

بهینه‌سازی پارامتر شیارشدگی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک با استفاده از روش

سطح پاسخ (RSM)

مقاله پژوهشی

نادر صولتی فر*، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه

رضا آزاده‌دل، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه

محسن خلیلی، دانش‌آموخته کارشناس ارشد، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه شیراز، شیراز

مقصود رهبرنیا، دانش‌آموخته کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز

*نویسنده مسئول، ایمیل: n.solatifar@urmia.ac.ir

صفحه ۲۵۸-۲۴۵

چکیده

اصلاح قیر با افزودنی‌های مختلف یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای بهبود رفتار آن است. یکی از افزودنی‌های مورد استفاده در اصلاح قیر پودر لاستیک است که موجب افزایش مقدار مقاومت شیارشدگی قیر می‌شود. هدف از انجام این پژوهش شناسایی فاکتورهای مؤثر بر روی خصوصیات مقاومتی قیر در برابر شیارشدگی و بهینه‌سازی این پارامتر با انجام مدل‌سازی در دمای ۶۴ درجه سلسیوس با استفاده از پودر لاستیک می‌باشد. برای این منظور از روش بهینه طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ (RSM) با در نظر گرفتن چهار فاکتور شامل دمای اختلاط، زمان اختلاط، سرعت اختلاط و درصد وزنی پودر لاستیک و نیز یک پاسخ، پارامتر شیارشدگی با تولید ۳۰ نمونه قیر اصلاح شده بهره گرفته شده و آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR) روی نمونه‌های پیر نشده انجام شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌سازی‌های انجام شده از دقت خوبی برخوردار بوده و فاکتور درصد وزنی برای پارامتر شیارشدگی از سایر فاکتورها و برهم‌کنش آنها مؤثرتر می‌باشد. همچنین برای بهینه‌سازی پارامتر شیارشدگی، با در نظر گرفتن سرعت و دمای اختلاط در سطح پایین و زمان اختلاط در سطح بالا، می‌توان به بیشترین مقدار این پارامتر در درصد وزنی مشخص پودر لاستیک دست یافت.

واژه‌های کلیدی: قیر اصلاح شده با پودر لاستیک، رئولوژی قیر، شیارشدگی، طراحی آزمایش، روش سطح پاسخ (RSM)

۱- مقدمه

روسازی آسفالتی در برابر تغییر شکل‌های دائم^۱ (شیارشدگی)، ترک‌های ناشی از خستگی^۲ و ترک‌های حرارتی در دمای پایین^۳ است. در این میان ضروری است پیشرفت و بهبودی که حاصل استفاده از اصلاح‌کننده‌ها می‌باشد، توسط آزمایش‌هایی برای ارزیابی مقاومت روسازی در برابر خرابی‌های مذکور مورد بررسی قرار گیرد (Subhy, 2017). پژوهشگران برای اصلاح رفتار مکانیکی و رئولوژیکی قیرهای خالص، از انواع مواد افزودنی مختلف همچون

لایه‌های آسفالتی نقش مهمی در محافظت از سازه راه و انتقال تنش‌های ناشی از بارگذاری به لایه‌های پایینی روسازی دارند. کیفیت این لایه‌ها تعیین کننده ضریب ایمنی و راحتی استفاده‌کنندگان از راه است (Shafabakhsh et al., 2015). در سال‌های اخیر با توجه به افزایش چشمگیر بارهای ترافیکی، اصلاح قیرهای خالص به منظور بهبود خواص قیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هدف استفاده از مواد افزودنی در اصلاح قیرهای خالص، افزایش مقاومت

