ارزیابی خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)

حسن زیاری، استاد، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
آرمان قاسمی کلیجی، دانش آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
رضوان باباگلی*، دانش آموخته دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

Email: Rezvan_babagoli@yahoo.com
دریافت: ۹٤/۰۵/۳۱ – پذیرش ۹۵/۰۸/۲٤

چکیده

امروزه استفاده از مواد بازیافتی به عنوان اصلاح‌کننده در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند دارای مزیت‌های اقتصادی و محیط‌زیستی فراوانی باشد. در این مطالعه، به بررسی استفاده از الیاف تهیه شده از بطری‌های پلاستیکی (PET[1]) موجود در زباله‌ها و کاربرد آن در بتن آسفالتی گرم پرداخته شده است. بدین منظور، بطری‌های پلاستیکی به ابعاد ۲/۵x ۱۰، ۲/۵x۲۰ و ۲/۵x۳۰ میلی‌متر بریده شده و با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد از وزن مصالح سنگی، با استفاده از روش خشک، در نمونه‌ها به‌کار رفته‌اند. در این تحقیق، خصوصیات مکانیکی و عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده از طریق آزمایش‌هایی از قبیل: مقاومت مارشال، کشش غیرمستقیم، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی و خزش مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که استفاده از PET سبب بهبود مقاومت در برابر تغییرشکل‌های دائمی مخلوط‌های آسفالتی شده، ولی باعث کاهش مقاومت مارشال و مقاومت کششی نمونه‌ها نیز شده است همچنین، مشخص شد که الیاف PET با طول ۱۰ میلی‌متر با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ درصد نتیجه بهتری را نسبت به دیگر نمونه‌ها داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: بطری‌های پلاستیکی، پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)، خواص عملکردی، حساسیت رطوبتی

[1]- Polyethylene terephthalate

۱. مقدمه

پلاستیک‌ها، در سراسر جهان، به طور قابل توجهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بطری‌های پلاستیکی (PET) نیز یکی از انواع پلاستیک‌ها می‌باشند که در ضایعات جامد شهری به مقدار زیاد یافت می‌شوند. ضایعات بطری پلاستیکی از پلیمرهای ترموپلاستیک نیمه بلورین می‌باشد که جزو مواد پلی‌استر به حساب می‌آیند. استفاده از بطری‌های پلاستیکی به خوبی در صنعت مواد غذایی، به دلیل ویژگی‌های عالی به عنوان ماده بسته‌بندی، شناخته شده است (ناوارو و همکاران، ۲۰۰۸). در دهه‌های گذشته، حجم وسایل نقلیه موجود در راه‌ها، مخصوصاً وسایل نقلیه سنگین مانند ون‌ها و کامیون‌ها، در حال افزایش می‌باشد. با افزایش تعداد و وزن وسایل نقلیه، تعداد و تکرار بارگذاری روی مخلوط آسفالتی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. بنابراین، عمر سرویس‌دهی مخلوط‌های آسفالتی کاهش می‌یابد. همچنین، عملکرد مخلوط‌ها تحت تأثیر دمای محیط، به دلیل خصوصیات ویسکوالاستیک قیر، می‌باشد. ویسکوزیته قیر نسبت به دما به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در دماهای زیاد، قیر نرم‌تر و با ویسکوزیته کمتر می‌باشد، که عملکرد تغییرشکل دائمی مخلوط را به صورت منفی تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور غلبه بر این مشکلات و تولید مخلوط با عمر سرویس‌دهی بیشتر، اصلاح مخلوط آسفالتی با استفاده از افزودنی‌ها، ازجمله الیاف و پلیمر، در میان مهندسین راه و طراحان مورد توجه قرار گرفته است. در میان این افزودنی‌ها، پلیمرها (از جمله SBS[1]، LDPE[2] و HDPE[3] به مقدار زیادی استفاده می‌شوند. در این صورت، تحقیقات زیادی روی تأثیر استفاده از مواد بازیافتی به عنوان افزودنی عمدتاً به منظور: ۱) جلوگیری از هزینه‌های اضافی تحمیل شده در اثر استفاده از مواد افزودنی و ۲) پیدا کردن یک راه‌حل برای استفاده مجدد از مواد زائد صورت گرفته است (مقدم و همکاران، ۲۰۱٤). پلیمرهای مورد استفاده برای اصلاح مخلوط آسفالتی را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد که عبارتند از: الاستومرهای ترموپلاستیک مثل استایرن بوتادین استایرن (SBS) و پودر لاستیک (CR[4])؛ پلاستومرها مثل اتیلن‌وینیل‌استات (EVA[5]) و پلی‌اتیلن (PE[6]) و پلیمرهای با واکنش شیمیایی. شاخص طبقه‌بندی الاستومرها بر اساس درصد استایرن، وزن مولکولی و پیکربندی آنهاست. پلاستومرها شامل پلی‌اتیلن و ترکیبات مختلف براساس پلی‌اتیلن و وینیل-استات هستند. تحقیقات مختلف نشان داده که اصلاح مخلوط آسفالتی با پلی‌اتیلن مؤثر است (کوک و کولاک، ۲۰۱۱). در حال حاضر، اصلاح مخلوط آسفالتی با پلیمرها هزینه زیادی دارد (احمد، ۲۰۰۷؛ چیو و لو، ۲۰۰۷). بنابراین، استفاده از مواد ضایعاتی می‌تواند یک راه‌حل مناسب برای اصلاح مخلوط آسفالتی و کاهش هزینه‌های ساخت جاده‌ها باشد. طبق تحقیقات گذشته، ضایعات شیشه، لاستیک و پلاستیک از جمله مواد ضایعاتی هستند که در اصلاح مخلوط آسفالتی استفاده شده‌اند (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۷). نتایج تحقیقات نشان داده که ضایعات شیشه و ضایعات لاستیک باعث بهبود خصوصیات عمکردی مخلوط آسفالتی شده‌اند (عربانی و همکاران، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲). بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به طور جدی در معرض مشکلات ناشی از زباله هستند. استفاده مجدد از زباله، به‌خصوص در برخی از مواد مانند ظروف پلاستیکی، می‌تواند بسیار مفید باشد. از جمله مواد پلاستیکی می‌توان به بطری‌های پلاستیکی اشاره کرد که از پلیمر پلی‌اتیلن ترفتالات (PET)

[1]- Styrene-butadiene-styrene
[2]- Low-density polyethylene
[3]- High-density polyethylene

