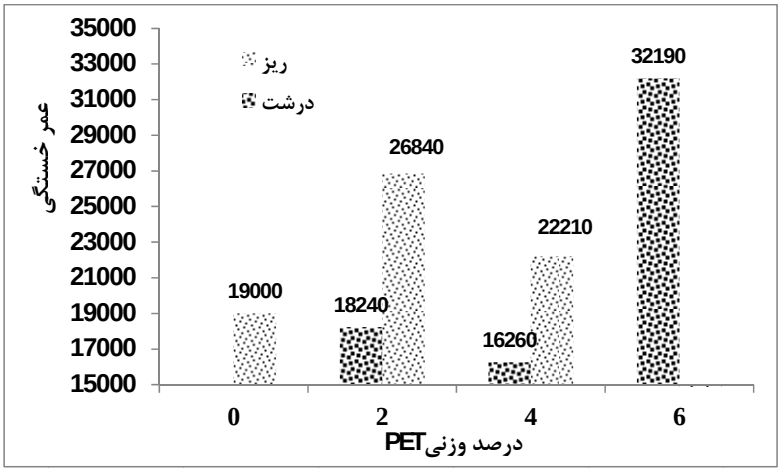
شکل ۱۲ نشان دهنده عمر خستگی نمونه‌ها براساس معیار کاهش سختی نمونه‌ها به میزان ۵۰ درصد سختی اولیه می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، مخلوط‌های حاوی ذرات ریز و درشت PET، روند متفاوتی در برابر بارگذاری از خود نشان داده‌اند. در نمونه‌های حاوی ذرات ریز، افزودن PET ابتدا موجب افزایش عمر خستگی شده و سپس با افزایش مقدار PET عمر خستگی کاهش می‌یابد. اما، در نمونه‌های حاوی ذرات درشت، افزودن PET تا مقدار ٤ درصد موجب کاهش عمر خستگی و پس از آن عمر خستگی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. طبق این روش بیشترین عمر خستگی برای نمونه‌های حاوی ذرات ریز با مقدار ۲ درصد و برای ذرات درشت PET مقدار ٦ درصد و همچنین بیشترین عمر خستگی مربوط به نمونه حاوی ٦ درصد PET درشت می‌باشد.



شکل ۱۰. نمودار سختی خمشی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه ریز و درشت



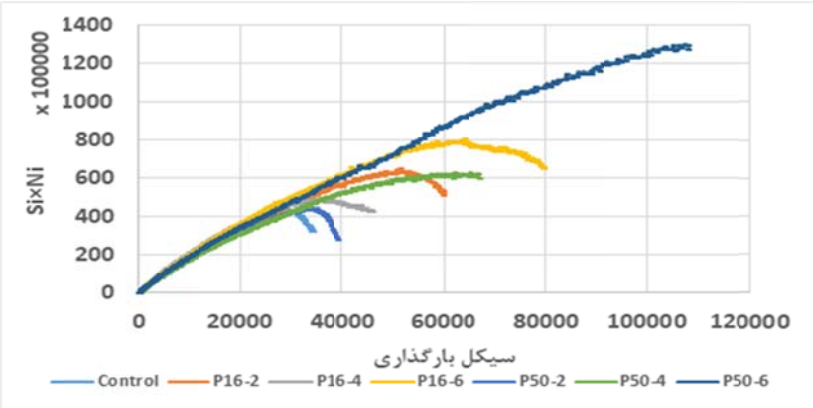
شکل ۱۱. نمودار سختی خمشی اولیه مربوط به نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه ریز و درشت



