

بررسی تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترافتالات (PET) در بتن آسفالتی بازیافتی

سعید زمانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، ایران
حسن طاهرخانی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، ایران

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

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲

دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۱۲

چکیده

این تحقیق با هدف بررسی خصوصیات بتن آسفالتی حاوی خرده آسفالت بازیافتی (RAP) و پلیمر ضایعاتی PET انجام شد. درصدهای مختلفی از PET به میزان ۰، ۳، ۶ و ۹ درصد بر اساس وزن قیر مخلوط کنترل در یک اندازه مشخص (۱/۱۸-۰/۴۲۵ میلی‌متر) به مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی افزوده شد و خصوصیات استقامت و روانی مارشال، خزش دینامیکی (جهت بررسی شیارشدگی)، مقاومت کششی غیرمستقیم، خستگی در تنش ثابت و آسیب رطوبتی مخلوط‌ها مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از RAP باعث بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی از جمله استقامت مارشال، مقاومت به شیارشدگی، مقاومت کششی غیرمستقیم و خستگی می‌شود. علاوه بر این، حساسیت رطوبتی مخلوط‌های حاوی RAP نسبت به مخلوط کنترل کمتر است و در مخلوط‌های حاوی مقادیر یکسان PET، استفاده از ۲۰ درصد RAP بیشترین مقدار TSR را نشان می‌دهد. همچنین، نتایج نشان داد که PET ضایعاتی باعث کاهش مقاومت مارشال و مقاومت به شیارشدگی و خستگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. علاوه بر این، بر اساس نتایج بدست آمده در مخلوط‌هایی با مقادیر یکسان RAP، استفاده از PET تا ۶ درصد وزن قیر باعث بهبود مقاومت کششی غیرمستقیم و مقاومت در برابر رطوبت مخلوط‌ها نسبت به مخلوط کنترل شده است. در نهایت، نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده همزمان RAP و PET باعث بهبود مشخصات مکانیکی مخلوط‌ها نسبت به مخلوط کنترل می‌شود و با افزایش مقدار RAP امکان استفاده از مقادیر بیشتر PET نیز فراهم می‌شود.

کلمات کلیدی: بتن آسفالتی، خرده آسفالت ضایعاتی (RAP)، PET ضایعاتی، خزش دینامیکی، آسیب رطوبتی

۱. مقدمه

مناسب هستند [Ameri et al., 2013; Modarres and Hamed, 2014b] و باعث افزایش سختی و مقاومت در برابر تغییر شکل در دماهای بالا می گردند. در چند سال گذشته مطالعات متعددی به کارگیری PET در انواع مخلوطهای آسفالتی را از جنبه های مختلف بررسی نموده اند. بقائیه مقدم و همکارانش با استفاده از درصدهای مختلف از PET در مخلوط آسفالتی ماستیک درشت دانه (SMA) نشان دادند که با افزایش مقدار PET، استقامت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی کاهش می یابند. همچنین نشان دادند که مخلوطهای حاوی PET رفتار متفاوتی در مقابل بارگذاری استاتیکی و دینامیکی از خود نشان می دهند، به طوری که تحت بارگذاری استاتیکی، با افزایش مقدار PET مقدار کرنش دائمی افزایش می یابد، اما تحت بارگذاری دینامیکی با افزایش مقدار PET مقدار کرنش دائمی کاهش می یابد [Baghaee Moghaddam et al., 2014]. احمدی نیا و همکارانش، با بررسی خصوصیات حجمی و مکانیکی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت دانه حاوی درصدهای مختلف از PET مشاهده کردند که اضافه کردن PET، به میزان ۶ درصد وزن قیر بیشترین مقاومت و نسبت مارشال را نتیجه می دهد [Ahmadinia et al., 2011]. در تحقیقی دیگر، احمدی نیا و همکارانش، آزمایشات رد چرخ، 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 می شود. نتایج آزمایش رد چرخ که نشان دهنده مقاومت در برابر شیار افتادگی است، نشان داد که عمق شیار برای مخلوط حاوی ۴ درصد PET از مابقی درصدها کمتر می باشد. این درصد از PET باعث کاهش عمق شیار تا ۲۹ درصد نسبت به مخلوط کنترلی گردید. همچنین

پلاستیک ها امروزه در حجم زیاد در مصارف خانگی، صنعتی و خدماتی به کار می روند. بخش قابل توجهی از مواد ضایعاتی جامد را پلاستیکها تشکیل می دهند، که دفع نامناسب آنها مشکلات زیادی را برای سلامتی انسان و سایر موجودات زنده به وجود می آورد. پلیمر پلی اتیلن ترفتالات (PET) یکی از اصلی ترین نوع پلاستیکهاست که حجم قابل توجهی از آن به طور روزانه به صورت ضایعات دور ریز می گردد. این نوع پلیمر در بطری های نوشیدنی ها و بسته بندی های مواد غذایی استفاده می گردد. 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, 2017]. باقیمانده این ضایعات سوزانده، دپو، دفن یا در طبیعت رها می گردند که مشکلات زیادی را برای محیط زیست ایجاد می کند. بنابراین، با توجه به مشکلات زیست محیطی پلاستیک های ضایعاتی استفاده مجدد از آنها به شکلی سازگار با محیط زیست ضروری به نظر می رسد. تجربیات گذشته نشان داده است که پلیمرهای ضایعاتی قابلیت استفاده در مخلوطهای آسفالتی را دارند [Baghaee Moghaddam et al., 2012; Arabani et al., 2010; Xu et al., 2016; Usman et al., 2019; Meraudje et al., 2020; Movilla-Quesada et al., 2019]. زمانی که مواد ضایعاتی پلیمری با سنگدانه های داغ مخلوط می شوند، یک لایه نازک اطراف سنگدانه تشکیل می دهند که باعث افزایش چسبندگی بین قیر و سنگدانه می شود. در این حالت مقاومت مخلوط افزایش و درصد قیر کاهش می یابد. پلاستیک های ضایعاتی می توانند پیوستگی بین سنگدانه ها را بهبود بخشند و باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی شوند [Lastra-Gonzalez et al., 2016]. پلیمرهای پلاستومر مانند PET برای دماهای سرویس دهی بالا،

بررسی تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن تراثالات (PET) در بتن آسفالتی بازیافتی

مخلوطهای آسفالتی مصالح بسیار حساسی بوده و تحت تاثیر بارگذاری ترافیک و عوامل محیطی انواع مختلفی از خرابی ها در آنها بروز می یابد. بسته به شدت، وسعت و نوع خرابی ها روشهای مختلفی برای بهسازی روسازی های آسفالتی مورد توجه قرار می گیرند. یکی از گزینه هایی که در شرایط خرابی های وسیع و شدید مورد استفاده قرار می گیرد لکه گیری های موضعی یا گسترده و اجرای روکش های تقویتی است. معمولاً در این موارد بخش هایی از لایه های آسفالتی که دارای شدت خرابی زیاد می باشند تراشیده شده و با مخلوط آسفالتی جدید جایگزین می گردند. حجم زیادی از مخلوطهای آسفالتی تراشیده شده در سال ایجاد می گردد که در صورت عدم مدیریت صحیح در استفاده از آنها آلودگی های زیست محیطی را ایجاد می نمایند. به منظور استفاده مجدد از این مصالح ضایعاتی کاربردهای مختلفی مورد توجه قرار گرفته اند. از جمله این کاربردها، استفاده در اجرای لایه های تثبیت شده و تثبیت نشده در روسازی، استفاده در بتن سیمانی و ساخت مخلوطهای آسفالتی سرد و گرم می باشد. استفاده از آسفالت های ضایعاتی در ساخت مخلوطهای آسفالتی جدید دارای منافع اقتصادی و زیست محیطی می باشد. کاهش بهره برداری از منابع طبیعی و انرژی مصرف شده در تولید و حمل مصالح بکر از جمله منافع زیست محیطی بوده و کاهش هزینه های تهیه و تولید مصالح جدید شامل قیر و مصالح سنگی از منافع اقتصادی آن می باشد. با این وجود، به دلیل وجود قیر پیر شده در آسفالت ضایعاتی که ویژگی های اولیه خود را تا حدود زیادی از دست داده باعث می گردد که در مخلوطهای آسفالتی بازیافتی حاوی درصد بالایی از آسفالت ضایعاتی نگرانی از نظر مقاومت به ترک خوردگی و دوام وجود داشته باشد. پیرشدگی قیر موجود در آسفالت ضایعاتی باعث افزایش سختی و ویسکوزیته شده و آن را مستعد ترک خوردگی می کند [Veeraragavan, 2016; Dhasmana et al., 2019].

به همین دلیل، حداکثر مقدار خرده آسفالت ضایعاتی در ساخت

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 درشت دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۰ درصد وزن مصالح سنگی با حداکثر اندازه ذرات ۲/۳۶ میلی متر پرداختند و دریافتند که سختی ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. به طوری که کمترین سختی مربوط به بیشترین مقدار PET، یعنی ۱/۰ درصد وزن قیر می باشد. همچنین خصوصیات خستگی مخلوطهای حاوی PET بطور قابل ملاحظه ای نسبت به مخلوطهای کنترل ی بهبود یافت [Baghaee Moghaddam et al., 2012]. در مطالعه ای دیگر، بقائیه مقدم و همکارانش، آزمایش خزش دینامیکی را بر روی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۰ درصد وزن مصالح سنگی انجام دادند و دریافتند که خصوصیات تغییر شکل دائمی مخلوطهای آسفالتی حاوی PET بطور قابل ملاحظه ای بهبود یافت. به طوری که کرنش دائمی مخلوطهای حاوی PET در تمامی تنش ها و دماها از نمونه ای 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 ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر پرداختند و همچنین آزمایشات ITS و مدول برجهنگی را در دو دمای ۵ و ۲۰ درجه سانتی گراد انجام دادند. آنها نشان دادند که اضافه کردن PET باعث بهبود خصوصیات خستگی مخلوطهای آسفالتی می شود و مقادیر مدول برجهنگی برای مخلوطهای حاوی PET در محدوده مجاز می باشد 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].

سنگی بکر مورد استفاده در ساخت مخلوط‌های آسفالتی بازیافتی از جنس آهکی دولومیتی می‌باشد که از شرکت نگین گستران راه زندیگان در شهر زنجان تهیه شد. مشخصات فنی مصالح سنگی ریزدانه و درشت دانه در جدول ۲ ارائه شده‌اند. درصد جذب آب مصالح درشت دانه و ریزدانه به ترتیب ۰٫۸ و ۱٫۲٪ تعیین گردیدند. همچنین، چگالی واقعی درشت دانه، ریزدانه و فیلر نیز به ترتیب، ۲٫۶۵، ۲٫۶۵ و ۲٫۸۶ گرم بر سانتی متر مکعب تعیین گردیدند.