[4]- Crumb rubber
[5]- Ethylene vinyl acetate
[6]- Polyethylene

تشکیل‌شده‌اند. PET یک رزین پلیمری ترموپلاستیک از خانواده پلی‌استر بوده و به طور گسترده در تولید بطری‌های آب و نوشابه استفاده می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۰۸). استفاده از ضایعات بطری‌های پلاستیکی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، هدف این تحقیق، ارزیابی تأثیر افزودن ضایعات بطری‌های پلاستیکی موجود در زباله به عنوان افزودنی بر خصوصیات عملکردی مخلوط آسفالتی می‌باشد. ضایعات بطری‌های پلاستیکی می‌توانند با استفاده از فرایندهای فیزیکی و شیمیایی بازیافت شوند. بازیافت شیمیایی ضایعات بطری پلاستیکی گران است زیرا در فشار و دمای زیاد و در حضور کاتالیزور انجام می‌شود. همچنین، در بازیافت مکانیکی، کیفیت بازیافت PET به دلیل حضور آلاینده‌های چسبنده کاهش می‌یابد. از این رو، بازیافت نمی‌تواند به عنوان تنها راه‌حل برای غلبه بر بحران ناشی از تولید مقدار زیاد PET ضایعاتی در نظر گرفته شود. بنابراین، نیاز است تا یک راه‌حل دیگری جهت مقابله با این مشکل در نظر گرفته شود، مانند استفاده دوباره این مواد در مخلوط آسفالتی (لی و همکاران، ۱۹۹۸؛ حسنی و همکاران، ۲۰۰۵). پلی‌اتیلن ترفتالات مهم‌ترین عضو خانواده پلی‌استرها است که از واکنش پلیمری شدن تراکمی اتیلن گلایکول و ترفتالیک اسید خالص تولید می‌شود .این پلیمر برای اولین بار در دهه ۱۹۵۰ به طور مجزا در انگلستان و ایالات متحده به طور صنعتی جهت تولید الیاف مصنوعی مورد استفاده در صنایع نساجی به‌کار گرفته شد و پس از آن از اواخر دهه ۱۹۷۰ با اصلاحات صورت گرفته روی ساختار این پلیمر برای استفاده در صنایع بسته‌بندی به عنوان بطری، فیلم، ظروف یک‌بار مصرف و صنایع الکترونیک جهت تولید فیلم‌های ذخیره‌سازی اطلاعات نیز استفاده قرار گرفت. پلی‌اتیلن ترفتالات پلیمری است که در اغلب کشورها برای تولید الیاف پلی‌استر، رزین بطری، فیلم و رزین‌های پلی‌استر مهندسی به‌کار رفته است. ولی در ایران، این پلیمر بیشتر برای ساخت انواع بطری‌های آشامیدنی استفاده می‌شود. با توجه **به** مقاومت بالای این بطری‌ها در برابر شکستگی، دما و نفوذ گازها، دارا بودن وزن کم و ارزان بودن قیمت نسبت به سایر مواد بسته‌بندی همچون شیشه و فلز، تولید بطری‌های پلاستیکی از این رزین کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است که موجب ورود بطری‌های PET مصرفی به جریان زباله‌های شهری می‌گردد. بالا بودن حجم این بطری‌ها نسبت به وزن خود (به طور مثال یک بطری آب ۱/۵ لیتری تنها ۳۰-۳۵ گرم وزن دارد) باعث شده فضای زیادی را در هنگام حمل و نقل و دفن به خود اختصاص دهند و تجزیه بسیار طولانی آن‌ها در طبیعت باعث گردیده تا مسئله بازیافت این بطری‌ها، به‌خصوص در سال‌های اخیر، توجه همگان را به خود جلب نماید.

اولین بطری پلاستیکی در سال ۱۹۷۷ بازیافت شده است و در سال ۲۰۰۹ در آمریکا نرخ بازیافتی برابر با ۲۸٪ داشته است (دامغانی و همکاران، ۲۰۰۸). مصرف بطری‌های PET در ایران برای اولین بار در سال ۱۳۷۰ آغاز شد. طبق آمار مسئولین سازمان بازیافت و تبـدیل مواد شهرداری تهران، میزان مصرف این مواد در سال ۱۳۸۳ به ۳۸ هزار تن رسیده بود. در سال ۱۳۸۸، ۹۱۰۰۰ تن پلی‌اتیلن ترفتالات گرید بطری توسط یک شرکت پتروشیمی در داخل کشور به‌فروش رسیده است. استفاده از پلاستیک بازیافتی در روسازی آسفالتی بحث جدیدی نیست. این کار به طور عملی از حدود سال ۲۰۰۲ در هند شروع شده است. امروزه در بیش از ۵۰۰۰ کیلومتر از راه‌ها در بخش‌های مختلف هند از مواد پلاستیکی استفاده شده است. جاده‌ی پلاستیک بازیافتی[1] از اضافه کردن موادی همچون پلاستیک حمل بار، لیوان یک‌بار مصرف، پلاستیک بسته‌بندی مواد غذایی و... ساخته شده است. این مواد عمدتاً از

[1]- Plastic Waste Road

پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن وپلی‌استرساخته شده‌اند که دمای نرمی آنان ۱۰۰-۱٤۰ درجه سلسیوس است (شکل ۱).

دو روش جهت استفاده از افزودنی‌ها در مخلوط‌ها وجود دارد: روش خشک و روش تر. در روش تر، افزودنی‌ها به قیر اضافه شده و بعد با مصالح سنگی مخلوط می‌شوند. در روش خشک، افزودنی‌ها به طور مستقیم به مصالح سنگی و یا مخلوط آسفالت اضافه می‌شوند.

کیسی و همکاران (۲۰۰۸) اقدام به بررسی مناسب بودن مواد پلیمری مختلف به عنوان اصلاح‌کننده قیر نمودند. در این تحقیق مشخص شد که نمی‌توان از PET به عنوان اصلاح کننده قیر با توجه به دمای ذوب بالای آن استفاده نمود. زیرا سبب ایجاد اختلال در فرایند اختلاط می‌گردد. از آنجایی که نمی‌توان از PET به عنوان اصلاح‌کننده قیر استفاده نمود، در نتیجه استفاده از روش تر عملی نمی‌باشد

شکل ۱. جاده‌ی ساخته‌شده از پلاستیک بازیافتی

اخیراً، ضایعات پلاستیکی PET به مخلوط آسفالتی به عنوان افزودنی به روش خشک اضافه شد. در سال ۲۰۱۱، ضایعات پلاستیکی با حداکثر اندازه ۱/۱۸ میلی‌متر به عنوان افزودنی در مخلوط با استخوان‌بندی سنگ‌دانه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای مارشال و خصوصیات حجمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از مصالح پلاستیکی بازیافتی تأثیر مثبتی بر عملکرد مخلوط SMA از لحاظ زیست‌محیطی و اقتصادی دارد (احمدی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۱). عمر خستگی مخلوط های آسفالتی اصلاح شده با PET مورد ارزیابی قرار گرفته است. دانه های PET با حداکثر اندازه ۲/۳٦ میلی‌متر استفاده شده و خصوصیات خستگی مخلوط‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که عمر خستگی با افزودن PET افزایش یافته و با افزایش درصدهای بالاتر PET مقاومت مخلوط ها در برابر خستگی افزایش یافته است. در تحقیق دیگری، مقاومت شیارشدگی مخلوط ها در زیر بار دینامیک در دماها و تنش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داده که با افزایش درصدهای PET کرنش‌های تجمعی کاهش یافته است (احمدی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۲). در تحقیق دیگری، تأثیر درصدهای مختلف PET بر خصوصیات عملکردی مخلوط های آسفالتی با آزمایش های مارشال، مدول برجهندگی، کشش غیرمستقیم، خزش دینامیک و