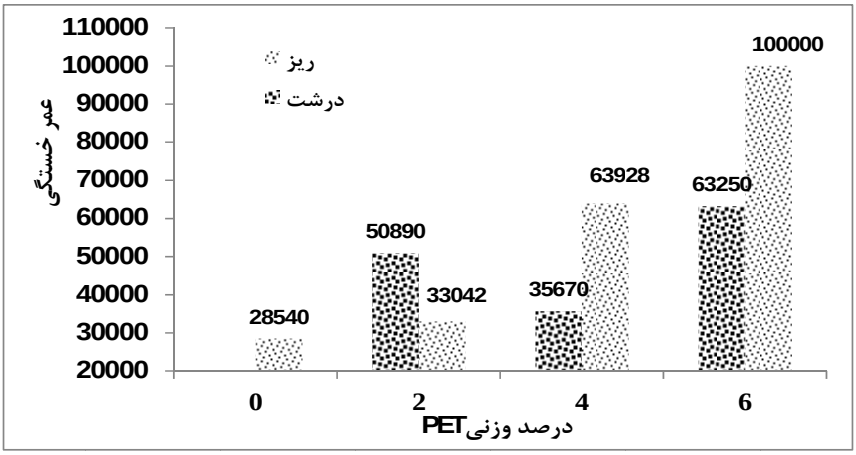
شکل ۱۲. عمر خستگی براساس کاهش سختی نمونه به میزان ۵۰درصد سختی اولیه

روش رو و بالدین برای محاسبه دقیق‌تر و نزدیک‌تر عمر خستگی نمونه‌ها می‌باشد. در این روش تعداد سیکل بارگذاری متناظر با بیشترین مقدار حاصل از $N_i \times S_i$ برابر با عمر خستگی نمونه می‌باشد (Rowe and Bouldin, 2000)، که در آن Ni شماره سیکل بارگذاری و S_i سختی خمشی در آن سیکل می باشد. شکل ۱۳ نتایج این روش را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌شود، با افزایش مقدار PET عمر خستگی نمونه‌ها افزایش یافته است. نمونه شاهد زودتر از همه به نقطه پیک خود رسیده و نمونه حاوی ٦ درصد PET (ریز و درشت) بیشترین عمر خستگی را دارند. شکل ١٤ تعداد سیکل متناظر با نقطه پیک نمودارهای شکل ۱۳ که نشان‌دهنده عمر خستگی نمونه‌ها می‌باشد را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، افزودن PET به مخلوط آسفالتی موجب افزایش عمر خستگی نمونه‌ها می‌شود و مشابه با تحقیقات گذشته، که PET را به مخلوط آسفالتی اضافه کرده‌اند، می‌باشد (Moddaress and Hamedi, 2014). ذرات PET به پیوستگی بین قیر و سنگدانه کمک کرده و باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی شده است. افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی سبب می‌شود تا مخلوط دیرتر ترک بخورد و همچنین باعث کاهش گسترش ترک‌ها می‌شود، که در نتیجه مقاومت مخلوط در برابر خستگی افزایش می‌یابد. تفاوت در روند نتایج حاصل از افزودن PET با دو اندازه ریز و درشت نیز در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود. افزودن PET با اندازه ریز موجب افزایش عمر خستگی نمونه‌ها شده و با افزایش مقدار PET عمر خستگی نمونه‌ها بیشترمی‌شود، به طوری که، عمر خستگی نمونه حاوی ۲ درصد PET به میزان ١٦ درصد، نمونه حاوی ٤ درصد PET به میزان ١٢٤ درصد و نمونه حاوی ٦ درصد PET به میزان ۲۵۰ درصد نسبت نمونه شاهد افزایش یافته است. در نمونه‌های حاوی ذرات درشت PET نیز، به طور کلی، عمر خستگی بیشتر شده است، به طوری که، عمر خستگی نمونه حاوی ۲ درصد PET به میزان ۷۸ درصد، نمونه حاوی ٤ درصد PET به میزان ۱۸ درصد و نمونه حاوی ٦ درصد PET به میزان ۱۲۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش یافته است. بیشترین عمر خستگی مربوط به نمونه حاوی ٦ درصد PET برای هر دو اندازه می‌باشد. از طرف دیگر، افزودن PET به میزان ٤ و ٦ درصد وزن قیر نشان می‌دهد که عمر خستگی نمونه‌های حاوی ذرات ریز PET بیشتر از نمونه‌های حاوی ذرات درشت PET می‌باشد، اما، در نمونه‌های حاوی ۲ درصد PET این روند عکس شده است. می‌توان گفت، زمانی که مقدار PET کم باشد، تاثیر اندازه ذرات این افزودنی کمتر شده و ذرات درشت PET تاثیر بیشتری بر عمر خستگی نمونه‌های آسفالتی دارند. عمر خستگی به عنوان نقطه‌ای که میکروترک‌ها تبدیل به ترک شده و رشد می‌کنند، می‌باشد. روش کاهش سختی خمشی اولیه به میزان ۵۰ درصد نمی‌تواند این نقطه را دقیق نشان دهد (Rowe and Bouldin, 2000). در این تحقیق نیز با مقایسه دو روش تخمین عمر خستگی، ملاحظه می‌شود که با توجه به دقت روش رو و بالدوین، نتایج حاصل از روش کاهش سختی به میزان ۵۰ درصد سختی اولیه دقت کافی را نداشته و نتایج این روش اختلاف زیادی با روش رو و بالدوین دارند.