مصالح خرده آسفالت استفاده شده در این تحقیق از دپوی مصالح خرده آسفالت واقع در راهداری زنجان تهیه شد. در ابتدا برای انجام برخی آزمایش‌ها شامل جداسازی قیر از سنگدانه و تعیین درصد قیر پیرشده موجود در RAP و دانه‌بندی مصالح سنگی آن، از کل مصالح RAP موجود نمونه برداری به عمل آمد. سپس درصد قیر مصالح RAP با استفاده از روش تجزیه آسفالت به وسیله سانتریفوژ مطابق با استاندارد ASTM-D2172 در آزمایشگاه بدست آمد. در این آزمایش از بنزین به عنوان حلال استفاده شد. پس از جداسازی قیر از مصالح سنگی، درصد قیر RAP و دانه‌بندی مصالح سنگی RAP (مصالح بازیابی شده) در آزمایشگاه تعیین گردید. درصد قیر RAP ۴/۶۳٪ بدست آمد. دانه‌بندی مصالح سنگی RAP (مصالح بازیابی شده) نیز در شکل ۱ ارائه شده است. چگالی واقعی مصالح سنگی در RAP نیز ۲/۶۵۵ به دست آمد.

در این تحقیق PET مورد نیاز از بطری‌های نوشیدنی ضایعاتی بدست آمد. بدین منظور ابتدا بطری‌های موردنظر شسته شدند تا از خاک و دیگر آلاینده‌ها تمیز شوند. سپس توسط دستگاه آسیاب خرد شدند و با الک کردن دانه‌بندی موردنظر بدست آمد (شکل ۲). PET به کار رفته دارای اندازه ای بین ۱/۱۸ و ۰/۴۲۵ میلیمتر بوده، چگالی ۱/۳۵ گرم بر سانتیمتر مکعب، جذب آب ۰/۱٪ و دمای ذوب ۲۵۰ درجه سانتیگراد می‌باشد.

مخلوط‌های آسفالتی جدید به مقدار مشخصی محدود می‌گردد، که معمولاً ۱۰ تا ۲۵٪ وزن مصالح سنگی می‌باشد [Zargar et al., 2012]. در صورت استفاده از مقادیر بالاتر، به منظور جبران نواقص ایجاد شده باید راهکار مناسبی را اندیشید، که از جمله آنها استفاده از قیر جدید نرم تر و یا استفاده از انواع جوانسازها می‌باشد. استفاده از جوانسازها باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی قیر پیرشده می‌گردد [Dhasmana et al., 2019]. جوانساز باعث می‌شود خواص قیر پیرشده به خواص اولیه آن بازگردد [Dedene and You, 2014]. با توجه به افزایش سطح تقاضا برای جوان کنندگان در سال‌های اخیر، مسئله هزینه تهیه این مواد موضوع نگرانی شده است. از این رو، استفاده از مواد ضایعاتی به عنوان جوان کننده علاوه بر کمک به حفظ محیط زیست باعث اقتصادی‌تر شدن بازیافت می‌گردد. یکی از این گزینه‌ها روغن موتور ضایعاتی می‌باشد.

بررسی ادبیات فنی و منابع موجود نشان می‌دهد که استفاده از پلیمر ضایعاتی PET و تاثیر آن بر خصوصیات بتن آسفالتی بازیافتی حاوی ضایعات آسفالتی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین، در این تحقیق هدف اصلی بررسی تاثیر درصدهای مختلفی از افزودن PET بر بتن آسفالتی بازیافتی حاوی درصدهای مختلف RAP بوده است. به نظر می‌رسد، بتوان بخشی از مشکلات مربوط به استفاده از ضایعات آسفالتی را بتوان با افزودن پلیمر ضایعاتی جبران نمود.

۲. مواد و مصالح

مواد مورد استفاده در این تحقیق شامل قیر، مصالح سنگی بکر، خرده آسفالت ضایعاتی و پلیمر ضایعاتی PET می‌باشند. قیر بکر مورد استفاده در این تحقیق قیر درجه نفوذی ۸۵-۱۰۰ تولید شده در پالایشگاه نفت پاسارگاد اراک می‌باشد. جدول ۱ برخی از مشخصات قیر مورد استفاده را نشان می‌دهد. مصالح

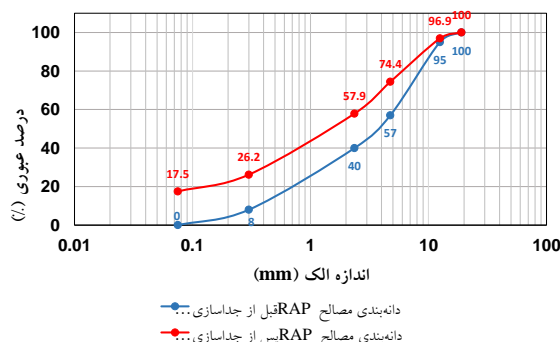
بررسی تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترفثالات (PET) در بتن آسفالتی بازیافتی

جدول ۱. مشخصات قیر مصرفی در تحقیق

مشخصه	استاندارد	حدود آیین نامه	نتایج
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی گراد، برحسب ۰/۱ میلی متر	ASTM-D5	۸۵-۱۰۰	۹۵
نقطه نرمی قیر، برحسب درجه سانتی گراد	ASTM-D36	۴۵-۵۲	۴۶
قابلیت کشش در ۲۵ درجه سانتی گراد، برحسب سانتی متر	ASTM-D113	حداقل ۱۰۰	+۱۰۰
درجه اشتعال، برحسب درجه سانتی گراد	ASTM-D92	حداقل ۲۳۲	۲۷۰
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی گراد، برحسب gr/cm^3	ASTM-D70	-	۱/۰۱۴۳

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی بکر

مشخصه	روش آزمایش	محدودیت آیین نامه	نتایج آزمایش
			درشت دانه / ریزدانه
ارزش ماسه‌ای	AASHTO-T176		- / ۷۸
درصد افت وزنی در مقابل سایش به روش لوس آنجلس	AASHTO-T96	حداکثر ۲۵٪	۲۷ / -
درصد شکستگی مصالح سنگی روی الک شماره ۴	ASTM-D5821	حداقل ۹۵٪	در یک جبهه ۱۰۰٪ / در دو جبهه ۹۸٪
درصد سیلیس مصالح سنگی (SiO_2)	-	-	۲۰
ضریب نرمی ماسه	AASHTO-M6	-	۳
درصد زاویه داری ریز دانه (FAA)	ASTM-D1252	حداقل ۴۵٪	۴۵,۲
درصد تورق	BS-812	حداکثر ۲۵٪	۲۰
درصد جذب آب			
درصد افت وزنی در مقابل سولفات سدیم	AASHTO-T104	حداکثر ۸٪ برای درشت دانه و ۱۲٪ برای ریزدانه	۱/۳ / ۰/۷
درصد اندود به قیر مصالح سنگی	ASTM-D1664		بیش از ۹۵ درصد



شکل ۱. دانه بندی مصالح خرده آسفالت بازیافتی

نمونه‌های بدون PET در نظر گرفته شد. بنابراین، با تعیین درصد قیر بهینه مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد RAP، درصد قیر بهینه مخلوط‌های حاوی PET نیز مشخص گردید. برای تهیه طرح اختلاط هر یک از مخلوط‌های آسفالتی به روش مارشال، ۶ سری ۳ تایی نمونه با درصدهای مختلف قیر (۴، ۵، ۵/۵، ۶، ۶/۵ درصد نسبت به وزن کل مخلوط) تهیه شد. وزن مخصوص نمونه‌های آسفالتی متراکم بر اساس استاندارد AASHTO-T166 و مقدار استحکام و روانی نمونه‌ها با استناد به روش استاندارد AASHTO-T245 تعیین شد. حداکثر وزن مخصوص تئوری مخلوط‌های آسفالتی نیز مطابق استاندارد ASTM-D2041 محاسبه شد. سپس درصد فضای خالی مخلوط‌های آسفالتی متراکم (V_a)، درصد فضای خالی سنگدانه‌ها (VMA) و درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر (VFA) بدست آمد و منحنی تغییرات کمیت‌های فوق با درصدهای مختلف قیر ترسیم شد و با استفاده از منحنی‌های ترسیم شده ابتدا درصد قیر بهینه به ازای ۴ درصد فضای خالی انتخاب گردید و سایر پارامترها به ازای این درصد قیر کنترل شدند تا در محدوده مجاز مشخصات فیزیکی و مقاومتی مخلوط‌های آسفالتی به روش مارشال باشند. بر اساس مشخصات فنی در نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور برای ترافیک سنگین (۷۵ ضربه) باید حداقل مقاومت ۸۰۰ کیلوگرم، روانی ۳/۵-۲ میلی‌متر، مقدار فضای خالی ۵-۳ درصد، حداقل فضای خالی سنگدانه‌ها ۱۳ درصد و فضای خالی پر شده با قیر ۷۵-۶۰ درصد باشد. مقدار قیر بهینه مخلوط کنترل، حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ RAP، به ترتیب، ۴/۲۵، ۴/۴، ۴/۶ و ۴/۷۵٪ تعیین گردید. برای ساخت مخلوط کنترل، سنگدانه‌های جدید به مدت ۱۲ ساعت در دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد در گرمخانه گرم شدند و قیر تا دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد گرم شد. سپس، مقدار مورد نیاز قیر بکر به سنگدانه‌های جدید اضافه شد و اختلاط انجام گرفت. برای مخلوط‌های بازیافتی، مصالح RAP به مدت



شکل ۲. PET به کار رفته در تحقیق

۳. برنامه آزمایش‌ها، طرح اختلاط و ساخت

نمونه‌های آزمایشگاهی

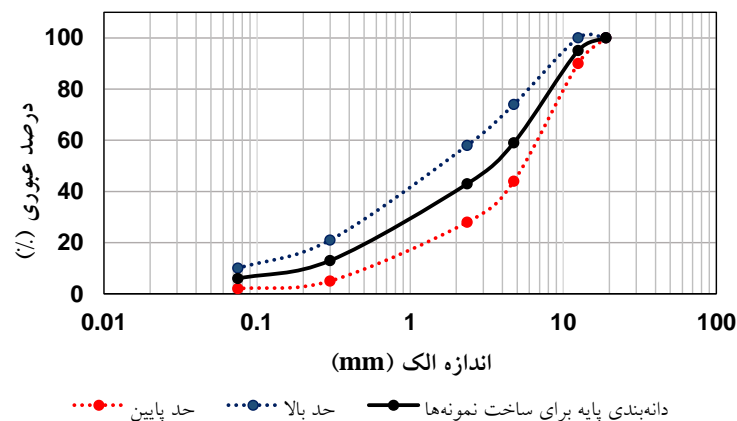
در این تحقیق، به منظور بررسی عملکرد بتن آسفالتی حاوی RAP و PET، ۱۶ نوع مخلوط با مقادیر مختلف RAP (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد برحسب وزن سنگدانه) و مقادیر مختلف PET (۰، ۳، ۶ و ۹ درصد برحسب وزن قیر بهینه مخلوط کنترل) ساخته شد که نامگذاری آنها به صورت RX-PY انجام گرفته که R نشان دهنده RAP و X نشان دهنده درصد آن در مخلوط، P نشان دهنده PET و Y نشان دهنده درصد آن در مخلوط می باشد. به عنوان مثال، مخلوط حاوی ۱۰ درصد RAP و ۳ درصد PET ضایعاتی به صورت R10-P3 نام‌گذاری می‌شود.

