

بررسی مدول برجهندگی بتن آسفالتی حاوی ضایعات پلیمر PET

با استفاده از روش مدلسازی پاسخ سطح

مقاله علمی - پژوهشی

حسن طاهرخانی*، دانشیار، گروه راه و ترابری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
فرشاد سراوکی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه راه و ترابری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد زنجان، زنجان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: taherkhani.hasan@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵

صفحه ۴۴-۲۹

چکیده

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر پلیمر ضایعاتی PET بر مدول برجهندگی بتن آسفالتی، پلیمر ضایعاتی پلی اتیلن ترفتالات PET با دو اندازه مختلف ریز و درشت دانه و در مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸٪ (بر اساس وزن قیر) به بتن آسفالتی افزوده شده و مدول برجهندگی آن در دماهای ۵، ۲۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری گردید. روش سطح پاسخ در نرم افزار Design Expert برای طرح آزمایشها، ارایه مدل پیش بینی و بررسی اثر مستقل و متقابل متغیرها بر روی مدول برجهندگی مورد استفاده قرار گرفت. یک مدل درجه دو به خوبی به نتایج آزمایش برآزش گردید. نتایج تحلیل واریانس بیانگر قابلیت بالای مدل به دست آمده در پیش بینی مدول برجهندگی است. بر اساس نتایج آزمایش، دما، اندازه ذرات PET و مقدار PET بر روی مدول برجهندگی تأثیرگذار می باشد. میزان مدول برجهندگی با افزایش دما کاهش و با افزایش مقدار PET افزایش می یابد. همچنین، نتایج بیانگر افزایش جزئی مدول برجهندگی با افزایش اندازه ذرات است. نتایج تحلیل سطح پاسخ نشان می دهند که دما و مقدار PET اثر بر هم کنشی بر مدول برجهندگی دارند. به طوری که مقدار کاهش در مدول برجهندگی با افزایش دما در مخلوطهای حاوی مقدار PET بیشتر می باشد. اما، تأثیر متقابلی بین اندازه ذرات PET با دما و مقدار PET ملاحظه نگردید.

واژه های کلیدی: بتن آسفالتی، مدول برجهندگی، PET، روش سطح پاسخ

۱-مقدمه

برجهندگی برای طرح روسازی های آسفالتی نیز مورد نیاز می باشد. مدول برجهندگی نسبت تنش وارده به کرنش بازگشت پذیر تعریف می گردد. مقدار بیشتر مدول برجهندگی نشان دهنده سختی بیشتر می باشد. در دماهای بالا، مدول برجهندگی بالاتر نشان از مقاومت بیشتر در مقابل شیار شدگی بوده و در دماهای پایین مدول برجهندگی پایین تر مطلوب تر می باشد که منجر به

مدول برجهندگی یکی از خصوصیات مهم مخلوطهای آسفالتی است که در عملکرد سازه ای آن تأثیر بسیار زیادی دارد (Baghaee Moghadam et al., 2015, Al-Hadidy and Yi-qui, 2009). در تحلیل های الاستیک سازه های روسازی از مدول برجهندگی به عنوان مدول الاستیسیته لایه های آسفالتی و مصالح تثبیت نشده استفاده می گردد. همچنین، تعیین مدول

قیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که پلاستومرها مانند PET برای دماهای سرویس‌دهی بالا، مناسب هستند (Ameri et al., 2013; Modarres and Hamed, 2014b).

در چند سال اخیر، مطالعات مختلفی به قابلیت استفاده از پلیمر PET در مخلوط‌های آسفالتی پرداخته و خواص آنها را مطالعه نموده‌اند. بقائی‌مقدم و همکارانش به بررسی خصوصیات مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱ درصد وزن مصالح سنگی پرداختند و آزمایشات مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و همچنین آزمایشات تغییر شکل دائمی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی را انجام دادند. آنان نشان دادند که با افزایش مقدار PET، مقاومت مارشال و مقاومت کششی غیرمستقیم کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند که مخلوط‌های حاوی PET رفتار متفاوتی در مقابل بارگذاری استاتیکی و دینامیکی از خود نشان می‌دهند، به طوری که تحت بارگذاری استاتیکی، با افزایش مقدار PET مقدار کرنش دائمی افزایش می‌یابد، اما تحت بارگذاری دینامیکی با افزایش مقدار PET مقدار کرنش دائمی کاهش می‌یابد (Baghaee Moghaddam et al., 2014). احمدی‌نیا و همکارانش، خصوصیات حجمی و مکانیکی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA³) حاوی PET با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر را مورد آزمایش قرار دادند و مشاهده کردند که اضافه کردن PET، به میزان ۶ درصد وزن قیر بیشترین مقاومت و نسبت مارشال را نتیجه می‌دهد (Ahmadinia et al., 2011). در تحقیقی دیگر، احمدی‌نیا و همکارانش، آزمایشات رد چرخ، آسیب رطوبتی و مدول برجهندگی را بر روی مخلوط‌های آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر انجام دادند و نتایج آزمایش مدول برجهندگی نشان داد که، اضافه کردن PET تا مقدار ۶ درصد باعث افزایش مدول برجهندگی تا ۱۶ درصد بیشتر نسبت به نمونه کنترلی می‌شود. در نتیجه اضافه کردن PET به مخلوط باعث سخت‌تر شدن آن می‌شود. نتایج آزمایش ردچرخ که نشان دهنده‌ی مقاومت در برابر شیار افتادگی است، نشان داد که عمق شیار برای مخلوط حاوی ۴ درصد PET از 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

افزایش مقاومت به ترک خوردگی حرارتی می‌گردد. اهمیت مدول برجهندگی در دماهای میانی در مقاومت آن به ترک خوردگی خستگی است. بنابراین، در این تحقیق به بررسی این مشخصه از بتن آسفالتی پرداخته شده است.

حجم زیاد تولید مواد پسماند جامد به یکی از مشکلات اصلی در مدیریت شهری تبدیل شده است. یکی از مهمترین بخش‌های ضایعات جامد جوامع امروزی انواع پلاستیک‌ها هستند. از میان پلاستیک‌ها پلیمر پلی اتیلن ترافتالات (PET) مهمترین بخش از این ضایعات را تشکیل می‌دهند. پلیمر PET به مقدار زیادی در مصارف مختلف استفاده شده و بعد از مصرف به صورت ضایعات دور ریخته می‌شود. یکی از مهمترین کاربردهای این پلیمر در بطری‌های نوشیدنی‌ها و بسته‌بندی‌های 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, 2017). باقیمانده این ضایعات سوزانده، دپو، دفن یا در طبیعت رها می‌گردند که مشکلات زیادی را برای محیط زیست ایجاد می‌کند. بنابراین، با توجه به مشکلات زیست محیطی پلاستیک‌های ضایعاتی استفاده مجدد از آنها به شکلی سازگار با محیط زیست ضروری به نظر می‌رسد.