استاتیک و رابطه همبستگی بین پارامترهای عملکردی مختلف نیز در نهایت بررسی شد. نتایج نشان داد که اضافه نمودن PET به مخلوط سبب بهبود خصوصیات عملکردی آن می گردد. همچنین، نشان داد که افزودن PET پارامتر شیارشدگی مخلوط را در آزمایش خزش دینامیک بهبود بخشید. ولی در آزمایش خزش استاتیک نتایج خوبی را نشان نداد (احمدی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۲). در مطالعه واسودوان و همکاران، ۲۰۰۶) به بررسی استفاده از مواد پلاستیکی بازیافتی در آسفالت پرداخته شد. وی با درصدهای مختلف پلاستیک خرد شده آزمایش‌هایی را روی قیر و آسفالت انجام داد و مشاهده کرد که افزایش نقطه نرمی، شکل پذیری، نقطه اشتعال و سوختن و کاهش نفوذپذیری قیر رخ داده و همچنین باعث افزایش مقاومت مارشال مخلوط شده است. با مخلوط کردن ۱۰ درصدی وزنی پلاستیک بازیافتی (نسبت به وزن قیر) بهترین نتیجه مارشال صورت گرفته است. همچنین، می تواند باعث کاهش ۱۰-۱۵ درصد مصرف قیر شود. مزیت این کار در سادگی فرایند، عدم نیاز به تجهیزات خاص و از همه مهم‌تر حل کردن مشکل محیط‌زیست است. در مطالعه‌ای دیگر، عابدین مقانکی و گنجی‌دوست (۱۳۸۷) به بررسی استفاده از ضایعات پلاستیکی (PET) در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته‌اند. مواد PET به دو صورت گرانول (با قطر ۳ میلی‌متر) و خرد شده (چیپس) به مخلوط ها اضافه شدند. گرانول PET با مقادیر ۲۰، ۳۰، ٤٠، ۵۰ و ٦٠ درصد، جایگزین مصالح سنگی هم‌اندازه (مانده روی الک شماره ۸ با اندازه ٤/۷۵-۲/۳٦ میلی‌متر) شده اند. چیپس‌های استفاده شده در این آزمایش، چیپس‌های عبوری از صافی با قطر ۱۲ میلی‌متر بوده اند. چیپس‌های PET با درصدهای ۱، ۳ و ۵ (نسبت به وزن کل مخلوط) به مخلوط اضافه شده‌اند. جایگزینی ۲۰٪ مصالح سنگی مانده روی الک شماره ۸ با گرانول PET، علاوه بر صرفه‌جویی ۵ درصدی در مصرف مصالح سنگی، باعث کاهش ۸/۲ درصدی وزن مخلوط های آسفالتی خواهد گردید. میزان نسبت مارشال مخلوط پلاآسفالت، در مقایسه با مخلوط شاهد، نه تنها کاهشی نداشته، بلکه حدود ۵٪ افزایش یافته است. مقدار روانی مخلوط پلاآسفالت در مقایسه با مخلوط شاهد، مناسب تر شده و به حدود استاندارد نزدیک شده است. علی‌رغم کاهش ۸/۱ درصدی مقاومت مارشال، مقدار مقاومت نمونه پلاآسفالت حدود ۲ برابر حداقل مقاومت مجاز استاندارد روسازی راه‌های ایران است. نتیجه این تحقیقات، یک مخلوط با کمترین تغییرات در مشخصات مکانیکی مخلوط های آسفالتی را معرفی می نماید که با مصرف مقادیر فراوانی از ضایعات پلاستیک PET، سالانه تا ۵۰۰ هزار تن از مصرف مصالح سنگی جلوگیری خواهد نمود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که افزودن ضایعات بطری‌های پلاستیکی به مخلوط آسفالتی باعث بهبود خصوصیات تغییرشکل و مقاومت در برابر شیار شدگی می‌شود (رحمان و وهاب، ۲۰۱۳). نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بیشتر PET، مقاومت بهتری در برابر تغییرشکل در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده ایجاد می‌کند. به‌طوری که ۱٪ PET (نسبت به وزن سنگ-دانه‌ها) بالاترین مقاومت در برابر تغییرشکل را داراست (بقایی مقدم و همکاران، ۲۰۱۲). نتایج آزمایش ویل-تراک نشان می‌دهد که کمترین عمق شیار مخلوط آسفالتی حاوی PET در مقدار ٤٪ (نسبت به وزن قیر) اتفاق می‌افتد و نتایج آزمایش مدول برجهندگی (دمای متوسط) نیز این موضوع را تأیید می‌کند که در این درصد، مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده نسبت به مخلوط اصلاح نشده سخت‌تر شده است. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی می‌توان گفت که استفاده از ضایعات بطری‌های پلاستیکی در نواحی گرم تا ٤٪ کافی است. بررسی‌ها نشان داده که PET باعث کاهش ریزش قیر در مخلوط‌های آسفالتی PET می‌شود. افزودن PET باعث

ویسکوزتر شدن قیر شده و منجر به ثبات و نگـه‌داشـتن قیر روی سنگ‌دانه‌ها می‌شود. در نتیجـه، از ریـزش قیـر جلوگیری می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد که افـزودن PETتـأثیری در بهبـود حساسـیت رطـوبتی مخلـوط آسفالتی ندارد (احمدی‌نیا و همکاران، ۲۰۱۲). افـزودن ضایعات بطری‌های پلاستیکی باعث افـزایش اسـتحکام مخلوط می‌شود. PET در حالت طبیعی، یک رزین نیمه کریستالی است و پس از اضافه شدن به مخلوط آسفالتی و حرارت دیدن، ویژگی‌های آن شروع به تغییر می‌کند و باعث استحکام بیشتر مخلـوط مـی‌شـود. ایـن افـزایش استحکام تا یک حدی ادامـه دارد و بـا افـزودن بیشـتر PET، به دلیل آنکه در شکل کریستالی خود در مخلـوط باقی می‌ماند، باعث افزایش فضای خالی شده و استحکام مخلـوط را کـاهش مـی‌دهـد (احمـدی‌نیـا و همکـاران، ۲۰۱۱).

۲. روش تحقیق

روش انجام تحقیق شامل انتخاب مصـالح، انتخـاب قیر و انجام آزمایش‌های قیر روی قیر خـالص، سـاخت نمونه‌های آسفالت با درصدهای مختلـف افزودنـی و در نهایت انجام آزمایش های مارشـال، مـدول برجهنـدگی، کشش غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیـک روی نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی افزودنی مـی-باشد.

۲-۱. مصالح سنگی و قیر

در این پژوهش، از سنگ شکسته کوهی، معدن اسب چران رودهن (تلو)، بـا دانـه‌بنـدی شـماره ٤ آیـین‌نامـه روسازی آسفالتی و همچنـین ۵٪ فیلـر پـودر سـنگ (از گردگیر خود کارخانه آسفالت) استفاده شد. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۱ آمده است. قیـر بـه کـار گرفتـه شـده در ایـن پـژوهش از نـوع قیـر خالص۶۰/۷۰ بود که تولید شرکت نفت پاسارگاد بوده و مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ آمده است

جدول ۱. خصوصیات مصالح سنگی مورد استفاده

شرح	نتایج آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳٤		استاندارد آزمایش	
		آستر	رویه	AASHTO	ASTM
حداکثر سایش به روش لوس‌آنجلس (٪)	۲۲/۳	٤۰	۳۰	T96	-
حداکثر ضریب تورق با روش BS812 (٪)	۹	۳۰	۲۵	-	-
حداقل درصد شکستگی در دو وجه روی الک شماره ٤	۹٤	۸۰	۹۰	-	D5821
حداکثر درصد جذب آب (مصالح درشت‌دانه)	۲/۲	۲/۵	۲/۵	T85	-
حداکثر درصد جذب آب (مصالح ریزدانه)	۲/٤	۲/۸	۲/۵	T84	-

جدول ۲. مشخصات فیزیکی قیر

نوع آزمایش	استاندارد	نتیجه آزمایش
نقطه نرمی	ASTM D36	٤٧ درجه سلسیوس
درجه نفوذ در دمای ۲۵ درجه	ASTM D5	٦٧ دسی‌میلی‌متر
درجه اشتعال	ASTM D92	۳۰٤ درجه سلسیوس
شکل‌پذیری در دمای ۲۵	ASTM D113	بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر
چگالی	ASTM D70	۱/ ۰٤۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب
افت حرارتی	ASTM D6	۰/۰۵ درصد
قابلیت حل	ASTM D4	۹۹/۵ درصد

۲-۲. الیاف PET

بطری‌های پلاستیکی مورد استفاده (با خواص ذکر شده درجدول ۳) پس از جمع‌آوری از زباله‌ها، شسته شده و پس از خشک کردن به ابعاد مورد نظر بریده شده‌اند. ابعاد مورد نظر ۱۰x۲/۵، ۲۰x۲/۵ و ۳۰x۲/۵ میلی‌متر بود که با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد از وزن مصالح سنگی به‌کار رفته‌اند. پلی‌اتیلن ترفتالات پلیمری قابل ارتجاع در اثر حرارت است. مدول الاستیسیته کششی و خمشی آن به ترتیب در حدود ۲/۹ و ۲/٤ GPa است و چگالی ظاهری آن ۱/۳-۱/٤ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد.