افزایش و زاویه فاز کاهش می‌یابد. افزایش مقدار $G^*/\sin\delta$ باعث مقاومت بیشتر قیر اصلاح شده با پلیمر پودر لاستیک نسبت به قیر خالص در برابر خرابی شیارشدگی شده است. همچنین با افزایش درصد پودر لاستیک، ضریب شیارشدگی نیز افزایش یافته است (Aflaki and Tabatabaee, 2009; Al-Khateeb and Ramadan, 2015; Behnood and Olek, 2017; Chen *et al.*, 2019; Fini *et al.*, 2017; Kim, Lee and Amirkhani, 2010; Liu *et al.*, 2018; Venudharan and Biligiri, 2017; Venudharan, Biligiri and Das, 2018; D. Wang *et al.*, 2018). از سوی دیگر با کاهش مقدار $G^*.\sin\delta$ در دماهای متوسط مقاومت قیر در برابر ترک‌های ناشی از خستگی نیز افزایش می‌یابد (Aflaki and Tabatabaee, 2009; Behnood and Olek, 2017; Fini *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2018). انجام آزمایش رئومتر تیرچه خمشی^v (BBR) نشان داده است سختی[^] قیر اصلاح شده با پلیمر پودر لاستیک کمتر از قیر خالص است که می‌توان نتیجه گرفت مقاومت قیر اصلاح شده در برابر ترک‌های حرارتی بیشتر از قیر خالص می‌باشد (Aflaki and Tabatabaee, 2009; Behnood and Olek, 2017; Fini *et al.*, 2017; Hajikarimi, Aflaki and Hoseini, 2013; H. Wang *et al.*, 2012). در مجموع می‌توان دریافت که افزودن پودر لاستیک باعث افزایش مقدار ویسکوزیته، افزایش مقاومت شیارشدگی، افزایش مقاومت خستگی و کاهش سختی قیر خالص می‌شود.

پلیمرها، نانومواد و ... بهره جسته‌اند. با اضافه کردن مواد افزودنی به قیر خالص هزینه‌ها به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین در اجرای هر پروژه راهسازی باید عوامل متعددی نظیر وضعیت آب و هوایی منطقه، بار ترافیک عبوری از مسیر، عمر مفید مورد انتظار و نحوه عملکرد روسازی مورد ارزیابی قرار گیرد تا بتوان در مورد توجیه فنی و اقتصادی استفاده از قیرهای اصلاح شده تصمیم مناسبی اتخاذ نمود. پودر لاستیک یکی از مواد افزودنی پلیمری است که از ضایعات تایر خودروها به دست می‌آید که علاوه بر بهبود خواص قیر، در حفظ محیط زیست نیز کمک شایانی دارد. تایر ضایعاتی از سه جزء اصلی لاستیک، الیاف و استیل تشکیل شده است. برای اصلاح قیر از جزء لاستیک که در حدود ۶۰ درصد وزنی تایر را تشکیل می‌دهد، استفاده می‌شود (Thodesen, Shatanawi and Amirkhani, 2009). ارزیابی رفتار قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک با درصدهای وزنی مختلف و همچنین روش اختلاط متفاوت توسط پژوهشگران مختلف در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج آزمایش‌های مختلف عملکردی روی قیرهای اصلاح شده نشان از بهبود خواص قیرها داشته است؛ برای نمونه نتایج آزمایش رئومتر برشی دینامیکی[^] (DSR) نشان می‌دهد افزودن پلیمر پودر لاستیک به قیر خالص باعث افزایش مدول برشی مرکب[^] (G^*) و کاهش زاویه فاز[^] (δ) می‌شود. همچنین با افزایش درصد پودر لاستیک مدول برشی مرکب

جدول ۱. درصدهای وزنی، قیر پایه و روش اختلاط مورد استفاده در اصلاح قیر با پودر لاستیک توسط پژوهشگران مختلف

روش اختلاط			قیر پایه	درصد محتوی	محققین
زمان (min)	سرعت (rpm)	دما (°C)			
۲۴۰	۵۵۰۰	۱۷۰	PG 58-22	۱۶ و ۱۴، ۱۰	افلاکی و طباطبایی، ۲۰۰۹ (Aflaki and Tabatabaee, 2009)
۴۵	اختلاط مکانیکی	۱۷۷	PG 64-22	۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵	ونگ و همکاران، ۲۰۱۲ (H. Wang et al., 2012)
۱۰	بیشترین سرعت	۱۸۰	۶۰/۷۰	۲/۵، ۵، ۷/۲۵ و ۱۰	الخطیب و رامادان، ۲۰۱۵ (Al-Khateeb and Ramadan, 2015)
۲۴۰	۵۵۰۰	۱۷۰	PG 58-22	۱۶ و ۱۴، ۱۰	حاجی کریمی و همکاران، ۲۰۱۳ (Hajikarimi, Aflaki and Hoseini, 2013)
۲۰	۴۰۰۰	۱۵۰	PG 64-22	۱۶ و ۱۲، ۸	بهنود و اولک، ۲۰۱۷ (Behnood and Olek, 2017)