طرح اختلاط مخلوط‌ها به روش مارشال و مطابق با استاندارد ASTM-D1559 برای تعیین قیر بهینه انجام شد. دانه بندی مصالح سنگی مطابق دانه بندی شماره ۴ نشریه ۲۳۴ با حداکثر اندازه ۱۹ میلیمتر در نظر گرفته شد. شکل ۳ دانه بندی آیین نامه و مخلوط‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. مخلوط‌های دارای PET، به دلیل نداشتن خاصیت جذب قیر ذرات PET دارای مقدار قیر بهینه مشابه با نمونه بدون PET هستند [Baghaee Moghaddam et al., 2014; Taherkhani and Arshadi, 2017]. همچنین، در این تحقیق به منظور سهولت در مقایسه مخلوط‌ها و حذف تأثیر مقدار قیر در مخلوط‌های حاوی PET، مقدار قیر بهینه مشابه با

بررسی تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن تراثالات (PET) در بتن آسفالتی بازیافتی

PET و سنگدانه‌ها به طور کامل به قیر آغشته شدند (Ahmadinia et al., 2011, Ahmadinia et al., 2012). محققین پیشین دریافتند که با این روش ذرات PET به طور یکنواخت و همگن در مخلوط پخش می گردند. در نهایت مخلوط‌ها درون قالب مارشال ریخته شدند و برای انجام تراکم زیر چکش مارشال قرار گرفتند. نمونه‌ها با استفاده از چکش مارشال اتوماتیک با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با در نظر گرفتن شرایط ترافیک سنگین، متراکم شدند. سپس نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و بر روی آن‌ها آزمایش‌های مورد نظر انجام گرفت.

۱/۵ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شدند [Taherkhani and Noorian, 2019]. سپس RAP و مصالح سنگی جدید با هم ترکیب شدند و قیر بکر گرم شده با در نظر گرفتن مقدار قیر موجود در RAP به منظور رسیدن به مقدار قیر بهینه به مخلوط‌ها اضافه شد. در این تحقیق برای ساخت مخلوط‌های حاوی PET، بر اساس تحقیقات گذشته [Ahmadinia et al., 2011; Taherkhani and Arshadi, 2017]. ابتدا قیر و سنگدانه (یا ترکیب RAP و سنگدانه بکر) با هم مخلوط شدند، به طوری که سطح سنگدانه‌ها به طور کامل با قیر آغشته شود. سپس ذرات PET اضافه گردید و به مدت ۲ دقیقه عمل اختلاط ادامه یافت تا



شکل ۳. دانه بندی مخلوط‌های مورد استفاده در تحقیق

$$V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$VMA = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} P_s \right) \times 100 \quad (2)$$

$$VFA = \left(1 - \frac{V_a}{VMA} \right) \times 100 \quad (3)$$

که در آن P_s درصد سنگدانه در مخلوط (براساس وزن کل مخلوط) است و G_{sb} چگالی واقعی مصالح سنگی می باشد. آزمایش مارشال بر روی نمونه های ساخته شده از مخلوطها به منظور تعیین استقامت مارشال، نرمی و نسبت مارشال آنها انجام گردید.

۴-۲ آزمایش مارشال

۴. آزمایش‌های انجام گرفته بر روی مخلوط‌ها

۴-۱ تعیین خصوصیات حجمی

وزن مخصوص مخلوط‌های متراکم شده مطابق با روش استاندارد ASTM-D2726 اندازه‌گیری شدند. همچنین، وزن مخصوص حداکثر تئوری مخلوط‌ها مطابق با روش استاندارد ASTM-D2041 اندازه‌گیری شدند. با استفاده از وزن مخصوص واقعی (G_{mb}) و حداکثر نظری (G_{mm})، مقدار فضای خالی مخلوط‌ها (V_a)، درصد فضای خالی سنگدانه‌ها (VMA) و درصد فضای خالی پر شده با قیر (VFA) با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ تعیین شدند:

دمای ۱۸- درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۱۶ ساعت، نگهداری شدند. بعد از آن نمونه‌ها در حمام مارشال در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شدند. در مرحله آخر عمل‌آوری و قبل از آزمایش، نمونه‌ها در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت قرار داده شدند. نمونه‌های عمل‌آوری شده و نمونه‌های خشک تحت آزمایش کشش غیرمستقیم قرار گرفتند. نسبت مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده به مقاومت کششی نمونه‌های خشک، معرف TSR بوده و مطابق معادله (۵) محاسبه گردید.

$$TSR = 100 \left(\frac{ITS_w}{ITS_d} \right) \quad (5)$$

که در آن، TSR: نسبت مقاومت کششی، ITS_w : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های عمل‌آوری شده (kPa)، ITS_d : میانگین مقاومت کششی نمونه‌های تحت شرایط خشک (kPa).

۴-۴ آزمایش خزش دینامیکی

آزمایش خزش دینامیکی با استفاده از دستگاه UTM-10 ساخت شرکت اینفرانتست آلمان مطابق با روش استاندارد EN 12697-25 (2005) بر روی نمونه‌های مارشال با قطر ۱۰۱ میلی‌متر و ضخامت ۶۵ میلی‌متر انجام شد. برای انجام آزمایش، نمونه قبل از بارگذاری، درون محفظه کنترل‌کننده دما به مدت ۳ ساعت قرار داده شد تا به دمای مورد نظر برسد [Khodaii et al., 2009; Taherkhani and Arshadi, 2017].

آزمایش در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد با سطح تنش ۳۰۰ کیلوپاسکال با زمان بارگذاری و باربرداری 0.05 ± 0.05 ثانیه و فرکانس ۱ هرتز و تعداد ۱۰۰۰۰ سیکل انجام شد و تا اتمام آزمایش دما ثابت نگه داشته شد. قبل از شروع آزمایش خزش دینامیکی، یک بار استاتیکی به اندازه ۱۰ درصد تنش دینامیکی (30Kpa) به مدت ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. سپس بارگذاری دینامیکی تا رسیدن به ۱۰۰۰۰ بار یا تغییر شکل به میزان ۴ میلی‌متر (هر کدام زودتر اتفاق بیفتد) اعمال شد.

۴-۵ آزمایش خستگی

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال چهاردهم / شماره اول (۵۴) / پاییز ۱۴۰۱

آزمایش مارشال مطابق استاندارد ASTM-D1559 انجام شد. حداکثر بار تحمل شده تا لحظه شکست نمونه به عنوان استقامت مارشال و میزان تغییر شکل قطری در لحظه شکست به عنوان نرمی مخلوط اندازه‌گیری گردید. از تقسیم استقامت مارشال به نرمی نسبت مارشال مخلوطها تعیین گردید که نشان دهنده مقاومت مخلوط آسفالتی در مقابل تغییر شکل می‌باشد [Ameri et al., 2013].

۴-۳ آزمایش مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم بر روی مخلوطها مطابق استاندارد ASTM-D6931 به منظور تعیین مقاومت در برابر ترک خوردگی مخلوطها انجام گرفت. در این آزمایش که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت نمونه‌های استوانه‌ای مارشال در جهت قطری تحت بار با نرخ بارگذاری ثابت قرار گرفته و در زمان شکست نمونه مقدار بار عمودی (P) اندازه‌گیری گردید و از رابطه ۴ مقدار مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه گردید.

$$ITS = \frac{2000P}{\pi Dt} \quad (4)$$

که در آن، ITS، مقاومت کششی غیر مستقیم (کیلو پاسکال)، P حداکثر بار اعمالی (نیوتن)، t ارتفاع نمونه (میلی‌متر) و D قطر نمونه (میلی‌متر) می‌باشد.

در این تحقیق برای بررسی حساسیت رطوبتی مخلوطها، از روش لاتمن اصلاح شده مطابق استاندارد (-AASHTO T283) استفاده گردید. برای انجام آزمایش برای هر نوع مخلوط ۶ نمونه به قطر ۱۰۱ میلی‌متر و ضخامت تقریبی 1 ± 7 میلی‌متر و با درصد فضای خالی 0.07 ± 0.07 ساخته شدند. نمونه‌ها به دو گروه خشک و تر تقسیم‌بندی شدند. گروه خشک قبل از انجام آزمایش، در کیسه پلاستیکی قرار داده شدند و به مدت ۲ ساعت در حمام آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. گروه دیگر از نمونه‌ها ابتدا توسط دستگاه خلأ، بین ۷۰ تا ۸۰ درصد، اشباع شدند، پس از اشباع‌سازی، نمونه‌ها در کیسه پلاستیکی محتوی ۱۰ میلی‌لیتر آب، قرار داده شدند. سپس، در فریزر در

نتایج تحقیق نشان می‌دهد با افزایش مقدار PET، وزن مخصوص کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه PET وزن مخصوص بسیار کمتری نسبت به مصالح سنگی دارد، افزودن آن به مخلوطها باعث کاهش وزن مخصوص آنها می‌شود [Choudhary et al., 2018]. مطالعات قبلی نیز نشان داده اند که با افزایش مقدار PET، وزن مخصوص مخلوطها کاهش می‌یابد [Ahmadinia et al., 2011]. این روند برای مخلوطهایی با مقادیر RAP یکسان نیز با افزایش درصد PET بدست آمده است.

شکل ۵ درصد فضای خالی در مخلوطهای متراکم (V_a) حاوی مقادیر مختلف RAP و PET را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش درصد PET، فضای خالی مخلوطها افزایش می‌یابد. این نتیجه در تحقیق دیگری نیز حاصل شده است [Choudhary et al., 2018]. افزودن ذرات PET باعث ایجاد فضای خالی بیشتر در داخل مخلوطها می‌شود و همچنین مقداری از قیر مخلوط را به خود جذب می‌کنند. لذا برای پرکردن فضای خالی بین ذرات PET و جبران مقدار قیر جذب شده توسط آنها به مقدار قیر بیشتری نیاز می‌باشد و چون در این تحقیق مقدار قیر بهینه برای مخلوطهای حاوی PET مشابه مخلوطهای بدون PET در نظر گرفته شده است، فضای خالی مخلوطها افزایش یافته است. این روند برای مخلوطهایی با مقادیر RAP یکسان نیز با افزایش درصد PET بدست آمده است. همچنین به نظر می‌رسد در مخلوط-های حاوی RAP، نرخ افزایش فضای خالی در اثر افزودن PET، اندکی کاهش یافته است. این روند را می‌توان اینگونه توجیه کرد که با توجه به اینکه با افزایش RAP درصد قیر بهینه افزایش می‌یابد، لذا تأثیر PET بر روی افزایش فضای خالی مخلوط اندکی کاهش پیدا می‌کند.