جدول ۳. برخی خواص PET

ویژگی	واحد	روش استاندارد	مقدار نتیجه
جذب آب	٪	ASTM D570	۰/۱۰
مقاومت کششی	kg/cm^2	ASTM D638	۸۰۸
نقطه ذوب تقریبی	°C	-	۲۵۰

۲-۳. روش ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، برای تهیه درصد قیر بهینه ابتدا ۱۸ نمونه مخلوط آسفالتی با مقادیر قیر خالص ٤، ٤/۵، ۵، ۵/۵، ٦ و ٦/۵ درصد ساخته شد. پس از انجام آزمایش‌های مارشال، درصد قیر بهینه تعیین گردید. برای تهیه نمونه‌های حاوی افزودنی، ابتدا مصالح سنگی تا دمای ۱۷۰ درجه سلسیوس و قیر خالص تا دمای ۱٤۰ درجه سلسیوس گرم شد. ضایعات پلاستیکی با ابعاد ۱۰x۲/۵، ۲۰x۲/۵ و ۳۰x۲/۵ میلی‌متر و مقادیر PET برابر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد از وزن مصالح سنگی بریده شده و به روش خشک به مصالح سنگی اضافه شده و به ازای هر درصد سه نمونه تهیه شد. سپس، مخلوط حاصل تحت روش تراکم مارشال با ۷۵ ضربه متراکم گردید. در ادامه، نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای آزمایشگاه قرار داده شدند تا سرد شوند. پس از سرد شدن، نمونه‌ها از قالب خارج شدند و آزمایش‌های چگالی، پایداری و روانی (نشریه ۲۳٤) روی آن‌ها انجام پذیرفت و نتایج با نمونه‌های شاهد مقایسه شد (زیاری و همکاران، ۱۳۸۵). برای ارزیابی تأثیر افزودنی‌ها بر خواص مخلوط‌های آسفالتی گرم، آزمایش‌های مارشال، مدول برجهندگی، کشش

غیرمستقیم، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیک روی انواع مخلوط‌های ساخته شده انجام شد.

۲-٤. روش کار آزمایش

۲-٤-۱. آزمایش کشش غیرمستقیم

در آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم، یک نمونه استوانه‌ای به صورت قطری بارگذاری می‌شود. آزمایش کشش غیرمستقیم برای تعیین مقاومت کششی مخلوط‌های آسفالتی و پیش‌بینی ظهور ترک‌ها در مخلوط آسفالتی استفاده می‌شود. همچنین، می‌توان از این آزمایش برای ارزیابی عمر خستگی نیز استفاده کرد. آزمایش کششی غیرمستقیم بر اساس آیین‌نامه ASTM D6931-12 با نرخ ثابت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه و دمای ۲۰ درجه سلسیوس انجام شد. مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با استفاده از معادله زیر تعیین گردید:

$$ITS = 2P_{\max} / \pi Dt \qquad (۱)$$

که ITS مقاومت کششی نمونه‌ها (مگاپاسکال)، P_{max} بار اعمالی در زمان شکست (نیوتن)، D قطر نمونه‌ها (میلی‌متر) و t ارتفاع نمونه‌ها (میلی‌متر) می‌باشد.

۲-٤-۲ مدول برجهندگی

آزمایش مدول برجهندگی در دماهای کم به نحوی مرتبط با ترک‌خوردگی حرارتی می‌باشد. تحقیقات متعددی نشان داده است که مخلوط‌های سخت‌تر در دماهای کمتر، بیشتر مستعد ترک‌خوردگی حرارتی می‌باشند. برای تعیین مدول برجهندگی از استاندارد AS 2891-13-1-1995 استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها به مدت ۲٤ ساعت در محفظه دستگاه در دمای ۲۵ °C قرار داده شد. شکل بارگذاری نیمه سینوسی، مدت اعمال بار ۰/۱ ثانیه، زمان استراحت ۰/۹ ثانیه و ضریب پواسون ۰/۳۵ فرض گردید. در این آزمایش، به ازای هر مخلوط، ۳ نمونه آسفالتی تهیه و روی هر نمونه ۵ پالس تکرار شد و میانگین نتایج به وسیله دستگاه نمایش داده شد. مدول برجهندگی بر اساس معادله زیر محاسبه می‌گردد:

$$M_r = \frac{P(\mu + 0.2734)}{\sigma \times t} \qquad (۲)$$

که M_r مدول برجهندگی (مگاپاسکال)، P بار تکراری (نیوتن)، μ نسبت پواسون، t ضخامت نمونه (میلی‌متر) و σ کل تغییرشکل بازگشت‌پذیر افقی (میلی‌متر) است.

۲-٤-۳. آزمایش حساسیت رطوبتی

این آزمایش بر اساس استاندارد AASHTO –T283 انجام می‌گیرد. نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها بر طبق این استاندارد در شرایط اشباع و غیراشباع باید بیش از ۰/۷۵ باشد. برای اشباع شدن، نمونه‌ها به مدت ۲٤ ساعت در آب ٦۰ درجه قرار گرفتند.