از طرف دیگر، صنعت روسازی حجم زیادی از منابع طبیعی را به صورت سنگدانه، قیر، سیمان و خاک مصرف می‌کند و سازگاری با محیط زیست در این صنعت در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. افزایش عمر مصالح روسازی و استفاده از مواد ضایعاتی در انواع مختلف مصالح روسازی در همین راستا می‌باشد. لاستیک‌ها و پلاستیک‌های ضایعاتی (PET) از جمله پلیمرهای ضایعاتی هستند که در مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده‌اند (Baghaee Moghaddam et al., 2012; Arabani et al., 2010; Xu et al., 2016). زمانی که مواد ضایعاتی پلیمری با سنگ‌دانه‌های داغ مخلوط می‌شوند، یک لایه نازک اطراف سنگ‌دانه تشکیل می‌دهند که باعث افزایش چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه می‌شود. در این حالت مقاومت مخلوط افزایش و درصد قیر کاهش می‌یابد. پلاستیک‌های ضایعاتی می‌توانند پیوستگی بین سنگ‌دانه‌ها را بهبود بخشند و باعث بهبود عملکرد مخلوط آسفالتی شوند (Lastra-Gonzalez et al., 2016). الاستومرها مانند لاستیک و SBS، معمولاً برای گسترش بیشترین و کمترین دماهای سرویس‌دهی

اصلی شامل انجام آزمایش‌هایی که به صورت آماری طرح شده اند، ارائه یک مدل برای پیش بینی پاسخ مورد نظر با کمک داده های آزمایشگاهی و تعیین کفایت مدل ارائه شده می‌باشد. روش سطح پاسخ می‌تواند مقادیر بهینه متغیرها را که مقدار حداقل یا حداکثری از پاسخ مورد نظر را ایجاد می‌کند پیدا کند. همچنین، می‌تواند اثر مستقیم و متقابل متغیرها بر روی پاسخ های مورد نظر را با کمک نمودارهای دو و سه بعدی ارائه کند. روش سطح پاسخ در مطالعات آزمایشگاهی در رشته‌های مختلف استفاده گردیده است. از این روش در سال‌های اخیر در مطالعات آسفالت استفاده گردیده است (Golchin and Mansorian, 2017; Hamzeh et al., 2015; Haghshenas et al., 2015; Nassar, Thom and Parry, 2016; Hamzeh, Gungat and Golchin, 2016). در این تحقیق، به دلیل اهمیت مشخصه مدول برجهندگی، این ویژگی از بتن آسفالتی حاوی ضایعات PET مورد بررسی قرار گرفته و اثرات مستقل و متقابل متغیرهای دما، درصد PET و اندازه ذرات PET بر روی مدول برجهندگی با کمک روش سطح پاسخ مورد مطالعه قرار گرفته است که تاکنون این موضوع توسط محققین قبلی انجام نگرفته است.

۲- مواد آزمایش و اختلاط

۲-۱- مشخصات مواد و مصالح مصرفی

در این تحقیق از قیر خالص عملکردی PG58-16 تولید شده توسط شرکت نفت پاسارگاد استفاده شد که مشخصات فنی لازم برای این نوع قیر را تامین می‌نمود. مصالح سنگی آهکی دولومیتی مورد استفاده در این تحقیق از شرکت نگین گستران راه زندیگان در شهر زنجان، تهیه شد. مشخصات فنی مصالح سنگی برای کنترل تامین الزامات آیین‌نامه‌های انجام گرفت که رضایت بخش بودند. همچنین، وزن مخصوص مصالح سنگی نیز اندازه گیری گردید تا در طرح اختلاط مورد استفاده قرار گیرد. دانه‌بندی شماره ۴ از آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر برای مصالح سنگی مخلوطها انتخاب گردید. 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 ۱ جدا گردیدند. شکل ۱ نیز ذرات PET ریز و درشت را نشان می‌دهد.

است. همچنین نتایج آزمایش ریزش قیر نشان داد که با افزایش مقدار PET مقدار ریزش قیر کاهش یافت (Ahmadinia et al., 2012). بقای مقدم و همکارانش، به بررسی خصوصیات دینامیکی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۰ درصد وزن مصالح سنگی با حداکثر اندازه ذرات ۲/۳۶ میلی‌متر پرداختند و دریافتند که سختی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. به طوری که کمترین سختی مربوط به بیشترین مقدار PET، یعنی ۱/۰ درصد وزن قیر می‌باشد. همچنین خصوصیات خستگی مخلوط‌های حاوی PET بطور قابل ملاحظه‌ای نسبت به مخلوط‌های کنترلی بهبود یافت (Baghaee Moghaddam et al., 2012). در مطالعه‌ای دیگر، بقای مقدم و همکارانش، آزمایش خزش دینامیکی را بر روی مخلوط آسفالتی ماستیک درشت‌دانه (SMA) حاوی PET با مقادیر ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱/۰ درصد وزن مصالح سنگی انجام دادند و دریافتند که خصوصیات تغییر شکل دائمی مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. به طوری که کرنش دائمی مخلوط‌های حاوی PET در تمامی تنش‌ها و دماها از نمونه‌ی شاهد (بدون PET) کمتر شده است (Baghaee Moghaddam et al., 2014). مدرس و حامدی، به بررسی سختی و خصوصیات خستگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی PET با مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد وزن قیر پرداختند و همچنین آزمایشات ITS و مدول برجهندگی را در 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 و همچنین اضافه کردن PET به میزان ۲ درصد وزن قیر، بیشترین مقاومت کششی و سختی را دارد (Modarres and Hamed, 2014a; Modarres and Heamed, 2014b).

استفاده از روش‌های تحلیل آماری کمک زیادی به درک اثرات متقابل متغیرهای مستقل بر روی متغیرهای وابسته می‌کند. به همین دلیل، اخیراً از روش‌های تحلیل آماری در مطالعات مربوط به روسازی رایج شده است. یکی از روش‌های آماری روش سطح پاسخ (RSM) می‌باشد، که مجموعه‌ای از ابزارهای آماری است برای طرح آزمایشها، ایجاد مدل‌های ریاضی، ارزیابی تاثیر متغیرهای آزمایش و بهینه سازی فرآیند (Kushwaha, Sirvastava and Mall, 2010). این روش دارای سه گام

مدت ۵ دقیقه با هم مخلوط شده و سپس ذرات PET اضافه گردید و به مدت ۲ دقیقه عمل اختلاط ادامه یافت تا PET و سنگدانه‌ها به‌طور کامل به قیر آغشته شدند (Ahmadinia et al., 2011, Ahmadinia et al., 2012).