درصد فضای خالی مصالح سنگی (VMA) مخلوطهای آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET در شکل ۶ نشان داده شده اند. همانگونه که مشاهده می‌گردد، با افزایش RAP

در این تحقیق نیز، مقاومت به ترک خوردگی خستگی مخلوط-ها با استفاده از آزمایش کششی غیرمستقیم دینامیکی در حالت تنش ثابت و با استفاده از دستگاه UTM-10 شرکت اینفراتست آلمان، ارزیابی شدند. مطابق با توصیه محققان، محدوده بارگذاری در آزمایش خستگی کشش غیرمستقیم بین ۱۰ تا ۵۰ درصد حداکثر نیروی بدست آمده از آزمایش کشش غیرمستقیم استاتیکی در نظر گرفته می‌شود (Kennedy et al., 1983). تنش اعمال شده 70 kPa ، شکل بارگذاری به صورت مربعی با $0/5$ ثانیه بارگذاری و $0/5$ ثانیه استراحت و فرکانس ۱ و دمای انجام آزمایش ۲۵ درجه سانتی‌گراد مورد آزمایش قرار گرفتند. معیار نهایی برای پایان آزمایش نیز تغییر شکل قائم نمونه به اندازه ۴ میلی‌متر یا 30000 تکرار بارگذاری در نظر گرفته شد. مطابق با مطالعات گذشته گزارش شده است در حالت تنش کنترل شده، مخلوطهای با سختی بالا، عمر خستگی بالاتری را نشان می‌دهند؛ بر عکس، در حالت کرنش ثابت، مخلوطهای با سختی بالا عمر خستگی پایین‌تری دارند [Tangella et al., 1990]. عمر خستگی مخلوطها به عنوان تعداد تکرار بار در لحظه شکست نمونه در نظر گرفته شد.

۵. نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آنها

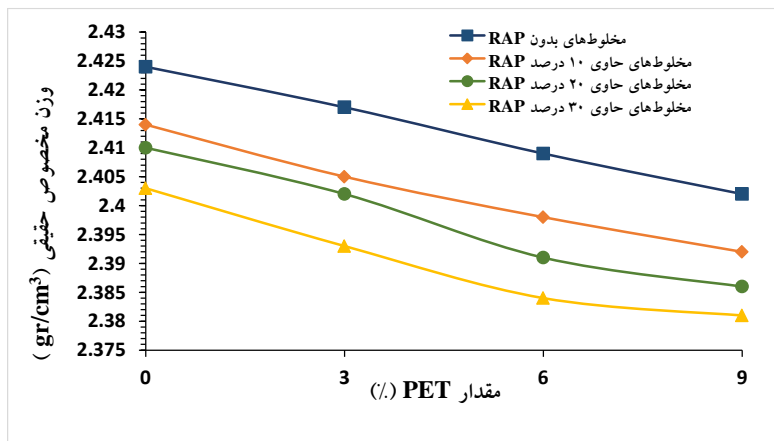
۵-۱ خصوصیات حجمی

نتایج وزن مخصوص حقیقی (G_{mb}) مخلوطهای آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، با افزایش مقدار RAP، وزن مخصوص مخلوطها کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه مخلوطهای بدون PET برای فضای خالی ۴ درصد طراحی شده‌اند، لذا کاهش وزن مخصوص مخلوطها با افزایش RAP، می‌تواند به دلیل پرشدن فضای خالی مخلوطهای بازیافتی با مقدار قیر بیشتر (که وزن مخصوص بسیار کمتری نسبت به مصالح سنگی دارد) به منظور رسیدن به فضای خالی ۴ درصد باشد. این روند برای مخلوطهایی با مقادیر PET یکسان نیز با افزایش درصد RAP بدست آمده است. همچنین

مشاهده می‌شود که با افزایش درصد RAP، فضای خالی پر شده با قیر افزایش می‌یابد که مطابق با یافته‌های مطالعات قبلی می‌باشد [Daniel and Lachance, 2005; Solanki et al., 2012; Taherkhani et al., 2019]. این افزایش به دلیل افزایش قیر موثر مخلوط‌ها در اثر افزایش RAP می‌باشد. این روند در مخلوط‌هایی با مقادیر PET یکسان نیز، با افزایش درصد RAP تکرار شده است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش PET، فضای خالی پر شده با قیر کاهش می‌یابد که مطابق یافته‌های مطالعات گذشته می‌باشد [Choudhary et al., 2018]. با افزایش PET، فضای خالی مخلوط‌ها و فضای خالی بین مصالح سنگی افزایش می‌یابد، لذا با توجه به اینکه مقدار قیر بهینه در مخلوط‌های حاوی PET، مشابه مخلوط‌های بدون PET در نظر گرفته شده است در نتیجه درصد فضای خالی پر شده با قیر کاهش می‌یابد. این روند در مخلوط‌هایی با مقادیر RAP یکسان نیز، با افزایش درصد PET تکرار شده است.

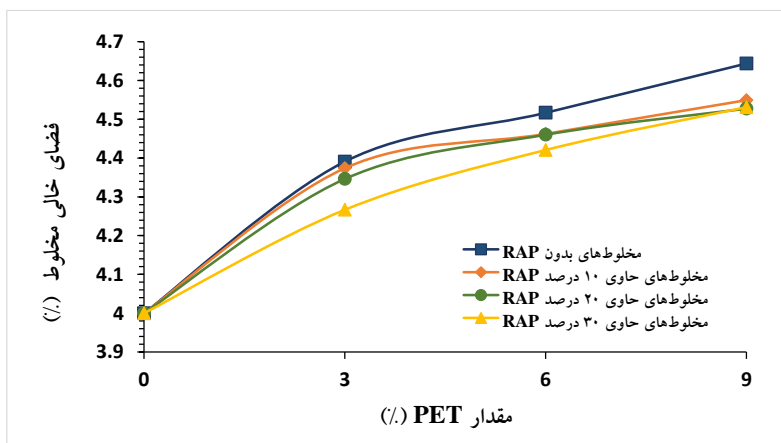
فضای خالی مصالح سنگی افزایش می‌یابد که منطبق با یافته‌های تحقیقات قبلی می‌باشد [Daniel and Lachance, 2005; Solanki et al., 2012; Jia et al., 2015; Taherkhani et al., 2019]. از آنجا که میزان فضای خالی برای مخلوط‌های بدون PET، ثابت در نظر گرفته شده است، افزایش VMA می‌تواند به افزایش مقدار قیر موثر مخلوط‌ها در اثر افزایش RAP نسبت داده شود. این روند برای مخلوط‌هایی با مقادیر PET یکسان نیز، با افزایش درصد RAP بدست آمده است. همچنین مشاهده می‌شود با افزایش مقدار PET فضای خالی مصالح سنگی افزایش می‌یابد که مطابق یافته‌های تحقیقات قبلی [Choudhary et al., 2018] می‌باشد. همانگونه که قبلاً ذکر گردید، با افزایش PET فضای خالی مخلوط‌ها افزایش یافته است که در نتیجه افزایش فضای خالی مصالح سنگی را سبب می‌شود. این روند برای مخلوط‌هایی با مقادیر RAP یکسان نیز، با افزایش درصد PET بدست آمده است.

شکل ۷ نتایج فضای خالی پر شده با قیر (VFA) مخلوط‌های آسفالتی با مقادیر مختلف RAP و PET را نشان می‌دهد.

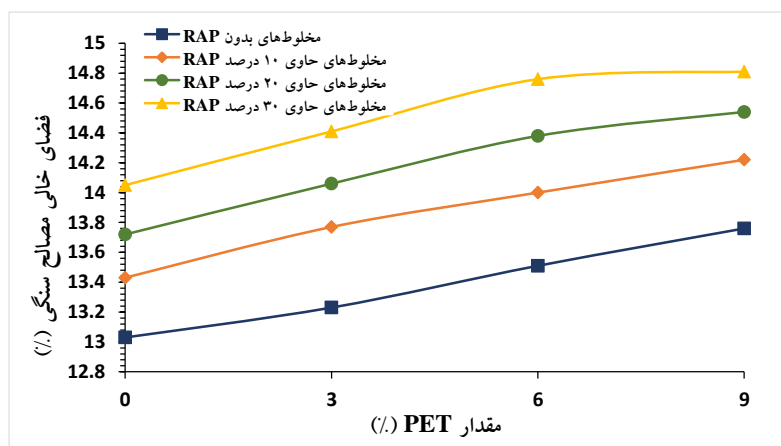


شکل ۴. نتایج وزن مخصوص حقیقی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET

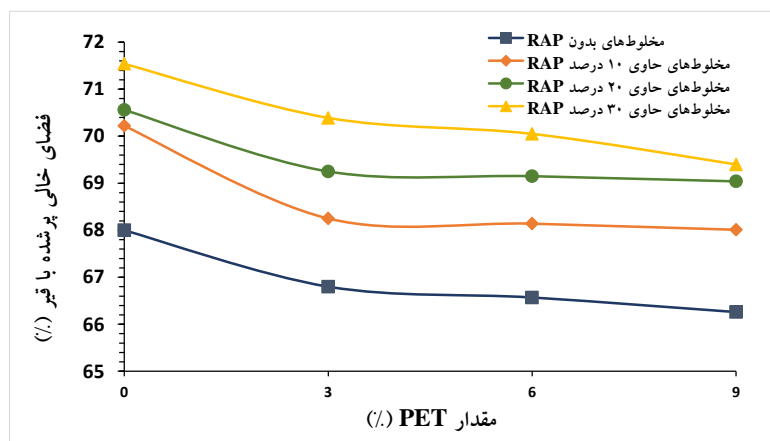
بررسی تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترفتالات (PET) در بتن آسفالتی بازیافتی



شکل ۵. نتایج فضای خالی مخلوطهای آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET



شکل ۶. نتایج فضای خالی مصالح سنگی مخلوطهای آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET



شکل ۷. نتایج فضای خالی پرشده با قیر مخلوطهای آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET