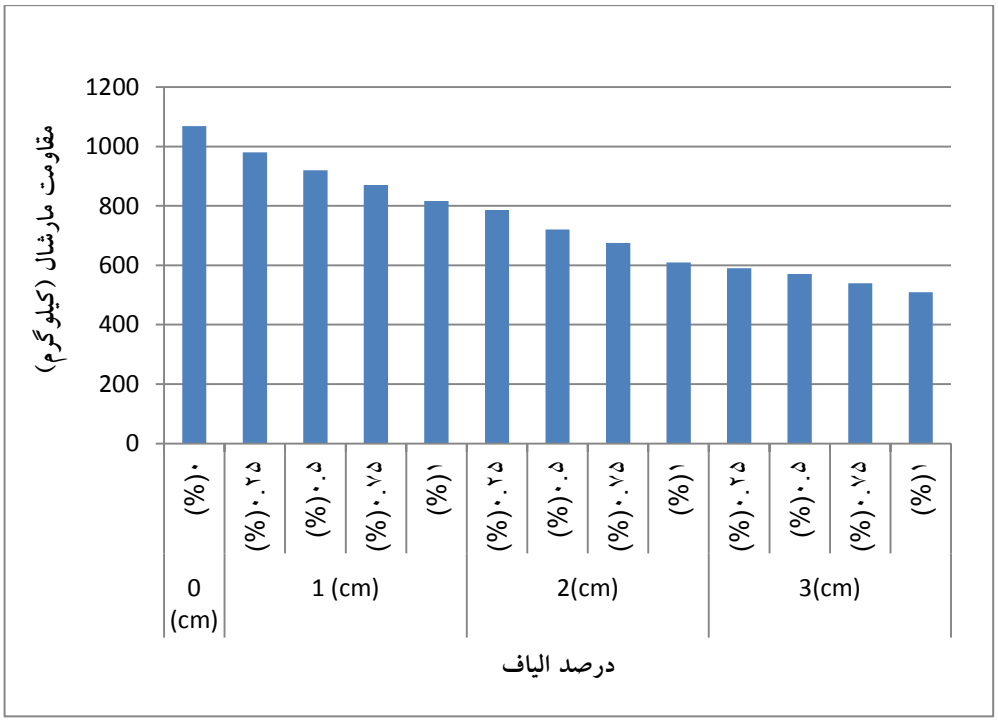
۲-٤-٤. خزش دینامیک

جهت بررسی شیارشدگی نمونه‌ها از آزمایش خزش دینامیک استفاده شد. آزمایش خزش دینامیک یکی از معیارهای مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر تغییرشکل‌های دائم می‌باشد. آزمایش با استفاده از دستگاه UTM-5P در دمای ثابت ۵۰ درجه سلسیوس و تحت تنش ثابت ٤۵۰ کیلوپاسکال، که به صورت شبه سینوسی اعمال شد، انجام گرفت. در این آزمایش، یک تنش ثابت در دمای ثابت با مدت بارگذاری ۰/۱ ثانیه و زمان استراحت ۰/۹ ثانیه توسط یک صفحه صلب به صورت عمودی به نمونه وارد می‌شود . نتایج آزمایش بر حسب عدد روانی برداشت شد که معیاری برای نشان دادن مقاومت مخلوط در برابر تغییرشکل‌های دائمی می‌باشد. یعنی هر قدر عدد روانی بزرگ‌تر باشد، مقاومت نمونه در برابر تغییرشکل‌های دائم بیشتر است.

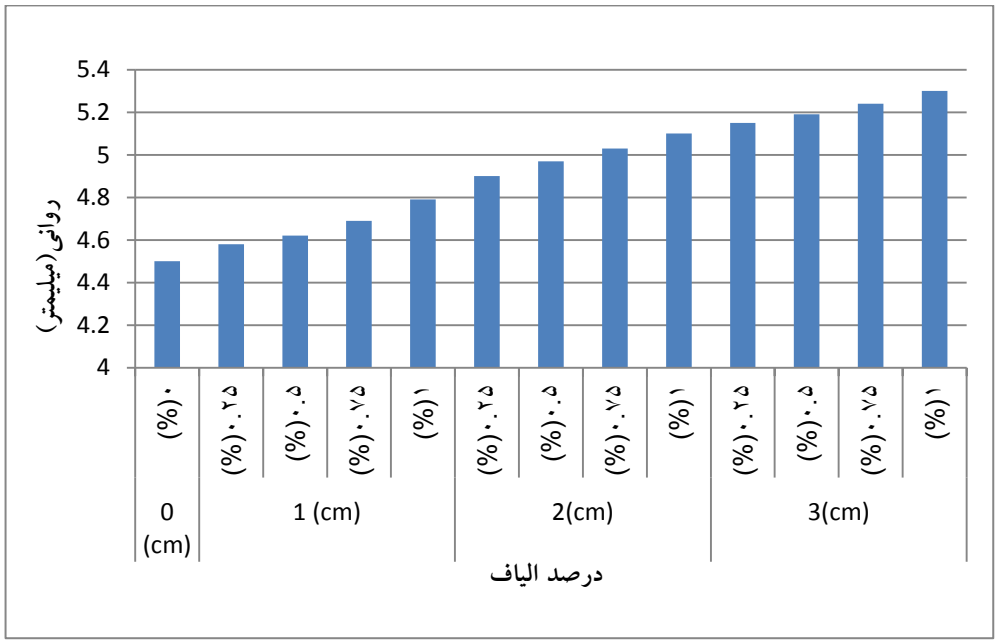
۳. نتایج و بحث

۳-۱. مقاومت مارشال

نتایج مقاومت مارشال نمونه‌ها در شکل ۲ آورده شده است. مقاومت مارشال به‌طورکلی با افزایش درصد و طول الیاف کاهش می‌یابد. علت آن ممکن است جذب بخشی از قیر توسط الیاف باشد. مقایسه روانی نمونه‌های اصلاح‌شده با الیاف PET (شکل ۳) نشان می‌دهد که در کل کاهش روانی رخ داده است.

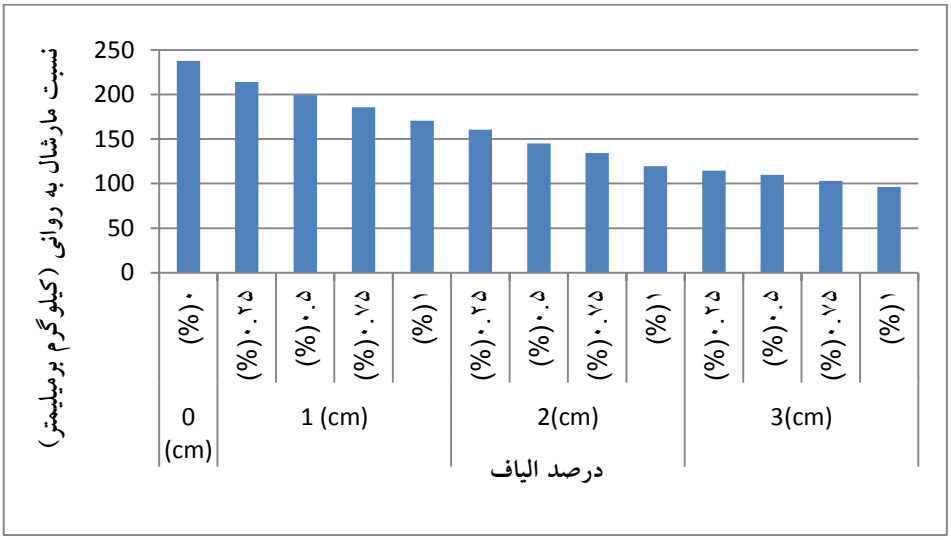


شکل ۲. نتایج مقاومت مارشال برای نمونه‌های مختلف



شکل ۳. نتایج روانی برای نمونه‌های مختلف

نسبت مارشال در واقع نسبت مقاومت مارشال به روانی است. هر اندازه این مقدار بیشتر باشد، مخلوطی مستحکم‌تر و با قابلیت بارگذاری بیشتر و در عین حال انعطاف‌پذیرتر به دست می‌آید. همان طور که از شکل ٤ مشخص است، مقادیر نسبت مارشال با افزایش درصد الیاف و اندازه آن کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط‌های حاوی الیاف PET نسبت به مخلوط‌های بدون الیاف دارای سختی کمتری می‌باشند و این موضوع می‌تواند ناشی از اصطکاک داخلی کمتر مخلوط‌های حاوی الیاف باشد.