۲-۳- آزمایش مدول بر جهندگی

در این تحقیق، آزمایش مدول بر جهندگی مطابق استاندارد ASTM D4123 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰ سانتیمتر و ضخامت تقریبی ۴ سانتی متر در سه دمای ۵، ۲۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد انجام گرفت. آزمایش با دستگاه UTM-10 انجام شد. نمونه‌ها ۴ ساعت قبل از شروع آزمایش در محفظه دستگاه قرار گرفته تا دمای آنها به‌طور یکنواخت به دمای آزمایش برسد. بارگذاری‌ها در جهت قطری به مقدار حدود ۱۵٪ مقاومت کششی آنها به‌در ۵ سیکل با فرکانس ۱ هرترز (۰/۱ ثانیه بارگذاری و ۰/۹ ثانیه استراحت) به نمونه‌ها اعمال شد. با استفاده از رابطه (۱) مقدار مدول بر جهندگی در هر سیکل بارگذاری محاسبه و میانگین ۵ سیکل به عنوان مدول بر جهندگی مورد استفاده قرار گرفت.

$$M_r = \frac{P(\nu + 0.2734)}{\delta t} \quad (1)$$

که در آن M_r مدول بر جهندگی بر حسب مگاپاسکال، P 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 با استفاده از رابطه (۲) تعیین گردید.

$$\nu = 0.15 + \frac{0.35}{1 + e^{(3.1849 - 0.0427T)}} \quad (2)$$

۲-۴- روش تحلیل

در این مطالعه، برای مدلسازی، تحلیل نتایج و تعیین اثر متغیرهای مختلف و برهم کنش آنها بر روی مدول بر جهندگی از روش سطح پاسخ (RSM) در نرم افزار Design Expert 10.0.7.0 استفاده گردید. این نرم افزار از روش‌های ریاضی و آماری برای تعیین بهترین مدل برای توصیف داده‌های پاسخ مربوطه استفاده می‌کند. در این نرم افزار، نمودارهای سه بعدی برای پاسخ‌های مورد مطالعه ارائه می‌شود که می‌توان نقطه بهینه را به راحتی از آن به دست آورد. طرح آزمایش با کمک نرم افزار Design Expert و استفاده از طرح مرکب مرکزی،

جدول ۱. اندازه ذرات PET به‌کاررفته در آزمایشات

اندازه الک (mm)	درصد عبوری (%)
مشخصات ذرات PET درشت	
۲/۳۶ (الک #۸)	۱۰۰
۱/۱۸ (الک #۱۶)	۵
مشخصات ذرات PET ریز	
۰/۶ (الک #۳۰)	۱۰۰
۰/۳ (الک #۵۰)	۵



شکل ۱. شکل ظاهری PET با دو اندازه مختلف

۲-۲- طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

مقدار قیر بهینه برای نمونه شاهد بر اساس طرح اختلاط مارشال، ۶ درصد به‌دست آمد. با توجه به مطالعات قبلی، مخلوط‌های حاوی PET دارای مقدار قیر بهینه برابر با نمونه شاهد هستند (Baghaee Moghaddam et al., 2014). برای این منظور استقامت مارشال، روانی مارشال و درصد هوای نمونه‌های حاوی PET محاسبه شد و با محدودیت‌های مشخصات فنی کنترل گردیدند. نمونه‌های آسفالتی، براساس روش مارشال با ارتفاع تقریبی ۶۷ میلی‌متر و قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر در شرایط آزمایشگاهی، طبق استاندارد ASTM D1559 ساخته شدند. نمونه‌ها با استفاده از چکش مارشال، با ۷۵ ضربه به هر طرف نمونه، با در نظر گرفتن شرایط ترافیک سنگین، متراکم شدند. به منظور مطالعه تأثیر اندازه و مقدار PET بر مشخصات مهندسی و مشخصات حجمی مخلوط‌های آسفالتی، PET در مقادیر ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد (بر اساس وزن قیر)، در دو اندازه ریز (مانده روی الک #۵۰) و درشت (مانده روی الک #۱۶) به نمونه‌های آسفالتی اضافه شد. در این تحقیق، بر اساس روش به کار رفته در تحقیقات قبلی، نمونه‌های حاوی PET به این صورت تهیه شدند که ابتدا قیر و سنگدانه‌ها به

مدول برجهندگی توسط نرم افزار بررسی گردیدند. جدول ۳ مقایسه مدل‌های خطی، برهمکنشی، درجه ۲ و درجه ۳ را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مدل درجه ۲ عملکرد بهتری داشته و توسط نرم افزار پیشنهاد گردیده است. برای کنترل کفایت مدل پیشنهاد شده از نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) در نرم افزار Design Expert استفاده گردید. نتایج این تحلیل در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مقدار p-value مدل کمتر از ۰/۰۰۰۱ می‌باشد که نشان می‌دهد مدل دارای اهمیت و اعتبار می‌باشد. مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵ نشان می‌دهد که مدل با بازه اطمینان ۹۵٪ برای پیش‌بینی پاسخ دارای اهمیت می‌باشد. همچنین، در این جدول نتایج تحلیل واریانس برای ترم‌های متغیرهای مستقل، برهمکنش آنها و مربع آنها ارائه گردیده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، ترم‌های A (دما)، B (درصد PET)، A²، B² و AB دارای p-value کمتر از ۰/۰۵ بوده و دارای اهمیت می‌باشند. ولی، ترم‌های C، AC و BC دارای مقدار p-value بیش از ۰/۰۵ بوده و مهم نمی‌باشند. بنابراین، می‌توان این ترم‌ها را از مدل حذف نمود. با این حال، در مدل انتخاب شده، به دلیل بررسی اثر اندازه ذرات PET پارامتر C در مدل پیشنهادی استفاده گردید. مدل انتخاب شده برای پیش‌بینی مدول برجهندگی بتن آسفالتی حاوی ذرات PET ریز دانه و درشت دانه، به ترتیب، در رابطه (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند. ضرایب رگرسیون این معادلات نشان می‌دهند که مدول برجهندگی با افزایش دما کاهش و با افزایش درصد PET افزایش می‌یابد. به منظور کنترل کفایت برازش مدل و ضرایب رگرسیون، مقادیر R²، R² تعدیل یافته، R² پیش‌بینی شده و کفایت دقت (Adequate Precision) محاسبه گردیدند که در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. مقادیر بالای R² و R² تعدیل یافته R²، نشان می‌دهد که تطبیق خوبی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی وجود دارد (Baghaee Moghadam et al., 2015). مقدار بالای کفایت دقت مدل پیش‌بینی مدول برجهندگی که ۱۰۳/۴۷ بوده و خیلی بیشتر از عدد ۴ می‌باشد نشان از دقت بالای مدل دارد (Olmez, 2009). همچنین، اختلاف خیلی کم R² پیش‌بینی شده و R² تعدیل یافته نیز دلالت بر مناسب بودن مدل برای پیش‌بینی مدول برجهندگی می‌باشد.