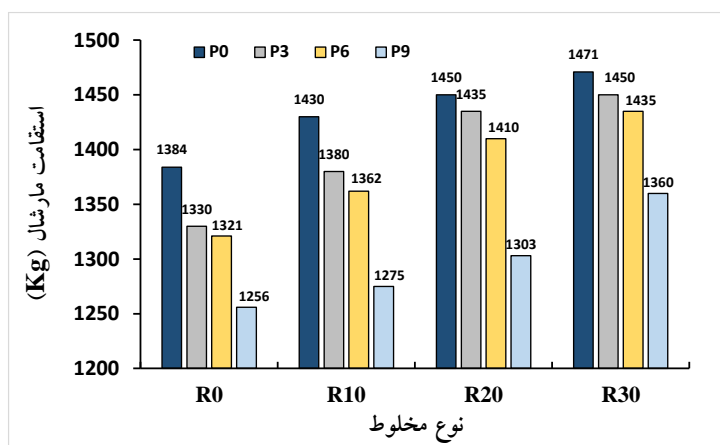
۲-۵ نتایج آزمایش مارشال

ملاحظه می گردد، با افزایش درصد RAP میزان استقامت افزایش می یابد که علت آن سخت شدن مخلوط به واسطه

شکل ۸ استقامت مارشال مخلوطهای آسفالتی با مقادیر مختلف RAP و PET را نشان می دهد. همانگونه که

مارشال تعیین شده توسط آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)، که ۸۰۰ کیلوگرم می‌باشد را برآورده کرده‌اند. این روند در مخلوط‌هایی با مقادیر RAP یکسان نیز، با افزایش درصد PET تکرار شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، افزودن RAP می‌تواند باعث جبران مقداری از مقاومت از دست رفته مخلوط‌ها در اثر افزودن PET شود و در نتیجه با افزایش مقدار RAP، امکان استفاده از مقادیر بیشتر PET ضمن بهبود یا جلوگیری از کاهش بیش از حد مقاومت مارشال مخلوط‌ها نسبت به مخلوط کنترل فراهم می‌شود.

سختی قیر موجود در RAP است و مشابه نتایج تحقیقات [Izaks et al., 2015; Dokandari et al., 2017; Taherkhani and Noorian, 2019; Oner et al., 2015] می‌باشد. این روند در مخلوط‌هایی با مقادیر PET یکسان نیز، با افزایش درصد RAP تکرار شده است. همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش مقادیر PET، استقامت مارشال کاهش می‌یابد. این کاهش مقاومت، ممکن است به علت کمتر بودن سختی و اصطکاک بین ذرات PET نسبت به سنگدانه‌ها و کاهش ضخامت قیر در اطراف سنگدانه‌ها که صرف پوشش ذرات PET شده است، باشد. با این حال، تمامی مخلوط‌ها حداقل استقامت



شکل ۸. نتایج استقامت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET

بنابراین، افزایش قیر در مخلوط‌های حاوی RAP باعث افزایش نرمی مخلوط و در نتیجه افزایش مقدار روانی مارشال شده است؛ هرچند، میزان افزایش روانی در اثر افزودن RAP، مقدار قابل توجهی نیست. همچنین، می‌توان ملاحظه نمود که میزان افزایش نرمی در مخلوط بازیافتی حاوی ۲۰٪ RAP بیش از آن در سایر مخلوط‌ها می‌باشد. همچنین، مشاهده می‌شود با افزایش PET، مقدار روانی مخلوط‌ها افزایش می‌یابد که به نظر می‌رسد، به دلیل کاهش اصطکاک بین سنگدانه‌ها در اثر افزودن PET باشد. این روند در مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف RAP مشاهده می‌گردد، اما میزان افزایش روانی در مخلوط‌های بازیافتی بیشتر از مخلوط کنترل می‌باشد. با این

مقدار روانی مخلوط‌های آسفالتی با مقادیر مختلف RAP و PET در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، برخلاف انتظار مقدار روانی مخلوط‌های حاوی آسفالت بازیافتی بیشتر از مخلوط کنترل است که مطابق نتایج (Izaks et al., 2015; Taherkhani et al., 2019)، اما برخلاف نتایج (Oner et al., 2015; Dokandari et al., 2017) می‌باشد. دلیل تفاوت نتایج این است که در مطالعاتی که روانی کاهش یافته، مقدار قیر بهینه برای تمامی مخلوط‌ها ثابت در نظر گرفته شده است، در حالیکه در این تحقیق مقدار فضای خالی ثابت در نظر گرفته شده است و افزایش فضای خالی به سبب حضور RAP، با افزودن قیر جبران شده است و

بررسی تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن تراثالات (PET) در بتن آسفالتی بازیافتی

نسبت مارشال می‌باشند. در آئین نامه‌های جاری در ایران معیار و ضابطه‌ای برای نسبت مارشال تعیین نشده است. اما در برخی از کشورها حداقلی برای نسبت مارشال تعیین شده و در برخی از کشورهای دیگر علاوه بر معیار حداقلی، معیار حداکثری نیز برای محدود کردن سختی بتن آسفالتی و توجه به انعطاف‌پذیری بودن آسفالت ارائه شده است. در استرالیا حداقل نسبت مارشال حدود ۱,۷۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در انگلستان محدوده‌ی نسبت مارشال بین ۲ تا ۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. در اندونزی محدوده‌ی نسبت مارشال بین ۲ تا ۳,۵ کیلونیوتن بر میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود [Setiadji, 2004]. با توجه به این معیارها همه مخلوطها معیار کشور استرالیا را ارضا می‌کنند، اما مخلوطهای حاوی RAP و بدون PET و مخلوطی که حاوی 30% از RAP و 3% از PET می‌باشند معیار کشور انگلستان را ارضا نمی‌نمایند. اما، با افزودن مقدار مناسب از PET می‌توان این مخلوطها را مناسب برای استفاده کرد.

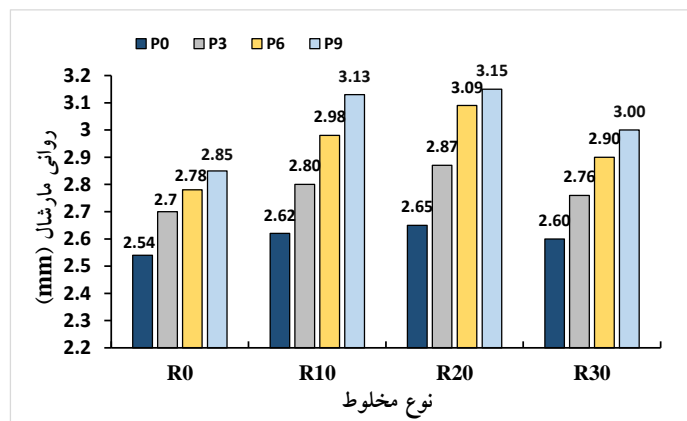
شکل‌های ۱۱ و ۱۲، به ترتیب، نتایج مقاومت کششی خشک (عمل‌آوری نشده) و مقاومت کششی اشباع (عمل‌آوری شده) را نشان می‌دهد. در این مخلوطها مقدار فضای خالی ۶/۵ تا ۷/۵ درصد است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در هر دو حالت خشک و تر با افزودن PET، ابتدا مقاومت کششی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بیشترین مقاومت کششی در مخلوطهای حاوی مقادیر یکسان RAP مربوط به نمونه‌های حاوی ۳ درصد PET می‌باشد. این نتیجه مطابق تحقیقات گذشته می‌باشد [Taherkhani and Arshadi, 2017; Choudhary et al., 2018; Modarres et al., 2014a]. همان‌طور که قبلاً گفته شد افزودن PET باعث کاهش اصطکاک بین سنگدانه‌ها می‌شود؛ با این حال، به نظر می‌رسد با توجه به اینکه در این آزمایش فضای خالی مخلوطها بالا است (۶/۵-۷/۵ درصد) افزودن PET تا ۳ درصد تأثیر چندانی بر اصطکاک بین سنگدانه‌ها ندارد و فاز پلیمری و قیری پیوستگی مناسبی دارند و این باعث بهبود چسبندگی مخلوط و

حال، تمامی مخلوطها در محدوده روانی تعیین شده توسط آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳۴)، که بین ۲ تا ۳,۵ میلی‌متر می‌باشد، قرار گرفته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، استفاده همزمان RAP و PET مشکلی را از نظر روانی ایجاد نمی‌کند و تمامی روانی‌ها در محدوده مجاز می‌باشد، هرچند که هر دوی این مصالح ضایعاتی باعث افزایش روانی مخلوطها شده‌اند.

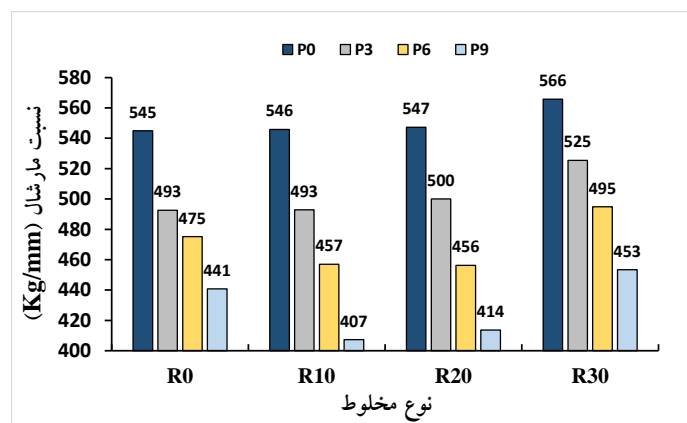
نسبت مارشال از تقسیم استقامت مارشال به نرمی بدست می‌آید و معمولاً به عنوان معیاری برای مقاومت مخلوطها در برابر تغییر شکل دائمی استفاده می‌شود [Ameri et, 2013]. اگرچه برخی محققان [Sengul et al., 2012] مخالف این عقیده می‌باشند و نتایج آزمایشگاهی آنان نشان داده است که این نسبت، به‌خوبی برای مقایسه مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی قابل استفاده نیست. شکل ۱۰ نتایج نسبت مارشال مخلوطهای آسفالتی با مقادیر مختلف RAP و PET را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در مخلوطهای حاوی مقادیر یکسان RAP، با افزایش PET نسبت مارشال کاهش می‌یابد. بقائی مقدم و همکارانش، در تحقیقی PET را با مقادیر ۰/۱ تا ۱ درصد وزن مصالح سنگی با حداکثر اندازه ۲/۳۶ میلی‌متر به مخلوط آسفالت ماستیکی درشت‌دانه (SMA) با حداکثر اندازه ذرات سنگی ۱۲/۵ میلی‌متر اضافه کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن PET باعث کاهش نسبت مارشال می‌شود [Baghaee Moghaddam et al., 2014]. با توجه به اینکه، افزایش PET باعث کاهش مقاومت و افزایش روانی مخلوطها می‌شود، لذا نسبت آن‌ها نیز کاهش خواهد یافت. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش RAP در مخلوطهای بدون PET و حاوی ۳ درصد PET، نسبت مارشال اندکی افزایش می‌یابد و در مخلوطهای حاوی ۶ و ۹ درصد PET، با افزودن RAP در ابتدا نسبت مارشال کاهش و سپس افزایش می‌یابد. همچنین، در مقادیر یکسان PET، مخلوطهای حاوی ۳۰ درصد RAP دارای بیشترین

حاوی مقادیر PET یکسان نیز، با افزایش RAP تکرار شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش مقدار RAP، امکان استفاده از مقادیر بیشتر PET ضمن بهبود مقاومت کششی مخلوط ساخته شده نسبت به مخلوط کنترل فراهم می‌شود؛ زیرا افزایش RAP می‌تواند مقدار مقاومت کششی از دست رفته در اثر استفاده از مقادیر بالای PET را جبران نماید. در صورتی که بخواهیم در مخلوط‌های بازیافتی میزان مقاومت کششی به اندازه مخلوط کنترل باشد، می‌توان با افزودن مقدار معینی از PET به این شرایط دست یافت. در مخلوط حاوی ۱۰٪ از RAP افزودن ۹٪ از PET مقاومت کششی مخلوط را تقریباً به مقاومت کششی مخلوط کنترل نزدیک می‌کند. اما، در مقادیر بالاتر از RAP به مقادیر بیشتری از PET نیاز می‌باشد.