شکل ٤. نتایج نسبت مارشال برای نمونه‌های مختلف

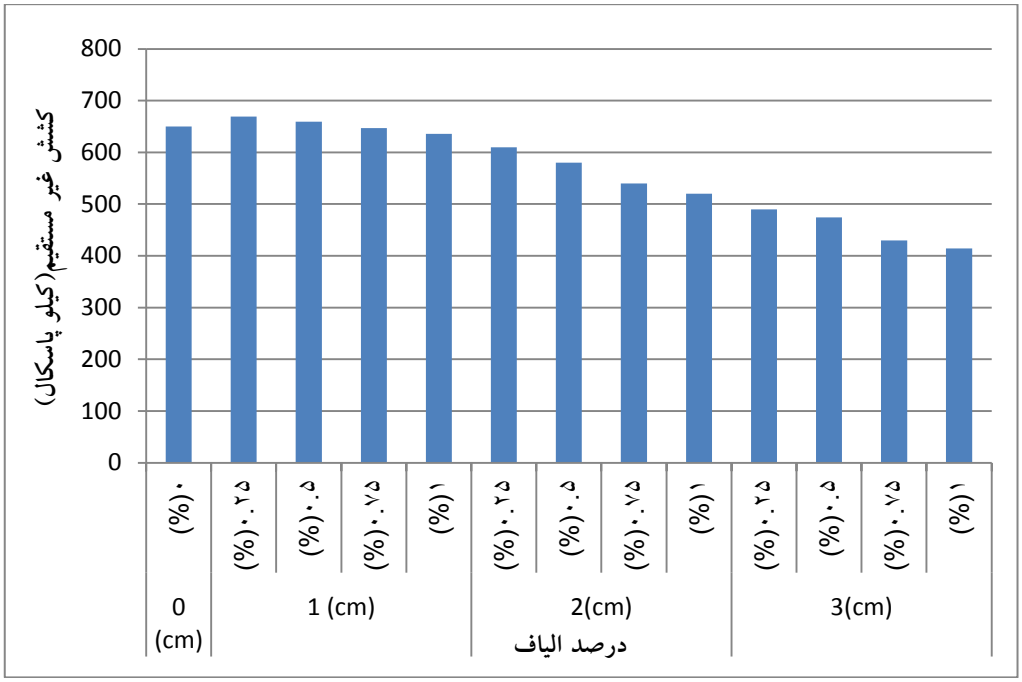
۳-۲. کشش غیرمستقیم

نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم برای درصدها و اندازه‌های مختلف PET در شکل ٥ نشان داده شده است. بر اساس این شکل، می‌توان دریافت که مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده با PET دارای مقاومت کششی کمتری (خلاف بحث مسلح کردن با الیاف) در زیر بار استاتیک خواهند داشت. به طوری که با افزایش درصد PET، مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در مقادیر بیشتر، PET درصدی از قیر را در اطراف خود نگه می‌دارد. این مسئله می‌تواند باعث کاهش ضخامت قیر در اطراف سنگ‌دانه‌ها شده و سبب کاهش مقاومت گردد. اگرچه کاهش مقاومت و سختی می‌تواند در راستای افزایش انعطاف‌پذیری باشد، اما برای جلوگیری از کاهش بیش از حد در ضخامت قیر اطراف سنگ‌دانه‌ها، باید مقدار PET محدود شود (مدرس و حامدی، ۱۳۹٥). همچنین، با افزایش اندازه الیاف PET، مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

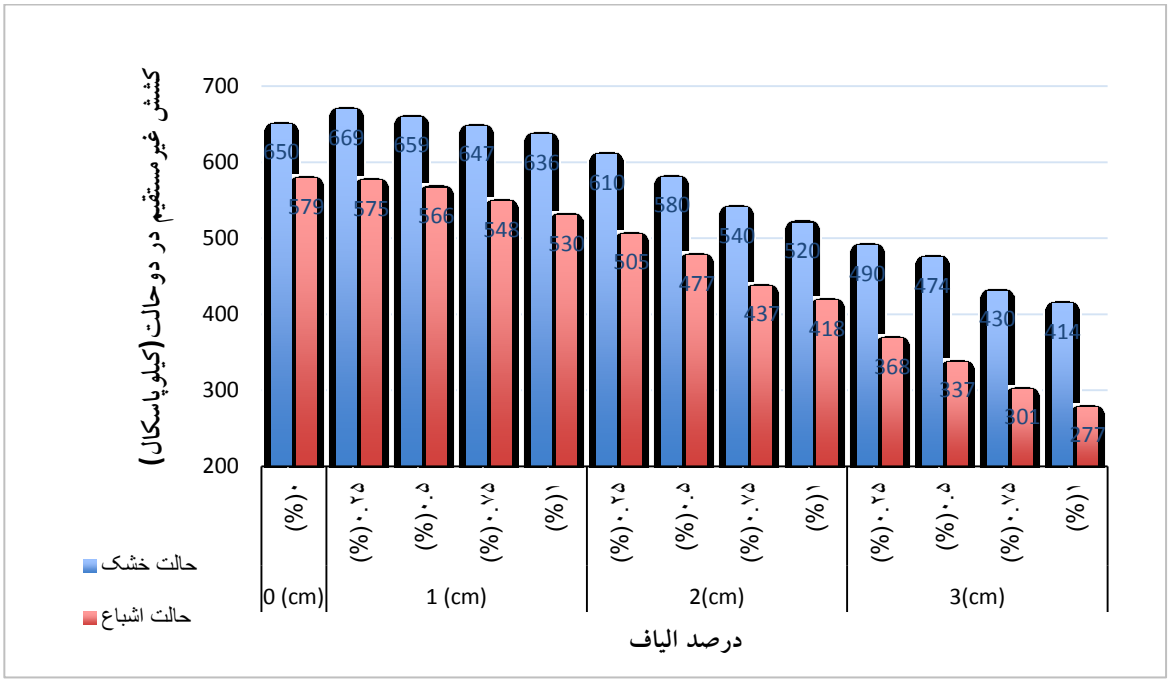
۳-۳. حساسیت رطوبتی

نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی نمونه‌های مختلف در شکل‌های ٦ و ۷ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد PET ابتدا مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت خشک و مرطوب افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این مسئله می‌تواند ناشی از کاهش ضخامت قیر در اطراف سنگ‌دانه‌ها به علت افزایش

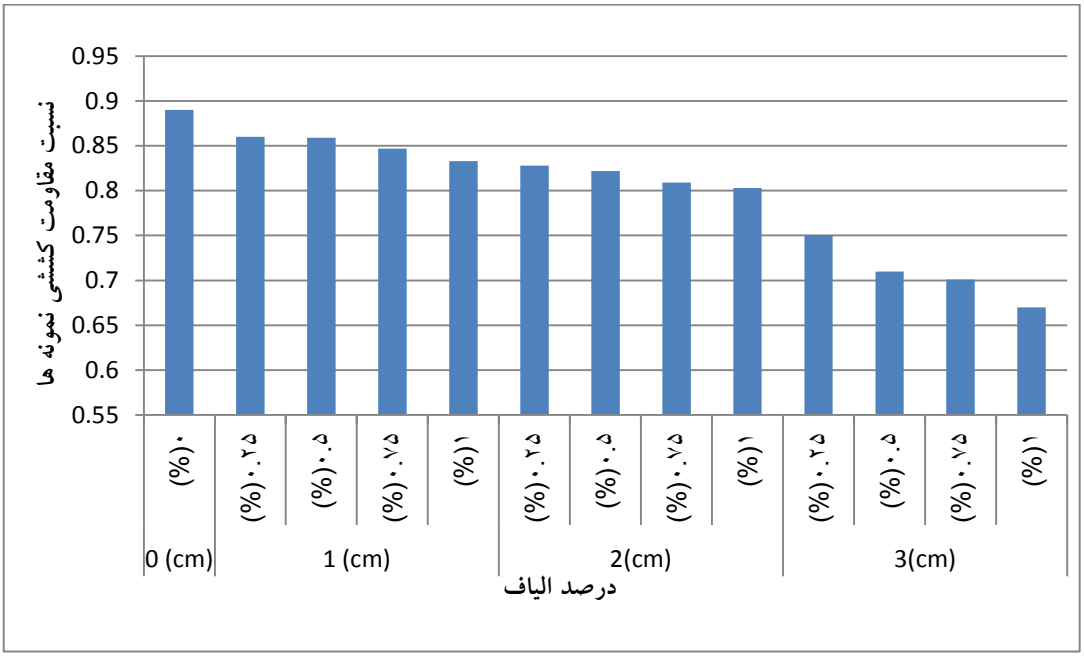
درصد و اندازه الیاف PET باشد که سبب کاهش مقاومت مخلوط‌ها گردد. همان طور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش درصد PET کاهش می‌یابد. با افزایش درصد PET، ضخامت قیر در اطراف سنگ‌دانه‌ها کاهش یافته و آب بین مصالح سنگی و قیر نفوذ کرده و نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.