که محبوبترین روش طرح آزمایش در روش سطح پاسخ می‌باشد انجام گرفت که اجراهای مختلف ایجاد شده در جدول ۲ ارائه گردیده است. برای این کار، دو متغیر عددی شامل دما، در سه سطح ۵، ۲۵ و ۴۵ درجه سانتیگراد و مقدار پلیمر PET، در ۵ سطح ۰، ۲، ۴، ۶ و ۸٪، و یک متغیر رده ای شامل اندازه ذرات PET در دو سطح ریز و درشت به کار گرفته شد. مدول بر جهندگی بتن آسفالتی به عنوان پاسخ برای ارائه مدل پیش‌بینی استفاده گردید. معادله کلی (۳) برای محاسبه پاسخ مورد استفاده قرار گرفت.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

که در آن، Y پاسخ محاسبه شده، β_0 ثابت، x_i و x_j متغیرهای مستقل کد شده، β_i و β_{ii} ضرایب ترم‌های خطی و درجه دو می‌باشند و β_{ij} ضریب ترم برهمکنشی می‌باشد. ε خطای تصادفی و n تعداد متغیرهای مورد مطالعه می‌باشد. به منظور ارزیابی مناسب بودن مدل از تحلیل واریانس در نرم افزار Design Expert استفاده شد. بعد از ارزیابی مدل و ترم‌های آن، با حذف ترم‌های غیر مهم مدل نهایی گردید.

۳. نتایج و بحث

۳-۱- تحلیل واریانس مدل پیشنهادی

همانگونه که ذکر گردید، آزمایش مدول برجهندگی در دماهای مختلف بر روی بتن آسفالتی حاوی درصد‌های مختلفی از PET ریز و درشت انجام گرفت. نتایج آزمایش‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. با استفاده از نرم افزار Design Expert 10.0.7.0 روش سطح پاسخ به کار گرفته شد تا اثر متغیرهای دما، درصد PET و اندازه ذرات PET و برهم‌کنش آنها بر روی مقدار مدول برجهندگی بررسی شود و یک مدل مناسب که بتواند به خوبی مقدار مدول بر جهندگی را با استفاده از متغیرهای ورودی پیش‌بینی کند ارائه گردد. برای این کار بالاترین درجه از چند جمله ای که ترم‌های آن از نظر آماری مهم بوده و مدل از نظر نرم‌افزار نامطلوب نمی‌باشد استفاده گردید. مدل‌های مختلف خطی، بر همکنشی، درجه ۲ و درجه ۳ برای پیش‌بینی

جدول ۲. طرح آزمایش تحقیق

شماره آزمایش	فاکتور دما (A)	فاکتور درصد (B)PET	فاکتور اندازه (C)PET	مقدار پاسخ (مدول برجهنگی) -MPa
	درجه سانتیگراد	%		
۱	۲۵	۸	درشت	۳۶۵۵
۲	۲۵	۰	درشت	۳۳۹۸
۳	۵	۲	ریز	۱۷۴۲۹
۴	۲۵	۲	ریز	۳۳۷۱
۵	۵	۴	درشت	۱۸۲۹۹
۶	۴۵	۰	ریز	۷۲۶
۷	۵	۸	درشت	۱۷۵۷۸
۸	۵	۶	ریز	۱۸۵۷۸
۹	۴۵	۶	ریز	۷۹۶
۱۰	۴۵	۲	ریز	۷۰۸
۱۱	۲۵	۲	درشت	۴۰۷۱
۱۲	۴۵	۴	ریز	۷۰۷
۱۳	۴۵	۲	درشت	۷۷۵
۱۴	۲۵	۶	درشت	۳۸۸۰
۱۵	۲۵	۴	درشت	۳۸۸۷
۱۶	۲۵	۰	ریز	۳۳۹۸
۱۷	۵	۰	ریز	۱۶۳۹۷
۱۸	۵	۰	درشت	۱۶۳۹۷
۱۹	۵	۴	ریز	۱۷۵۰۵
۲۰	۴۵	۰	درشت	۷۲۶
۲۱	۵	۲	درشت	۱۷۹۶۶
۲۲	۴۵	۶	درشت	۷۷۵
۲۳	۴۵	۴	درشت	۸۲۵
۲۴	۴۵	۸	ریز	۶۶۱
۲۵	۲۵	۶	ریز	۴۰۰۹
۲۶	۲۵	۸	ریز	۳۳۰۰
۲۷	۵	۸	ریز	۱۷۲۷۸
۲۸	۲۵	۴	ریز	۳۲۶۹
۲۹	۴۵	۸	درشت	۷۰۹
۳۰	۵	۶	درشت	۱۸۵۷۲

$$M_r = 21850.35 - 1099.9A + 420.82B - 3.72AB + 13.86A^2 - 34.1B \quad (۴)$$

$$M_r = 22075.75 - 1099.9A + 420.82B - 3.72AB + 13.86A^2 - 34.1B \quad (۵)$$

جدول ۳. مقایسه مدل‌های مختلف

مدل آزادی	درجه	F-value	p-value	R ²	Adjusted R ²	Predicted R ²	عملکرد
خطی	۳	۵۷/۵۸	<۰/۰۰۰۱	۰/۸۷۱۱	۰/۸۵۶۲	۰/۸۳۴۳	مهم
برهمکنشی	۳	۰/۰۳۶	۰/۹۹۰۶	۰/۸۷۱۷	۰/۸۳۸۲	۰/۸۰۱۵	غیر مهم
درجه ۲	۲	۷۷۱/۶۸	<۰/۰۰۰۱	۰/۹۹۸۳	۰/۹۹۷۶	۰/۹۹۵۹	توصیه شده
درجه ۳	۶	۳/۴۲	۰/۰۲۴۸	۰/۹۹۹۳	۰/۹۹۸۶	۰/۹۹۷۱	نامطلوب

جدول ۴. نتایج آنالیز واریانس مدل و ترم‌ها

منبع	SE	DF	MS	F-value	Prob>f	عملکرد
مدل	1.63E+009	۸	2.037E+008	1521.53	<0.0001	مهم
A	1.42E+009	۱	1.421E+009	10613.29	<0.0001	مهم
B	7.19E+005	۱	7.19E+005	5.37	0.0307	مهم
C	1.63E+005	۱	3.81E+005	2.85	0.1064	غیر مهم
A ²	2.05E+006	۱	2.051E+005	1531.67	<0.0001	مهم
B ²	1.566E+006	۱	1.566E+006	11.69	0.0026	مهم
AB	8.866E+005	۱	8.866E+005	6.63	0.0177	مهم
AC	99828.45	۱	48.6	3.363E-004	0.985	غیر مهم
BC	48.6	۱	99828.45	0.75	0.3976	غیر مهم
باقیمانده‌ها	2.812E+006	۲۱	1.35E+005			
Cor total	1.63E+009	۲۹				

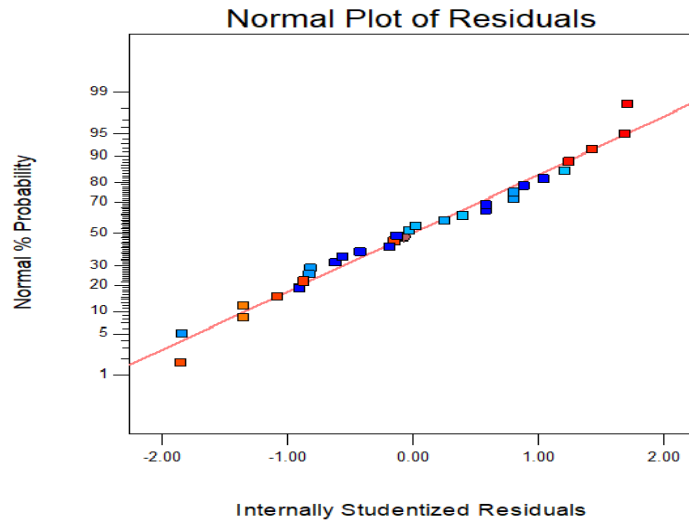
جدول ۵. ویژگی‌های مدل درجه ۲ پیشنهادی

شاخص	انحراف معیار	میانگین	ضریب تغییرات	R ²	R ² تعدیل شده	R ² پیش‌بینی کفایت دقت
مقدار	۳۵۵/۸۱	۷/۳۲۱۵	۴/۸۱	۰/۹۹۸۲	۹۹/۷۸	۰/۹۹۶۸