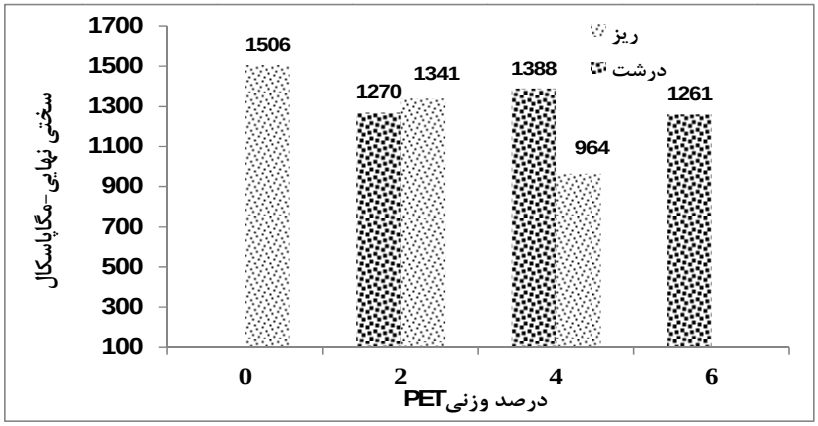
شکل ۱۵ سختی نهایی نمونه‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف PET را نشان می‌دهد. این مقادیر متناظر با سختی نمونه‌ها در لحظه به دست آوردن عمر خستگی طبق روش رو و بالدوین می‌باشد. سختی نهایی نمونه‌ها با افزایش مقدار PET کاهش یافته است. می‌توان گفت که با افزایش تعداد سیکل بارگذاری، افزودن PET موجب کاهش سختی نمونه شده و این عمل باعث افزایش انعطاف پذیری و در نتیجه افزایش عمر خستگی نمونه می‌شود. با توجه به شکل ۱۳ نمونه حاوی ٦ درصد PET ریز به نقطه پیک خود نرسیده و انتظار می‌رود که سختی نهایی آن کمتر نمونه‌های حاوی ۲ و ٤ درصد PET ریز باشد.



شکل ۱۳. عمر خستگی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه ریز و درشت طبق روش رو و بالدوین



شکل ۱۴. تعداد سیکل متناظر با عمر خستگی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET براساس روش رو و بالدوین



شکل ۱۵. سختی نهایی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف PET با دو اندازه ریز و درشت براساس روش رو و بالدوین

۵- نتیجه‌گیری

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

-نتایج آزمایش مدول برجهندگی نشان داد که نمونه‌های حاوی ذرات ریز و درشت رفتار متفاوتی دارند، به طوری که، برای نمونه‌های حاوی ذرات درشت بیشترین مقدار مدول برجهندگی مربوط به نمونه حاوی ٦ درصد PET در هر سه دما (۵، ۲۵ و ۴۰ درجه سانتیگراد) و برای نمونه‌های حاوی ذرات ریز بیشترین مقدار مدول برجهندگی مربوط به نمونه حاوی مقدار ٦ درصد PET در دمای ۵ درجه سانتی گراد و مقدار ۲درصد PET برای دماهای ۲۵ و ۴۰ درجه سانتی گراد بدست آمد.