شکل ۵. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم



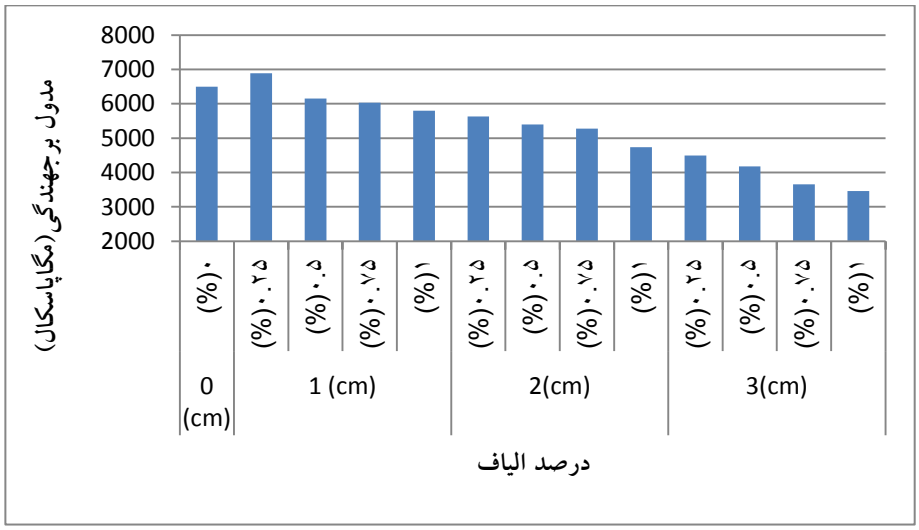
شکل ٦. مقاومت کششی نمونه‌ها در حالت خشک و اشباع



شکل ۷. نسبت مقاومت کششی نمونه‌ها

۳-٤. مدول برجهندگی

شکل ۸ نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس را در مقادیر مختلف PETنشان می‌دهد. همان طور که از شکل ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش درصد PET ، ابتدا مدول برجهندگی نمونه‌ها افزایش و با افزایش درصد بیشتر PET ، مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. با افزایش درصد PET، این ذرات جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌ها شده و بخشی از قیر را به خود اختصاص می‌دهند. علاوه بر کمتر بودن سختی ذرات PET نسبت به سختی سنگ‌دانه‌ها، کاهش ضخامت قیر در اطراف سنگ‌دانه‌ها که صرف پوشش ذرات PET شده‌اند نیز می‌تواند از عوامل کاهش سختی در مخلوط‌های حاوی مقادیر بیشتر PET باشد.



شکل ۸. نتایج آزمایش مدول برجهندگی

فعل و انفعالات بین قیر و مواد افزودنی در مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده می‌تواند تأثیر زیادی در رفتار مخلوط داشته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درصد مواد افزودنی، فعل و انفعال بین قیر و ماده افزودنی تغییر می‌کند. با افزایش درصد افزودنی، فاز پلیمری بیشتر حاکم شده و در درصد بهینه، فاز قیری و پلیمری به یکدیگر قفل و بست می‌شوند و خصوصیات مخلوط را بهبود می‌بخشند (سنگُز و ایسی‌کیاکار، ۲۰۰۸). در حالی که امکان ترکیب PET با قیر فراهم نیست، ولی اضافه شدن PET به مخلوط آسفالتی و فعل و انفعال با قیر در رفتار مخلوط اثر دارد. با اضافه شدن ذرات PET در مقادیر کم، فاز پلیمری و فاز قیری پیوستگی مناسبی دارند و باعث افزایش مقاومت و سختی مخلوط می‌شوند. در مقادیر بیشتر، وجود این ذرات فاز قیری را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند و باعث کمتر شدن فاز قیری می‌شوند که در نتیجه کاهش مقاومت و سختی مخلوط روی می‌دهد (مدرس و حامدی، ۱۳۹۵). مقادیر سختی کمتر مخلوط‌های اصلاح‌شده با PET ممکن است به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری مخلوط می‌باشد که منجر به تغییرشکل بیشتر مخلوط زیر بار اعمال‌شده می‌شود.