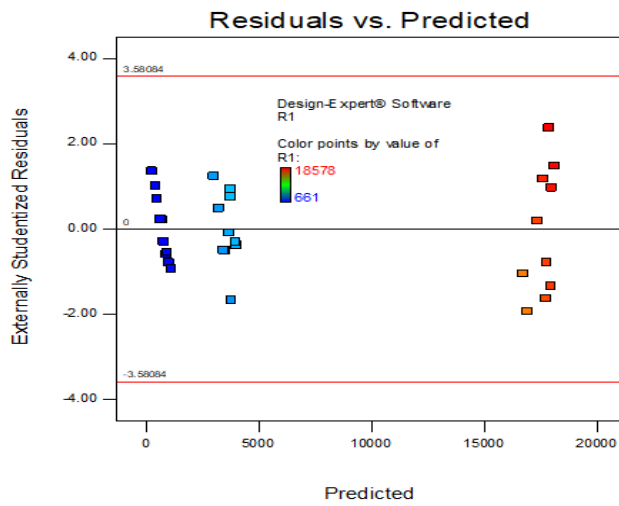
۳-۲- تحلیل باقی مانده‌ها و نمودارهای تشخیصی

توزیع نرمال دارند، که نشان می‌دهد مدل ارائه شده برای پیش بینی مدول برجهنگی بتن آسفالتی مناسب می‌باشد. شکل ۳ نیز نشان دهنده این است که باقی مانده‌ها به صورت پراکنده و بدون الگوی خاص توزیع شده‌اند. این نمودار بیانگر این است که افزایشی در باقی مانده‌ها با افزایش مقادیر پیش بینی شده دیده نمی‌شود. شکل ۴ نیز مقادیر پیش بینی شده توسط مدل را در مقابل مقادیر واقعی مدول برجهنگی نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مدل به خوبی می‌تواند مدول برجهنگی را پیش‌بینی نماید.

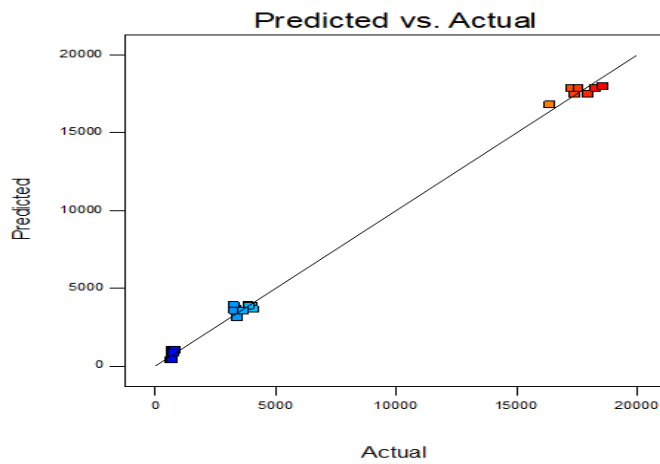
معمولاً دو نوع منحنی برای کنترل فرضیه توزیع نرمال خطاها استفاده می‌شود که شامل نمودار احتمال نرمال باقی مانده‌ها و نمودار باقی مانده‌ها در مقابل پاسخ پیش بینی شده می‌باشد. شکل ۲ و ۳ به ترتیب، احتمال نرمال باقی مانده‌ها و نمودار باقی مانده‌ها در مقابل پاسخ پیش بینی شده را نشان می‌دهند. فرضیه نرمال بودن با استفاده از نمودار احتمال نرمال کنترل می‌گردد. تبعیت از یک الگوی خطی نشان دهنده نمودار احتمال نرمال خوب و قابل قبول می‌باشد. همانگونه که در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد انحراف قابل توجهی از خط نرمال دیده نمی‌شود که نشان دهنده این است که خطاها



شکل ۲. نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها



شکل ۳. نمودار باقیمانده‌ها در مقابل پاسخ پیش بینی شده

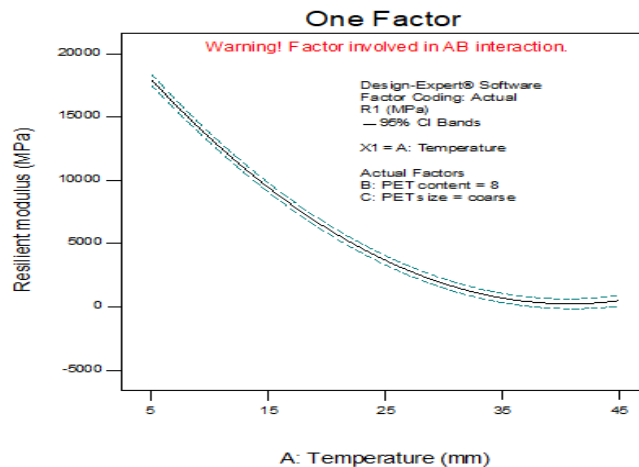


شکل ۴. مقادیر پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی

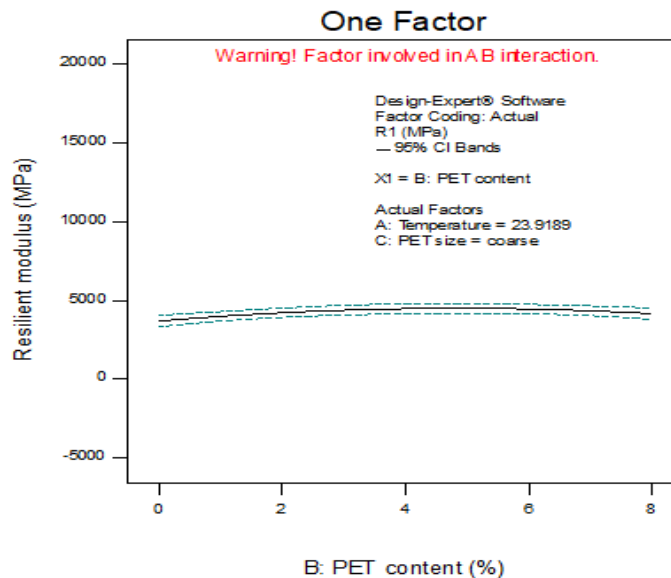
۳-۳- نتایج تحلیل تک متغیرها

اندازه ذرات PET نیز باعث افزایش جزیی در مقدار مدول برجهنگی می‌شود. به منظور درک بهتر نتایج، تابع مدول برجهنگی به دست آمده از تحلیل پاسخ با استفاده از نمودار اختلال ارزیابی گردید. این منحنی کمک می‌کند تا اثر همه متغیرها در یک نقطه معین در فضای طرح RSM مورد مقایسه قرار گیرند. نمودار اختلال نشان دهنده اثر تغییر یک فاکتور از نقطه مرجع، در حالی که فاکتور دیگر ثابت نگه داشته می‌شود، می‌باشد. شکل ۸ نمودار اختلال حاصل از این تحلیل را نشان می‌دهد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، افزایش دما باعث کاهش و افزایش مقدار PET باعث افزایش در مقدار مدول برجهنگی می‌شود.