-PET با افزایش انعطاف‌پذیری نمونه‌های آسفالتی باعث کاهش سختی نمونه‌ها شد.

-نتایج آزمایش خستگی نشان داد که با توجه به افزایش عمر خستگی نمونه‌ها در اثر افزایش PET، مقدار ٦درصد (وزن قیر) بیشترین عمر خستگی را برای هر دو اندازه ریز و درشت دارد. عمر خستگی نمونه‌های حاوی ذرات ریز PET از نمونه‌های حاوی ذرات درشت بیشتر است.

-با مقایسه نتایج حاصل از دو روش تعیین عمر خستگی نمونه‌های حاوی ذرات PET و با توجه به دقت روش رو و بالدین می‌توان نتیجه گرفت که روش کاهش سختی اولیه به میزان ۵۰ درصد، روش مناسبی برای تخمین عمر خستگی نمونه‌ها نمی‌باشد.

-با توجه به بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط آسفالتی در اثر افزودن PET و ضایعاتی بودن این ماده استفاده از این ماده در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند باعث افزایش عمر سرویس‌دهی مخلوط آسفالتی، کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری راه و کاهش اثرت مخرب این ماده بر محیط زیست شود.

٦- 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.

-Ahmad, L.A., (2007), "Improvement of Marshall Properties of the asphalt concrete mixtures using the polyethylene as additive", Engineering Technology, 25, pp. 383–394.

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

-Ameri, M., Mansourian, A., & Sheikhmotevali, A. H., (2013), "Laboratory evaluation of ethylene vinyl acetate modified bitumens 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. Nasri, D., (2017), "Performance properties of DE vulcanized waste PET modified asphalt mixtures" Petroleum Science and Technology, 35, pp.99–104.

-Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M., & Karim, M. R., (2014a), "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., (2014b), "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.

-Casey, D. McNally, C. Gibney, A. Gilchrist, M.D. (2008), "Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt" Resour. Conserv. Recycl, 52, pp.1167–1174.

-Container Recycling Institute, (2017), (http://www.container-recycling.org/index.php/pet-bottle-sales-and-wasting-in-the-us) accessed 20 July.

-Fatemi, S., & Imaninasab, R., (2016), "Performance evaluation of recycled asphalt mixtures by construction and demolition waste materials", Construction and Building Materials, 120, pp.450-456.