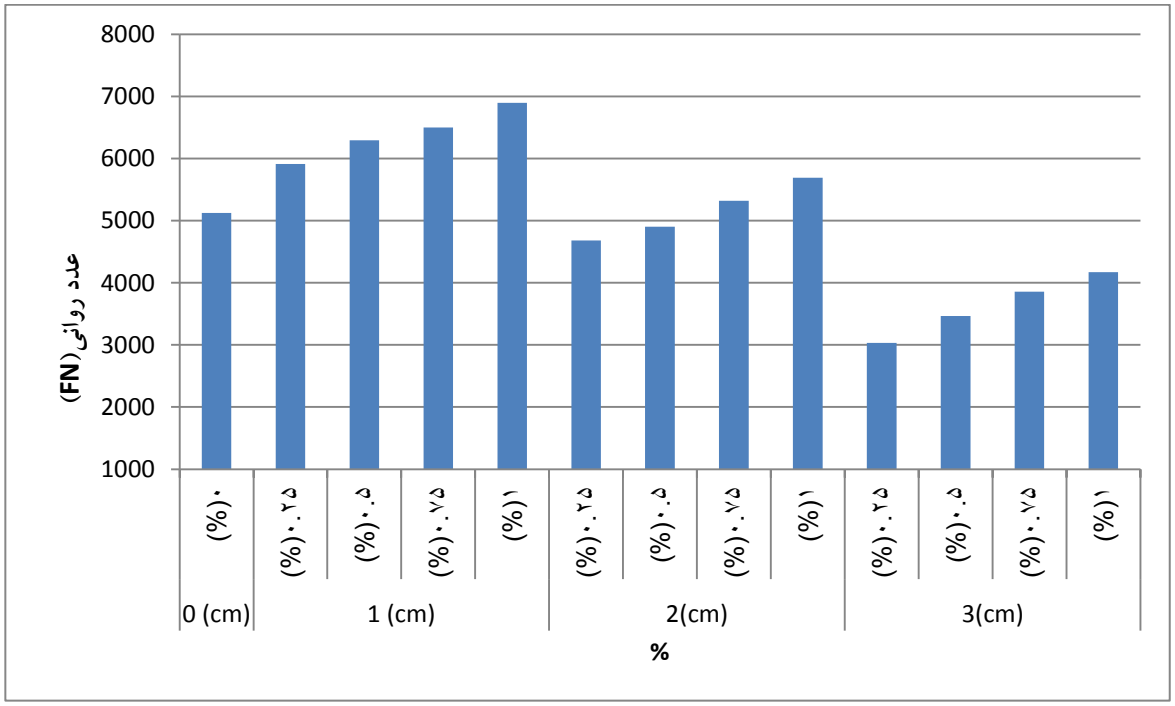
۳-۵. خزش دینامیک

نتایج آزمایش خزش دینامیک نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی PET در شکل ۹ آورده شده است. با توجه به نتایج، مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها با افزایش درصد PET به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در حالت کل، تغییرشکل دائمی نمونه‌ها با افزایش درصد PET کاهش می‌یابد. نمونه حاوی PET ۱٪ دارای کمترین کرنش تجمعی می‌باشد. علاوه بر این، با توجه به شکل ۹، عدد روانی نمونه‌ها با افزایش درصد PET افزایش می‌یابد. یکی از دلایل افزایش عدد روانی این است که با افزایش بارهای مکرر دینامیک، تنش‌های تولید شده از بارها توسط ذرات PET جذب شده و پدیده شیارشدگی در مخلوط آسفالتی به تعویق می‌افتد. بنابراین، در حالی که با افزایش درصد PET در مخلوط آسفالتی فاز قیری کمتر می‌شود، ولی این ذرات در جذب تنش‌های تولید شده مؤثر بوده و عدد روانی را افزایش می‌دهد. همان طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه الیاف، مقدار مقاومت در برابر شیارشدگی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

٤. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، به بررسی استفاده از الیاف تهیه شده از بطری‌های پلاستیکی موجود در زباله‌ها و استفاده از آن در بتن آسفالتی گرم پرداخته شده است. بدین منظور، بطری‌های پلاستیکی به ابعاد ۲/۵X ۱۰، ۲/۵X۲۰ و ۲/۵X۳۰ میلی‌متر بریده شده و با مقادیر ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱/۰ درصد از وزن مصالح سنگی با استفاده از روش خشک در نمونه‌ها به کار رفته‌اند. خصوصیات مکانیکی و عملکردی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده از طریق آزمایش‌هایی از قبیل مقاومت مارشال، مدول برجهندگی، حساسیت رطوبتی و خزش دینامیک مورد ارزیابی قرار گرفتند که خلاصه‌ای از نتایج در این بخش ارائه شده است:

- با افزایش درصد الیاف PET، مقاومت مارشال نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به طوری که با افزایش اندازه الیاف، مقاومت نمونه‌ها کاهش می‌یابد.
- با افزایش درصد الیاف PET، روانی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نسبت مارشال نمونه‌ها با افزایش درصد و اندازه الیاف نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۹. نتایج آزمایش خزش دینامیک

– با افزایش درصد PET، مقاومت کششی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در مقادیر بیشتر، PET درصدی از قیر را در اطراف خود نگه می‌دارد. این مسئله می‌تواند باعث کاهش ضخامت قیر در اطراف سنگ‌دانه‌ها شده و مقاومت کاهش یابد. همچنین، با افزایش درصد الیاف، حساسیت رطوبتی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

– با افزایش درصد PET، ابتدا مدول برجهندگی نمونه‌ها افزایش یافته و با درصد بیشتر PET، مدول برجهندگی کاهش می‌یابد. با افزایش درصد PET، این ذرات جایگزین بخشی از سنگ‌دانه‌ها شده و بخشی از قیر را به خود اختصاص می‌دهند.

– با افزایش درصد PET، تغییرشکل دائمی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. علاوه بر این، عدد روانی نمونه‌ها با افزایش درصد PET، افزایش می‌یابد.

۵. مراجع

مدرس، ا. و حامدی، ح. ر. ۱۳۹۵. "خصوصیات سختی و خستگی مخلوط آسفالتی اصلاح‌شده با ضایعات بطری‌های پلاستیکی (PET)". مهندسی حمل‌ونقل، ۵(٤).

عابدین مقانکی، ا. و گنجی‌دوست، ح. ۱۳۸۷. "استفاده از ضایعات پلاستیکی PET در مخلوط‌های آسفالتی". دومین همایش و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه تهران.

- زیاری، ح. و طباطبایی، س ع. و خبیری، م م. ۱۳۸۵، "راهنمای کاربردی آزمایشهای قیر و آسفالت". انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M. R., Abdelaziz, M. and Shafigh, P. 2011. Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt. J. Mater. Design, 32: 4844-4849.

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". Constr. Build. Mater., 36: 984-989.

Ahmed, L. A. 2007. "Improvement of Marshall properties of the asphalt concrete mixtures using the polyethylene as additive". Eng. Technol., 25(3): 383-394.

Arabani, M., Mirabdolazimi, S. M. and Sasani, A. R. 2010. "The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behavior of asphalt mixtures". Constr. Build. Mater., 24: 1060-1068.

Arabani, M., Mirabdolazimi, S. M. and Ferdowsi, B. 2012. "Modeling the fatigue behaviors of glasphalt". Sci. Iranica A, 19(3): 341-345.

Baghaee Moghaddam, T., Karim, M. R. and Syammaun, T. 2012. "Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles". Constr. Build. Mater., 34: 236-242.

Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M. and Karim, M. R. 2014a. "Evaluation of permanent deformation characteristics of unmodified and polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using dynamic creep test". Mater. Design, 53: 317-324.

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". Constr. Build. Mater., 65: 487-494.

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. Recy., 52: 1167-1174.

Chiu, C. T. and Lu, L. C. 2007. "A laboratory study on stone matrix asphalt using ground tire rubber". J. Constr. Build. Mater., 21: 1027-1033.

Damghani, A. M., Savarypour, G., Zand, E. and Deihimfard, R. 2008. "Municipal solid waste management in Tehran: Current practices, opportunities and challenges. Waste Manage., 28(5): 929-934.

Hassani, A., Ganjidoust, H. and Maghanaki, A. A. 2005. "Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement". Waste Manage. Res. 23: 322-327.

Huang, Y., Bird, R. N. and Heidrich, O. 2007. "A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements". J. Resour. Conserv. Recy., 52: 58-73.

Kök, B. V. and Çolak, H. 2011. "Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt". Constr. Build. Mater., 25: 3204-3212.

Li, J. M., Liu, C., Qiao, H. C., Zhu, L. Y., Chen, G. and Dai, X. D. 2008. "Hot embossing/bonding of a poly(ethylene terephthalate) (PET) microfluidic chip". J. Micromech. Microeng. http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/18/1/015008.

Li, Y., White, D. J. and Peyton, R. L. 1998. "Composite material from fly ash and post-consumer PET". Resour. Conserv. Recy., 24: 87-93.

Navarro, R., Ferrándiz, S., López, J. and Seguí, V. J. 2008. "The influence of polyethylene in the mechanical recycling of polyethylene terephtalate". J. Mater. Process. Technol., 195: 110-116.

Rahman, W. M. N. W. A. and Wahab, A. F. A. 2013. "Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified as- phalt". Proc. Eng., 53: 124-128.

Sengoz, B. and Isikyakar, G. 2008. "Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen". Constr. Build. Mater., 22: 1897-1905.

Vasudevan, R., Saravanavel, S., Rajesekaran, S. and Thirunakkarasu, D. 2006. "Utilisation of waste plastics in construction of flexible pavement". Indian Highways, 34(7): 5-20.