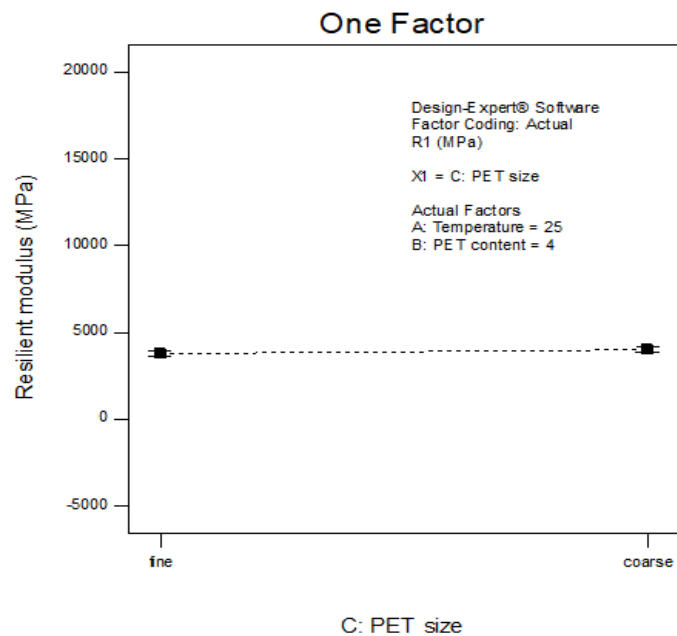
در تحلیل تک متغیر، تغییرات پاسخ بر حسب تغییر در یکی از متغیرها ارایه می‌گردد. این نمودارها برای حالتی که متغیرهای دیگر در مقدار مشخصی ثابت هستند ارایه می‌گردند. در این تحقیق، نمودارهای تغییر پاسخ بر حسب تک متغیرهای دما، مقدار PET و اندازه ذرات PET توسط نرم افزار ارایه گردیدند. شکل‌های ۵، ۶ و ۷، به ترتیب، تغییرات مدول برجهنگی بر حسب دما، مقدار PET و اندازه ذرات PET را ارایه می‌دهند. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، افزایش دما باعث کاهش قابل ملاحظه در مدول برجهنگی می‌گردد. شکل ۶ نیز نشان می‌دهد که افزایش درصد PET نیز باعث افزایش در مقدار مدول برجهنگی می‌شود. در شکل ۷ نیز ملاحظه می‌گردد که افزایش



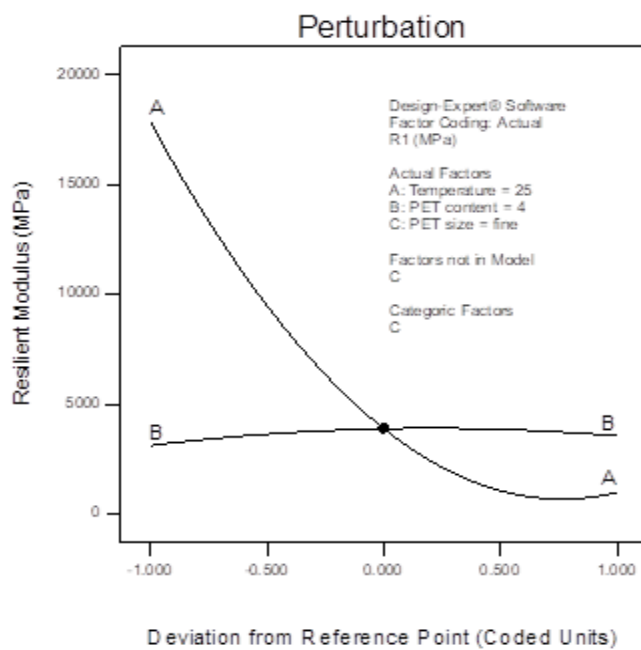
شکل ۵. اثرات تغییر دما بر مقدار مدول برجهنگی بتن آسفالتی