افزایش مقاومت مخلوط‌ها می‌شود. در مقادیر بالاتر از ۳ درصد این ذرات فاز قیری را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند و باعث از بین رفتن فاز قیری و کاهش ضخامت قیر در اطراف سنگدانه‌ها و همچنین کاهش اصطکاک بین سنگدانه‌ها می‌شوند که در نتیجه سبب کاهش مقاومت مخلوط‌ها می‌گردد. اما، می‌توان ملاحظه نمود که میزان کاهش مقاومت با افزایش میزان PET با افزایش میزان RAP کاهش می‌یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌ها با افزایش RAP بیشتر می‌شود. این نتایج مشابه تحقیقات قبلی می‌باشد [Stroup-Gardiner and Wagner, 1999; Xiao et al., 2009; Dokandari et al., 2017; Shah et al., 2019]. Taherkhani and Noorian, 2019]. افزایش مقاومت کششی غیر مستقیم به پیرشدگی و سختی قیر موجود در RAP به سبب فرآیند پیری که در روسازی اتفاق می‌افتد، نسبت داده می‌شود [Shu et al., 2008]. این روند در مخلوط‌های

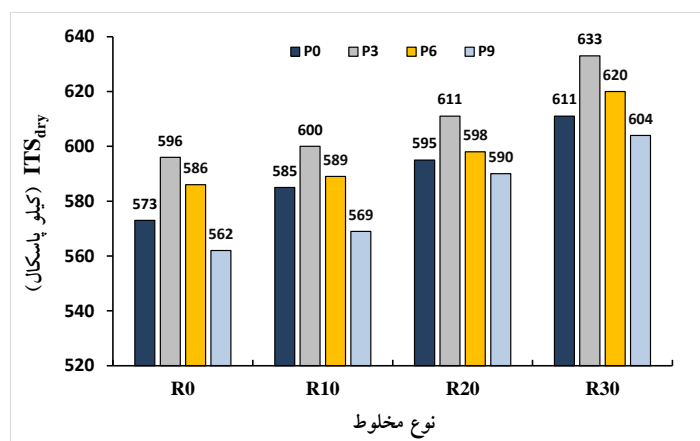


شکل ۹. نتایج روانی مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET

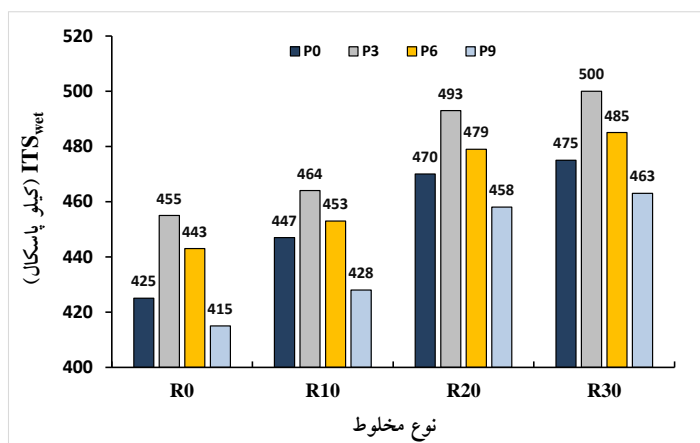


شکل ۱۰. نتایج نسبت مارشال مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET

بررسی تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترفثالات (PET) در بتن آسفالتی بازیافتی



شکل ۱۱. نتایج مقاومت کششی خشک مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET



شکل ۱۲. نتایج مقاومت کششی اشباع مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET

پدیده عریان شدگی و یا حساسیت رطوبتی می‌باشد. به نظر می‌رسد، با توجه به اینکه عملاً امکان احیای تمام قشر قیر موجود در مصالح RAP توسط قیر بکر وجود ندارد و در واقع قسمت‌های فوقانی قیر پیرشده بیشتر تحت اثر قیر بکر قرار می‌گیرد، می‌توان انتظار داشت که بخشی از قیر مصالح RAP که در تماس مستقیم با سطح سنگدانه‌ها قرار دارد، از سختی و ویسکوزیته بیشتری برخوردار باشد و چسبندگی مناسبی را بین قیر و سنگدانه ایجاد کند که این ویژگی سبب خواهد شد که این ناحیه کمتر تحت تأثیر اثرات نامطلوب رطوبت قرار گیرد و نتیجه آن نیز افزایش شاخص مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی خواهد بود. این روند در مخلوط‌های با مقادیر مختلف PET مشاهده می‌گردد. همچنین، مشاهده می‌شود که افزودن PET تا ۶ درصد باعث بهبود مقاومت مخلوط‌ها در برابر

شکل ۱۳ نتایج نسبت مقاومت کششی TSR مخلوط‌ها، که نشان دهنده حساسیت رطوبتی مخلوط می‌باشد، نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، افزودن RAP باعث بهبود مقاومت مخلوط‌ها در برابر آسیب رطوبتی می‌شود که مشابه نتایج مطالعات قبلی [Xiao et al., 2009; Pradyumna et al., 2013] می‌باشد و در مقدار ۳۰ درصد، اندکی از مقاومت مخلوط‌ها در برابر آسیب رطوبتی کاسته می‌شود که این روند مشابه نتایج [Tabakovic et al., 2006; Fattah et al., 2017] می‌باشد. کاهش و یا حذف پیوند بین قیر و سطح مصالح سنگدانه‌ای در حضور رطوبت به عریان شدن دانه‌ها و از بین رفتن یکپارچگی مخلوط آسفالتی منجر می‌شود؛ بنابراین، خصوصیات شیمیایی قیر و سنگدانه‌ها در سطح تماس بین مصالح سنگی و قیر، اصلی‌ترین عامل در

مقاومت به تغییر شکل در مخلوطهای بدون RAP و حاوی RAP با افزایش مقدار PET کاهش می یابد. این موضوع سازگار با نتایج مطالعات گذشته نیز می باشد که دریافتند مقاومت به تغییر شکل بتن آسفالتی با افزایش PET کاهش می یابد [Earnest, 2015; Taherkhani and Arshadi, 2017]. دلیل کاهش مقاومت به تغییر شکل را می توان به کاهش اصطکاک سنگدانه ها و افزایش فضای خالی مخلوطها در اثر افزودن PET، ضمن ثابت بودن درصد قیر، نسبت داد. اما، برخی از تحقیقات گذشته نشان دهنده این است مقاومت به تغییر شکل مخلوطهای آسفالتی ماستیک درشت دانه با افزایش PET افزایش می یابد [Baghaee Moghaddam et al., 2014]. کاهش مقاومت به تغییر شکل در مخلوطهای بازیافتی می تواند اثر مثبتی بر عملکرد داشته باشد، زیرا مخلوطهای بازیافتی حاوی RAP سخت تر بوده و مستعد ترک خوردگی می باشند. برای مثال، با توجه به شکل ۱۴، می توان نتیجه گرفت که با افزودن PET به میزان کمی بیش از ۳٪ می توان سختی مخلوط بازیافتی حاوی ۱۰٪ RAP را به سختی مخلوط کنترل نزدیک نمود. نتایج این تحقیق همچنین، بیانگر این است که مقاومت مخلوطهای آسفالتی بدون PET و حاوی درصدهای مختلف PET، با افزایش RAP افزایش می یابد که هماهنگ با نتایج تحقیقات قبلی می باشد [Stroup-Gardiner and Wagner, 1999; Pereira et al., 2004; Taherkhani and Noorian, 2019; Pradyumna et al., 2013]. دلیل این موضوع نیز وجود قیر سخت در RAP می باشد که دارای سختی بیشتری از قیر بکر می باشد. بنابراین، می توان نتیجه گیری نمود که افزودن پلیمر ضایعاتی PET مشابه عملکرد جوان کننده در مخلوطهای بازیافتی توانایی جبران افزایش سختی مخلوط را داشته باشد و این اجازه را خواهد داد تا درصد بیشتری از RAP را در مخلوط آسفالتی بازیافتی به کار گرفت. در شکل ۱۵ همچنین ملاحظه می گردد که میزان مقاومت به تغییر شکل با افزایش RAP افزایش می یابد. علاوه

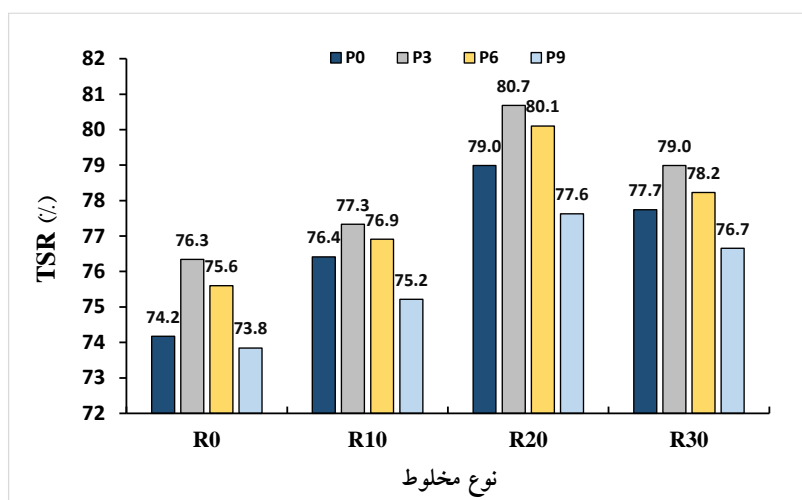
آسیب رطوبتی می شود و در مقادیر یکسان RAP، بیشترین مقدار TSR مربوط به مخلوط حاوی ۳ درصد PET می باشد که نشانگر این است که با افزودن PET، چسبندگی و پیوستگی در مخلوطهای آسفالتی افزایش پیدا می کند و امکان جدایی قیر از روی سطوح سنگدانه ها در اثر حضور آب را نمی دهد و سبب می شود که مخلوط در طی چرخه های یخبندان و ذوب یخ مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به سایر نمونه ها داشته باشد. همچنین، با توجه به اینکه ذرات PET خاصیت جذب آب بسیار کمی در مقایسه با سنگدانه ها دارند؛ لذا در قسمت هایی از مخلوط که این ذرات حضور دارند، آب نمی تواند آسیب چندانی را به مخلوط وارد نماید و سبب بهبود مقاومت مخلوط در برابر رطوبت می شود. با این حال، به نظر می رسد در مقادیر بیشتر از ۳ درصد، با افزایش مقدار PET به مقدار قیر بیشتری برای پوشش PET نیاز است و با توجه به ثابت بودن مقدار قیر بهینه، ضخامت قیر اطراف سنگدانه ها کاهش می یابد. این کاهش ضخامت قیر در اطراف سنگدانه ها موجب کاهش مقاومت به آسیب رطوبتی می شود. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می دهد که استفاده همزمان RAP و PET نه تنها باعث کاهش مقاومت مخلوطها در برابر آسیب رطوبتی نمی شود، بلکه هر دوی این مواد ضایعاتی به بهبود عملکرد مخلوطها در برابر رطوبت کمک می کنند و امکان استفاده از مقادیر بیشتر RAP و PET در صورت استفاده همزمان امکان پذیر می شود.