-dos Santos Ferreira, J. W., Marroquin, J. F. R., Felix, J. F., Farias, M. M., & Casagrande, M. D. T. (2022), “The feasibility of recycled micro polyethylene terephthalate (PET) replacing natural sand in hot-mix asphalt”, Construction and Building Materials, 330, 127276.
-Haider, S., & Hafeez, I., (2021), “A step toward smart city and green transportation: Eco-friendly waste PET management to enhance adhesion properties of asphalt mixture”, Construction and Building Materials, 304, 124702.
-Hınıslıo˘glu, S. A˘gar, E., (2004), "Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix", Mater. Lett. 2004, 58, pp. 267–271.
-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.
-Ghabchi, R., Dharmarathna, C. P., & Mihandoust, M., (2021), “Feasibility of using micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: A laboratory study”, Construction and Building Materials, 292, 123377.
-Giri, J. P., Panda, M., & Sahoo, U. C., (2018), “Use of waste polyethylene for modification of bituminous paving mixes containing recycled concrete aggregates”, Road Materials and Pavement Design, pp.1-21.
-Khan, I.M. Kabir, S. Alhussain, M.A. Almansoor, F.F., (2016), "Asphalt design using recycled plastic and crumb-rubber waste for sustainable pavement construction" Procedia Engineering, 145, pp.1557–1564.
-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.
-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.
-Lugeiyamu, L., Kunlin, M., Mensahn, E. S., & Faraz, A., (2021), “Utilization of waste polyethylene terephthalate (PET) as partial replacement of bitumen in stone mastic asphalt”, Construction and Building Materials, 309, 125176.
-Ma, J., & Hesp, S. A., (2022), “Effect of recycled polyethylene terephthalate (PET) fiber on the fracture resistance of asphalt mixtures”, Construction and Building Materials, 342, 127944.
-Mashaan, N., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H., (2021), “a Laboratory property of waste PET plastic-modified asphalt mixes”, recycling, 6(3), 49.
-Modarres, A., & Hamedi, 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., & Hamedi, 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.
-Rasouli, A., Kavussi, A., Qazizadeh, M. J., & Taghikhani, A. H., (2018), “Evaluating the effect of laboratory aging on fatigue behavior of asphalt mixtures containing hydrated lime”, Construction and Building Materials, 164, pp.655-662.
-Rowe, G. M., & Bouldin, M. G., (2000), “Improved techniques to evaluate the fatigue resistance of asphaltic mixtures”, In 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, Vol. 2000.
-Sara, F.; Silva, H.M.; Oliveira, J.R., (2017), "Mechanical, surface and environmental evaluation of stone mastic asphalt mixtures with advanced asphalt binders using waste materials”, Road Mater., Pavement Des. 20, pp.316–333.
-Taherkhani, H., & Arshadi, M. R., (2017), “Investigating the mechanical properties of asphalt concrete containing waste polyethylene terephthalate”, Road Materials and Pavement Design, pp.1-18.
-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.
-Yu, B. Jiao, L. Ni, F. Yang, J., (2014), "Evaluation of plastic-rubber asphalt: Engineering property and environmental concern", Construction and Building Materials, 71, pp.416–424.

Investigating the Resilient Modulus and Fatigue Behavior of Asphalt Concrete Containing Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Polymer

Hassan Therkhani, Assistant Professor, Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Mohammad Reza Arshadi, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Farshad Saravaki, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Mehrzad Mobedi, M.Sc., Grad., Civil Engineering Department, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

E-mail: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

Received: February 2023- Accepted: April 2023

ABSTRACT

In this study the effect of PET content and particle size on resilient modulus and fatigue property of asphalt concrete has been investigated. PET was added to the mixture at different contents of 0, 2, 4 and 6% (by the weight of binder) with two different sizes as fine and coarse particles. The mixtures were subjected to resilient modulus test at 3 different temperatures of 5, 25 and 40°C and strain controlled fatigue test at 20°C. It was found that the samples containing coarse particles have similar trend at different temperatures, in which, the resilient modulus increases with increasing PET content. Similarly, in the mixtures containing fine PET particles, at 5°, the resilient modulus increases with increasing PET content. However, at 25 and 40°C, the mixture containing 2% PET has the highest resilient modulus with values of 3.5 and 0.808MPa, respectively. The mixtures containing fine particles have higher fatigue life and lower flexural stiffness than the control mixtures. In the mixtures containing 4% of coarse particles the highest flexural stiffness and lowest fatigue life, with the values of 3803MPa and 16260, respectively is obtained. The highest fatigue life for both fine and coarse PET particles is obtained with 6% of PET content, which are 100000 and 63250, respectively. It is concluded that the resilient modulus of the mixtures containing coarse particles is higher than the mixtures containing fine PET particles, but, the mixtures containing fine PET particles have higher fatigue life than the mixtures containing coarse particles.

Keywords: Asphalt Concrete, PET, Resilient Modulus, Fatigue Life