شکل ۶. اثر مقدار PET بر مقدار مدول برجهنگی بتن آسفالتی



شکل ۷. اثر اندازه PET در مقدار مدول برجهندگی بتن آسفالتی

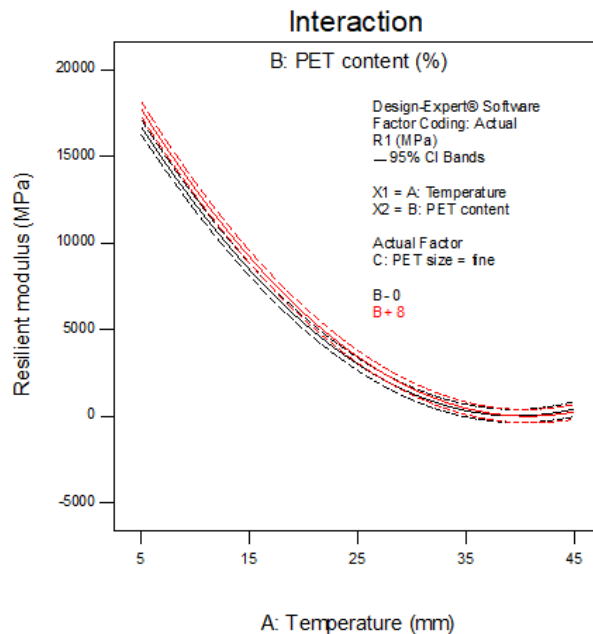


شکل ۸. نمودار اختلال تغییر مدول برجهندگی بر حسب متغیرها

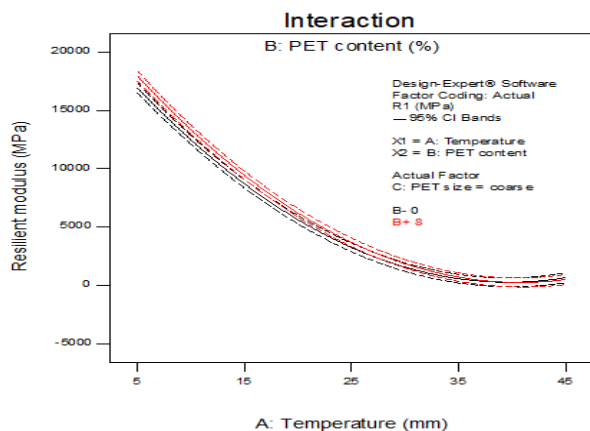
۳-۳- بر هم کنش متغیرها

شکل ۱۱-الف و ب، تصویر دو بعدی از تغییرات مدول برجهندگی را با تغییر دما و مقدار PET در مخلوط بتن آسفالتی، به ترتیب، حاوی ذرات PET درشت و ریز نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۱۲-الف و ب تصویر سه بعدی از تغییرات مدول برجهندگی را با دما و مقدار PET برای مخلوط‌های حاوی، به ترتیب، PET درشت و ریز را نشان می‌دهند. همانگونه که در این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد، مقدار مدول برجهندگی با افزایش دما کاهش و با افزایش PET به طور جزئی افزایش می‌یابد. اما، حساسیت مدول برجهندگی به دما خیلی بیشتر از آن به مقدار PET است. این شکل‌ها همچنین نشان می‌دهند که حساسیت مدول برجهندگی به دما در مخلوط‌های حاوی PET کمتر بیشتر می‌باشد. مقایسه شکل ۱۱-الف و ب نشان می‌دهند که میزان مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی PET درشت دانه کمی بیشتر از مدول برجهندگی مخلوط‌های حاوی PET ریز دانه است.

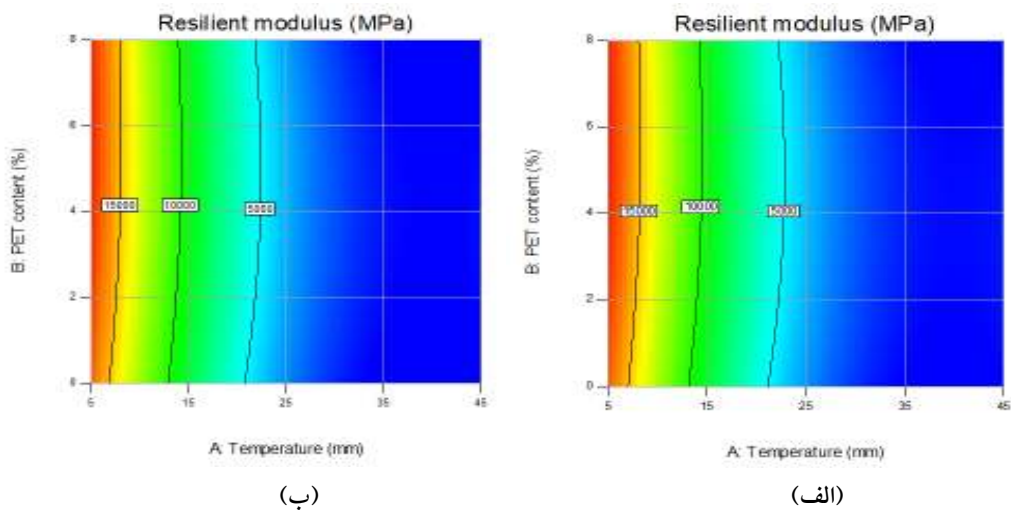
نتایج تحلیل واریانس نشان داد که بر هم کنش دما و اندازه PET و همچنین اندازه ذرات و مقدار PET در مخلوط اهمیت ندارند. این به این معنی است که تغییر مدول برجهندگی با دما یا مقدار PET به درشت یا ریز بودن ذرات PET بستگی ندارد. اما، نشان داده شد که دما و مقدار PET اثر متقابل بر پاسخ مدول برجهندگی دارند. شکل‌های ۹ و ۱۰، به ترتیب، نمودار بر هم کنش دما و مقدار PET در بتن آسفالتی را بر روی پاسخ مدول برجهندگی برای دو نوع مخلوط حاوی ذرات ریز و درشت PET نشان می‌دهد. در نمودارهای بر همکنش اگر منحنی تغییرات به موازات هم باشند نشان دهنده این است که دو فاکتور فاقد اثر بر هم کنشی هستند و اگر این منحنی‌ها موازی نباشند نشان دهنده این است که اثر یکی از متغیرها بستگی به سطح متغیر دیگر دارد. همانگونه که در شکل‌های ۹ و ۱۰ ملاحظه می‌گردد، نمودار تغییرات موازی نیستند و کاهش مدول برجهندگی با افزایش دما بستگی به مقدار PET در مخلوط دارد. این موضوع بیانگر این است که متغیرهای دما و مقدار PET اثر بر همکنشی بر مدول برجهندگی دارند. تفاوت در مدول برجهندگی مخلوط حاوی ۸٪ از PET و مخلوط فاقد PET در دماهای بالا کم بوده، اما در دماهای پایین این تفاوت قابل توجه است.



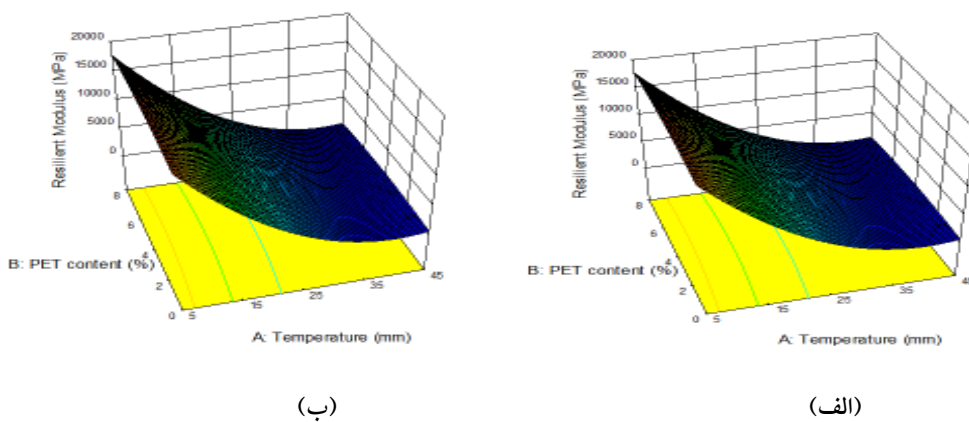
شکل ۹. اثرات متقابل دما و مقدار PET بر مدول برجهندگی بتن آسفالتی حاوی PET ریز دانه



شکل ۱۰. اثرات متقابل دما و مقدار PET بر مدول برجهدگی بتن آسفالتی حاوی PET درشت دانه



شکل ۱۱. نمودار دو بعدی تغییرات مدول برجهدگی با دما و مقدار PET، الف-بتن آسفالتی حاوی PET درشت دانه و ب- بتن آسفالتی حاوی PET ریز دانه



شکل ۱۲. نمودار سه بعدی تغییرات مدول برجهدگی با دما و مقدار PET، الف-بتن آسفالتی حاوی PET درشت دانه و ب- بتن آسفالتی حاوی PET ریز دانه

۴- نتیجه گیری

ethylene vinyl acetate modified bitumen and mixtures based upon performance related parameters". Construction and Building Materials, Vol. 40, pp. 438-447.

-Arabani, M., Mirabdolazimi, S. M., & Sasani, A. R. (2010) "The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures". Construction and Building Materials, Vol. 24, No. 6, pp. 1060-1068.