نتایج آزمایش خزش دینامیکی بر روی مخلوطها به صورت تغییرات کرنش عمودی تجمعی بر حسب تعداد سیکل بارگذاری ارائه می گردد. برای نمونه، شکل ۱۴ منحنی خزش مخلوطهای حاوی ۱۰٪ RAP و درصدهای مختلف از PET می باشد را نشان می دهد. به منظور مقایسه مقاومت به تغییر شکل مخلوطهای مختلف، میزان کرنش تجمعی مخلوطهای مختلف بعد از اعمال ۲۰۰۰ سیکل بارگذاری تعیین شده و در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نتایج بیانگر این است که

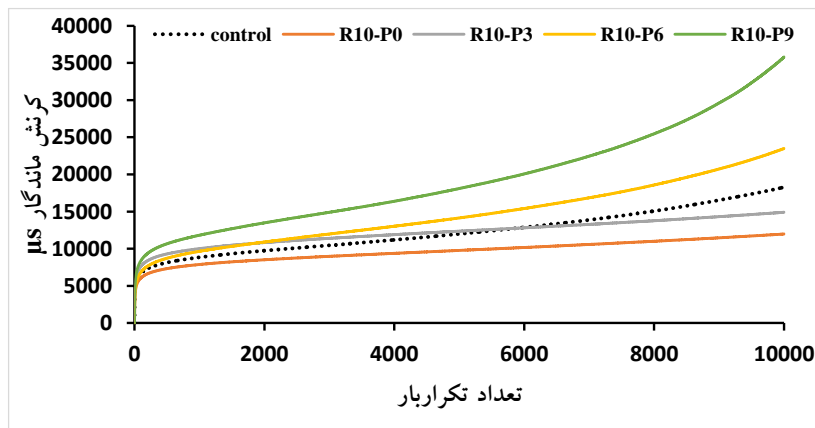
بررسی تاثیر استفاده از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترافتالات (PET) در بتن آسفالتی بازیافتی

عمر خستگی در آزمایش تنش ثابت با افزایش RAP افزایش می یابد. این نتایج مشابه تحقیقات پیشین می باشد [Taherkhani and Noorian, 2019]. در مطالعات قبلی گزارش گردیده است که در حالت تنش ثابت، مخلوط‌هایی با سختی بالاتر، عمر خستگی بیشتری را نشان می دهند؛ برعکس، در حالت کرنش ثابت، مخلوط‌های با سختی بالا عمر خستگی پایین‌تری دارند [Mashaan et al., 2014; Tangella et al., 1990]. از این رو، دلیل افزایش مقاومت به سختی مخلوط‌های حاوی RAP را می‌توان به افزایش سختی مخلوط‌های حاوی RAP به دلیل وجود قیر پیر شده در آن‌ها نسبت داد. همچنین، همانگونه که در شکل ۱۷ ملاحظه می گردد، نتایج این تحقیق بیانگر این است که در مخلوط‌های بدون RAP و حاوی درصد‌های مختلف از RAP، افزایش PET باعث کاهش عمر خستگی مخلوط‌ها می‌شود. می‌توان گفت دلیل کاهش مقاومت به سختی مخلوط‌های حاوی PET به علت کاهش سختی مخلوط‌ها در اثر کاهش اصطکاک بین سنگدانه‌ها باشد.

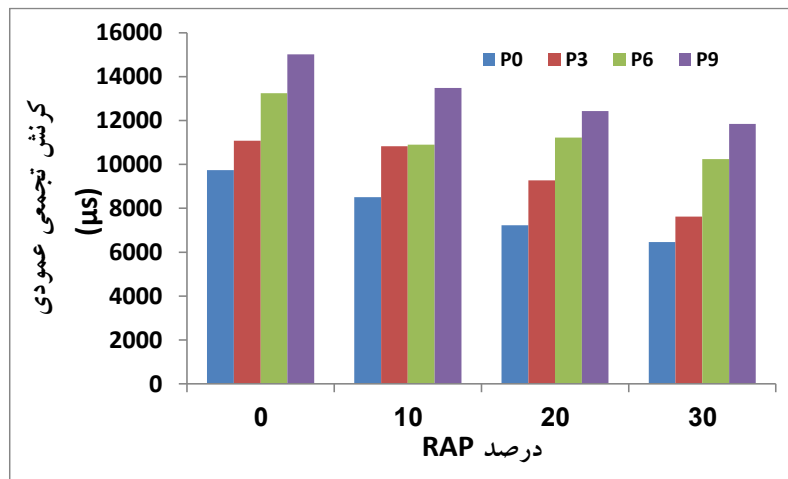
بر این، میزان کاهش مقاومت با افزایش PET در مخلوط‌های بازیافتی بیشتر بوده و با افزایش RAP این تاثیر بیشتر می گردد. نتایج آزمایش خستگی تحت تنش ثابت به صورت منحنی تغییرات کرنش قطری تجمعی با تعداد تکرار بارگذاری نشان داده می شود. برای نمونه، شکل ۱۶ نتایج مربوط به مخلوط‌های حاوی ۳۰٪ RAP و درصد‌های مختلف PET را نشان می دهد. عمر خستگی مخلوط‌ها در آزمایش تنش ثابت تعداد تکرار بارگذاری در شروع ناحیه سوم منحنی کرنش قطری تجمعی تعریف می شود. نتایج عمر خستگی به صورت خلاصه در شکل ۱۷ نشان داده شده اند. با توجه به اینکه مخلوط‌های R30-P0 و R30-P3 تا تعداد سیکل ۳۰۰۰۰ تکرار شکسته نشدند، عمر خستگی آن‌ها بالاتر از ۳۰۰۰۰ در نظر گرفته شده و مقدار دقیق آن‌ها قابل محاسبه نمی‌باشد. همچنین، عمر خستگی مخلوط‌های R20-P0 و R30-P6 نیز اندکی بیشتر از ۳۰۰۰۰ تکرار می‌باشد که حدوداً برابر این مقدار در نظر گرفته شده است. نتایج این آزمایش بیان گر این است که در مخلوط‌های بدون PET و حاوی درصد‌های مختلف PET،



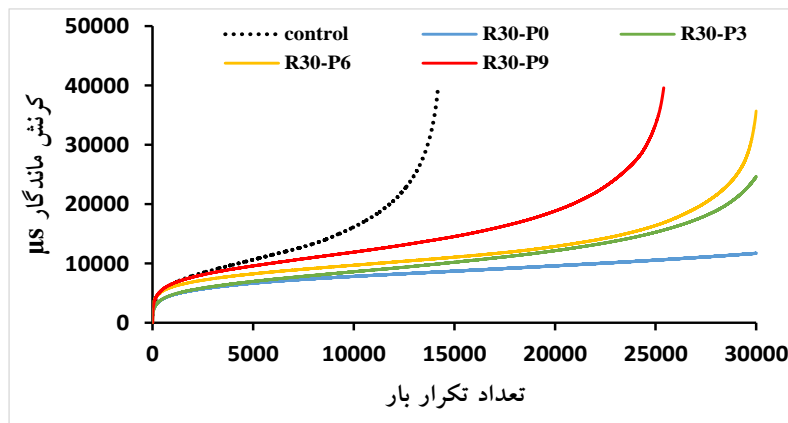
شکل ۱۳. نتایج حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET



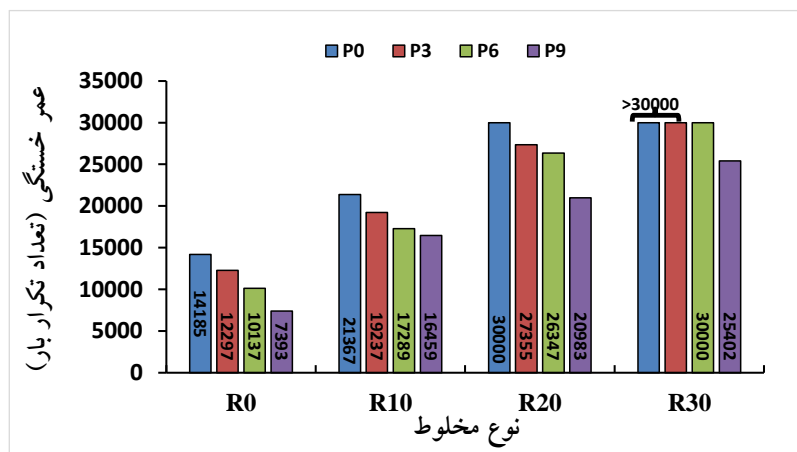
شکل ۱۴. نمودار خزش دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۱۰ درصد RAP و مقادیر مختلف PET



شکل ۱۵. کرش تجمعی مخلوط‌های مختلف بعد از اعمال ۲۰۰۰ سیکل بارگذاری



شکل ۱۶. نمودار خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ۳۰ درصد RAP و مقادیر مختلف PET



شکل ۱۷. عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مقادیر مختلف RAP و PET

۶. نتیجه‌گیری

PET تا ۳٪ مقاومت به آسیب رطوبتی افزایش و بعد از آن

کاهش می‌یابد.

- مقاومت به تغییر شکل با افزایش مقدار خرده آسفالت ضایعاتی افزایش یافته و با افزایش PET کاهش می‌یابد.

- عمر خستگی مخلوط‌های آسفالتی با افزایش RAP افزایش و با افزایش PET کاهش می‌یابد.

- به طور کلی روند تاثیرات افزودن PET در مخلوط‌های بازیافتی و مخلوط کنترل مشابه است و اثر متقابلی این دو متغیر با یکدیگر ندارند.

- از نتایج این تحقیق می‌توان استنباط نمود که با افزودن PET به مخلوط‌های بازیافتی حاوی RAP می‌توان عملکرد مخلوط را از نظر مقاومت به آسیب رطوبتی و مقاومت به ترک خوردگی که از نقاط ضعف مخلوط‌های بازیافتی است، بهبود داد.

- درصد مناسب PET برای مخلوط‌های حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ RAP حدود ۴٪، ۵ و ۶٪ پیشنهاد می‌شود که باعث می‌شود علاوه بر افزایش مقاومت کششی، مقاومت به آسیب رطوبتی و عمر خستگی، مقاومت به تغییر شکل مخلوط هم حداقل به اندازه مخلوط کنترل باشد.

۷. مراجع

در این تحقیق درصد‌های مختلفی از پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترفثالات (PET) در بتن آسفالتی حاوی درصد‌های مختلفی از خرده آسفالت ضایعاتی (RAP) استفاده شده و ویژگی‌های مختلفی از مخلوط‌ها مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفت. به طور کلی نتایج زیر از این تحقیق قابل استنتاج می‌باشد.

- وزن مخصوص واقعی مخلوط با افزایش PET و RAP کاهش می‌یابد.

- درصد قیر بهینه، درصد فضای خالی و درصد فضای خالی مصالح سنگی مخلوط با افزایش درصد RAP و PET افزایش می‌یابد، و فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر با افزایش آنها کاهش می‌یابد.

- استقامت مارشال با افزایش RAP افزایش و با افزایش PET کاهش می‌یابد. میزان روانی نیز با افزایش RAP و PET افزایش می‌یابد.

- مقاومت کششی خشک و عمل آوری مخلوط‌ها با افزایش RAP افزایش یافته و با افزایش PET تا ۳٪ وزنی افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد.

- مقاومت به آسیب رطوبتی با افزایش RAP تا ۲۰٪ افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش

Scientific Research and Essays, Vol. 6, No. 4, pp. 670-682.

- Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M. and Karim, MR, (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, MR and Syammaun, T. (2012) "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles". Construction and Building Materials, Vol. 34, pp. 236-242.

- Container Recycling Institute (<http://www.containerrecycling.org/index.php/pet-bottle-sales-and-wasting-in-the-us>).

- Choudhary, R., Kumar, A. and Murkute, K. (2018) "Properties of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt Mixes: Dependence on PET Size, PET Content, and Mixing Process" Periodica Polytechnica Civil Engineering. 62(3): 685-693.

- Daniel, J., & Lachance, A. (2005) "Mechanistic and volumetric properties of asphalt mixtures with recycled asphalt pavement" Transportation Research Board of the National Academies, 1929. pp. 28-36.

- DeDene, CD and You, ZP (2014) "The performance of aged asphalt materials rejuvenated with waste engine oil" International Journal of Pavement Research and Technology, Vol.7, No.2, pp.145-152.

- Dhasmana, H., Hossain, K., and Karakas, AS (2019) "Effect of long-term ageing on the rheological properties of rejuvenated asphalt binder" Road Materials and Pavement Design, 1-19.

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

- Ahmadiania, E., Zargar, M., Karim, MR, 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.

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

- Ameri, M., Mansourian, A. and Sheikhmotevali, AH (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.

- 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.

- Arabani, M., Mirabdolazimi, SM, & 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.

- Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M., & Karim, MR (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, MR and Abdelaziz, M., (2011) "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes"

- Lastra-González, P., Calzada-Pérez, MA, Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, Á., and 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.
- Mannan, UA, Islam, MR and Tarefder, RA 2015 "Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies" *International Journal of Fatigue*. Elsevier. 78: pp. 72–80.
- Mashaan, N. S., Karim, M. R., Abdel Aziz, M., Ibrahim, M. R., Katman, H. Y. & Koting, S. (2014). "Evaluation of fatigue life of CRM-reinforced SMA and its relationship to dynamic stiffness". *The Scientific World Journal*. Hindawi Publishing Corporation.
- Meraudje, A., Ramli, M. I., Pasra, M., & Amiruddin, A. A. (2020, January). The potential utilization of Polyethylene Terephthalate (PET) waste as fine aggregate replacement in asphalt mixture. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* Vol. 419, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
- Modarres, A. and Hamedi, H. (2014)a "Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes". *Materials & Design*, Vol. 61, pp. 8-15.
- Modarres, A., and Hamedi, H. (2014)b "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.
- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, AC and Olavarría, J. (2019) "Effects of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) on Stiffness
- Dokandari, PA, Kaya, D., Sengoz, B., and Topal, A. (2017) "Implementing Waste Oils with Reclaimed Asphalt Pavement" *Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE'17)*, Barcelona, Spain :2-4 April 2017. <https://doi.org/10.11159/icsem17.142>.
- Earnest, MD (2015) "Performance Characteristics of Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt".
- Fattah, M., Qasim, Z. and Zuhier, Y. (2017) "Impact of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) on Properties of Asphalt Mixture For Surface Layer" *Global Journal of Engineering Science and Research Management*. 4. 161-170. 10.5281/zenodo.1034605.
- Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I. and Zaumanis, M. (2015) "Hot mix asphalt with high RAP content" *Procedia Engineering*. Elsevier 114: pp. 676–684.
- Jia, X., Huang, B., Moore, JA and Zhao, S. (2015) "Influence of waste engine oil on asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement" *Journal of Materials in Civil Engineering*. 27(12): p. 4015042.
- Kennedy, TW and Anagnos, JN (1983) "Procedures for the Static and Repeated-Load Indirect Tensile Test. Interim Report" *Center for Highway Research*. University of Texas at Austin. Available at: <https://library.ctr.utexas.edu/digitized/texasarchhive/phase1/183-14-CTR.pdf>.
- 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.

- Sondog, MS, Chadbourn ,BA and Dreseher, A. (2002) "Investigation of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Mixtures". National Technical Information Services, Springfield , Virginia 22161, 2002.
- Setiadji, B. H. (2004). Use of waste materials for pavement construction in Indonesia. In Asia-Pacific Conference on Transportation and the Environment (APTE), 3rd, 2004, Singapore.
- Stroup-Gardiner, M. and Wagner, C. (1999) "Use of reclaimed asphalt pavement in Superpave hotmix asphalt applications" Transportation Research Board of the National Academies, (1681), pp. 1–9.
- Tabaković, A., Gibney, A., McNally, C. and Gilchrist, MD (2010) "Influence of recycled asphalt pavement on fatigue performance of asphalt concrete base courses" Journal of Materials in Civil Engineering. American Society of Civil Engineers. Vol. 22, No.6, pp. 643–650.
- Taherkhani H. and Arshadi, MR (2017) "Investigating the mechanical properties of asphalt concrete containing waste polyethylene terephthalate". Road Materials and Pavement Design, DOI: 10.1080/14680629.2017.1395354.
- Taherkhani, H. and Noorian, F. (2019). "Laboratory investigation on the properties of asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement and waste cooking oil as recycling agent" International Journal of Pavement Engineering, 1-11.
- Tangella, SCSR, Craus, J., Deacon, JA and Monismith, CL (1990) "Summary report on fatigue response of asphalt mixtures" SHRP-A-312.
- of Hot Asphalt Mixtures" Advances in Civil Engineering, 2019.
- Oner, J. and Sengoz, B. (2015) "Utilization of Recycled Asphalt Concrete with Warm Mix Asphalt and Cost -Benefit Analysis" PloS ONE Vol. 10, No. 1, e116180.
- Pereira, PAA, Oliveira, JRM and Picado-Santos, LG. (2004) "Mechanical characterization of hot mix recycled materials" International Journal of Pavement Engineering. Taylor & Francis. 5(4): pp. 211–220.
- Pradyumna, TA, Mittal, A. and Jain, PK (2013) "Characterization of reclaimed asphalt pavement (RAP) for use in bituminous road construction" Procedia-Social and Behavioral Sciences. Elsevier. 104: pp. 1149–1157.
- Sengul, CE, Aksoy, A., Iskender, E. and Ozen, H. (2012) "Hydrated lime treatment of asphalt concrete to increase permanent deformation resistance" Construction and Building Materials. Elsevier, Vol. 30, pp. 139–148.
- Shah, A., McDaniel, R., Huber, G. and Gallivan, V. (2007) "Investigation of properties of plantproduced reclaimed asphalt pavement mixtures" Transportation Research Board of the National Academies, (1998), pp. 103–111.
- Shu, X., Huang, B. and Vukosavljevic, D. (2008) "Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture". Construction and Building Materials. Elsevier. Vol. 22, No. 7, pp. 1323–1330.
- Solanki, P., Hossain, Z., Zaman, M. and Adje, D. (2012) "Volumetric and mechanistic characteristics of asphalt mixes containing recycled asphalt pavement" in GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering, pp. 3709–3718.

- Usman, N., and Masirin, MIM (2019) "Performance of asphalt concrete with plastic fibres. " In Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete (pp. 427-440). Woodhead Publishing.
- Veeraragavan, RK (2016) "An Investigation of the Performance of Hot Mix Asphalt (HMA) Binder Course Materials with High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) and Rejuvenators" Worcester Polytechnic Institute. <https://web.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-042816-63006/unrestricted/rveeraragavan.pdf>.
- Xiao, F., Amirkhanian, SN, Shen, J. and Putman, B. (2009) "Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures". Construction and Building Materials. Elsevier. Vol. 23, No. 2, pp. 1028–1034.
- Xu, O., Xiao, F., Han, S., Amirkhanian, SN and 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.
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H. and Karim MR. (2012) "Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. " Journal of hazardous materials, 233, 254-258.

سعید زمانی، حسن طاهرخانی

حسن طاهرخانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران را در سال ۱۳۷۱ از دانشگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه و ترابری در سال ۱۳۷۵ را از دانشگاه تربیت مدرس تهران. اخذ نمود. در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی راه و ترابری از دانشگاه ناتینگهام انگلستان گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل، طراحی، تکنولوژی و مصالح روسازی بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه زنجان است.



سعید زمانی، تحصیلات خود در دوره کارشناسی را در سال ۱۳۹۶ در رشته مهندسی عمران در دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابهر به اتمام رسانده و تحصیلات کارشناسی ارشد خود را در سال ۱۳۹۹ در دانشگاه زنجان در رشته راه و ترابری به اتمام رسانده اند. در حال حاضر در اجرای پروژه های مختلف عمرانی در بخش خصوصی مشغول فعالیت می باشد.