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

-Baghaee Moghaddam, T., Karim, M.R. and Abdelaziz, M., (2011), "A review on fatigue and rutting performance of asphalt mixes". Scientific Research and Essays, Vol. 6, No. 4, pp. 670-682.

-Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M. and Karim, M. R., (2015), "Stiffness modulus of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixture: A statistical analysis of the laboratory testing results", Materials and Design, Vol. 68, pp. 88-96.

-Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M., Karim, M. R., Hassan Baaj. H., (2015), "Optimization of asphalt and modifier contents for polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology. Measurement, Vol. 74, pp. 159-169

-Baghaee Moghaddam, T., Soltani, M. and Karim, M.R., (2014), "Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads". Construction and Building Materials, Vol. 65, pp. 487-494.

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

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

-Golchin, B. and Mansoorian, A., (2017), "Evaluation of Fatigue Properties of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Using Response Surface Method" International Journal of Transportation Engineering, Vol. 4, No. 4, pp. 335-350.

در این تحقیق، با کمک طرح آزمایش در روش تحلیل پاسخ،

مدول برجهندگی بتن آسفالتی گرم در دماها و مقدار PETهای مختلف در دو اندازه ریز دانه و درشت دانه تعیین شده و نتایج با روش تحلیل پاسخ در نرم افزار Expert Design 10.0.7.0 تحلیل شده و یک مدل پیش بینی مدول برجهندگی ارائه شد. نتایج این تحقیق به طور خلاصه به شرح زیر می باشد.

-مدول برجهندگی با افزایش دما کاهش و با افزایش مقدار PET در مخلوط افزایش می یابد.

-مدول برجهندگی بتن آسفالتی حاوی درصد های مختلف PET در دماهای مختلف با کمک یک مدل خطی بر همکنشی به خوبی قابل پیش بینی است.

-مدول بر جهندگی بتن آسفالتی اصلاح شده با PET درشت دانه تر بیشتر می باشد.

-مقدار PET و دما با اندازه دانه های PET اثر بر همکنشی بر مدول بر جهندگی ندارند. بدین معنی که روند تغییر مدول برجهندگی با مقدار PET و دما به اندازه دانه ها بستگی ندارد.

-مقدار PET و دما اثر متقابل در مقدار مدول بر جهندگی دارند، بدین معنی که تغییر مدول برجهندگی با دما به مقدار PET در مخلوط بستگی دارد. با افزایش مقدار PET در مخلوط کاهش مدول برجهندگی با دما نرخ بیشتری دارد.

-روش تحلیل پاسخ به خوبی برای تحلیل نتایج مدول برجهندگی مخلوط های حاوی PET به کار گرفته شد.

۵-مراجع

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

-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.

-Al-Hadidy Al, Yi-qiu T., (2009), "Mechanistic approach for polypropylene-modified flexible pavements", Journal of Materials and Design; Vol. 30, pp.1133-40.

-Ameri, M., Mansourian, A., & Sheikhmotevali, A. H., (2013), "Laboratory evaluation of

- Nassar, A.I, Thom, N., and Parry T. (2016), "Optimizing the mix design of cold bitumen emulsion mixtures using response surface methodology", *Construction and Building Materials*, Vol. 104, pp. 216-229.
- Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M. A., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, Á., & Indacochea-Vega, I., (2016), "Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste". *Construction and Building Materials*, Vol. 112, pp. 1133-1140.
- Modarres, A., & Hamed, 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., & Hamed, 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.
- Ölmez T., (2009), "The optimization of Cr (VI) reduction and removal by electrocoagulation using response surface methodology, *Journal of Hazardous Materials*, Vol.162, pp.1371-1378.
- Soltani, M., Baghaee Moghaddam, T., Karim, M. R, Baaj H., (2015), "Analysis of fatigue properties of unmodified and polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 58, pp. 238-248.
- Xu, O., Xiao, F., Han, S., Amirhanian, 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.
- Haghshenas, H., Khodaii A., Khedmati M. and Tapkin S., (2015), "A mathematical model for predicting stripping potential of hot mix asphalt", *Construction and Building Materials*, Vol. 75, pp.488-495.
- Hamzah M.O., Omranian S. R., Golchin B. and Hainin M.R.H., (2015), "Evaluation of effects of extended short-term aging on the rheological properties of asphalt binders at intermediate temperatures using respond surface method", *Jurnal Teknologi* , Vol 73 , No 3, pp. 133-139.
- Hamzah, M. O., Gungat L. and Golchin B. (2016), "Estimation of optimum binder content of recycled asphalt incorporating a wax warm additive using response surface method", *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-11.
- Kavussi A, Qorbani M, Khodaii A, Haghshenas H. F., (2012), "Moisture susceptibility of warm mix asphalt: a statistical analysis of the laboratory testing results", *Construction and Building Materials*, Vol. 52, pp.511-517.
- Khodaii A, Haghshenas H. F, Kazemi Tehrani H., (2012), "Effect of grading and lime content on HMA stripping using statistical methodology, *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp.131-135.
- Khodaii, A., Haghshenas, H. F., Kazemi Tehrani, H., Khedmati, M., (2013), "Application of response surface methodology to evaluate stone matrix asphalt stripping potential" *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.17, pp. 117-121.
- Kushwaha, J. P, Srivastava, V. C and Mall I. D., (2010), "Organics removal from dairy waste water by electrochemical treatment and residue disposal", *Sep Purif Technol*, Vol. 76, pp. 198-205.

Evaluation of the Resilient Modulus of Asphalt Concrete Containing Waste PET Using Response Surface Methodology (RSM)

*Hasan Taherkhani, Associate Professor, University of Zanjan, Zanjan, Iran.
Farshad Saravaki, M.Sc., Grad., Department of Transportation Engineering, Islamic Azad University of Zanjan, Iran.*

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

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

This research aimed to investigate the effects of using waste polyethylene terephthalate (PET) on the resilient modulus of asphalt concrete. To this end, waste PET was added into asphalt concrete at different dosages of 0, 2, 4, 6 and 8% (by the weight of binder) and the resilient modulus of the mixtures was evaluated at different temperatures of 5, 25 and 45°C. Coarse and fine PET particles were added into asphalt concrete. Response surface methodology in Design Expert software was utilized for designing of experiments, developing a model for prediction of resilient modulus and evaluating the main and interaction effects of different factors on the resilient modulus of asphalt concrete. A polynomial model was well fitted to the test results relating temperature and PET content to the resilient modulus. Analysis of variance in Design Expert software implies that the model is highly capable for prediction of resilient modulus. Temperature, PET content and PET size are found to be effective on the resilient modulus. The resilient modulus of the mixtures was found to increase with increasing PET size and content, while it decreases with increasing temperature. However, the decrease of resilient modulus with PET size is not significant. It was found that there is no interaction between temperature and PET content with PET size, while interaction effect was found between temperature and PET content. Higher reduction of resilient modulus with increasing temperature was found to be in the mixtures containing higher PET content.

Keywords: Asphalt Concrete, PET, Resilient Modulus, Response Surface Methodology