۳۰	۳۰۰۰	۱۸۰	PG 64-22	۱۵	فینی و همکاران، ۲۰۱۷ (Fini et al., 2017)
۹۰	۲۰۰۰	۱۸۰-۱۷۰	VG 40	۳۰ و ۲۰، ۱۰	ونودهاران و همکاران، ۲۰۱۸ (Venudharan, Biligiri and Das, 2018)
۹۰	۲۰۰۰	۱۸۰-۱۷۰	VG 40,30	۲۰	ونودهاران و بیلگیری، ۲۰۱۷ (Venudharan and Biligiri, 2017)
۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰	-	۱۸۰	¹ BB و ¹ BC	۲۰ و ۱۷، ۱۶	تیوس و همکاران، ۲۰۱۳ (Thives et al., 2013)
۶۰	-	۱۸۰	۷۰/۱۰۰	۱۵ و ۱۰، ۵	سینکویچ و همکاران، ۲۰۱۷ (Sienkiewicz et al., 2017)
۳۰	۵۰۰۰	۱۸۰	۶۰/۸۰	۱۵	لیو و همکاران، ۲۰۱۸ (Liu et al., 2018)
۶۰	۷۰۰	۱۷۰	PG 64-22	۲۰ و ۱۵، ۱۰	کیم و همکاران، ۲۰۱۰ (Kim, Lee and Amirkhanian, 2010)
۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰	۷۰۰	۱۷۷	PG 64-22	۱۲	چن و همکاران، ۲۰۱۹ (Chen et al., 2019)
۶۰	۱۰۰۰۰	۱۸۰	۶۰/۷۰	۲۰	ونگ و همکاران، ۲۰۱۸ (D. Wang et al., 2018)

هم‌زمان آزمایش شوند (Montgomery, 2017). طراحی آزمایش در این پژوهش بر اساس روش طراحی مرکب مرکزی^{۱۴} (CCD) که یکی از پرکاربردترین روش‌های سطح پاسخ (RSM) بوده و به عنوان روش بهینه طرح آزمایش اصلاح قیر با پودر لاستیک معرفی شده است (Azadedel and Solatifar, 2018)، انجام گرفته است. روش سطح پاسخ (RSM) یکی از روش‌های بهینه‌سازی آزمایش‌ها است. منظور از بهینه‌سازی، یافتن سطوحی از فاکتورهای مؤثر برای آزمایش است که پاسخ آزمایش حداکثر و یا حداقل (بسته به هدف آزمایش) شود. در روش سطح پاسخ اثر برهم‌کنش فاکتورها نیز لحاظ می‌شود. این روش شامل طراحی مرکب مرکزی (CCD) و طراحی باکس بنکن^{۱۵} (BBD) است (Bezerra et al., 2008; Myers, 2016). تعداد آزمایش‌ها برای طراحی مرکب مرکزی از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$Run = 2^f + (2f + 1) + r \quad (1)$$

که در آن Run تعداد آزمایش، f تعداد فاکتور و r تعداد تکرار است. طراحی آزمایش در پنج سطح ($-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$) می‌باشد که ± 1 همان سطوح بالا و پایین، صفر نقطه

برای بررسی رفتار قیر اصلاح شده با پودر لاستیک در برابر پارامترهای عملکردی و خرابی‌های ناشی از بارگذاری و شرایط محیطی، نیاز به انجام آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف افزودنی در شرایط متفاوت آزمایش است. در این پژوهش برای بررسی اثر هر یک از عوامل کمی شامل دمای اختلاط، سرعت اختلاط، زمان اختلاط و درصد وزنی پودر لاستیک بر روی پارامتر شیارشدگی قیر، از روش طراحی آماری آزمایش سطح پاسخ^{۱۱} (RSM)، روش مرکب مرکزی با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert^{۱۲} استفاده شده و در انتها اثر هر یک از عوامل ذکر شده بر روی پاسخ تحلیل و بهینه‌سازی پارامتر شیارشدگی انجام شده است.

۲- توسعه مدل روش سطح پاسخ

طراحی آماری آزمایش شامل مجموعه‌ای از آزمایش‌هایی می‌شود که به طور آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند، تغییراتی ایجاد می‌گردد تا از این طریق میزان تغییرات حاصل در پاسخ خروجی فرآیند مشاهده و شناسایی شود. در طراحی آزمایش^{۱۳} (DOE)، آزمایش‌ها به گونه‌ای طرح‌ریزی می‌شود که به منظور رسیدن به پاسخ، فاکتورها به صورت

سطوح دلخواه، تعیین سهم خطا و امکان به دست آوردن هم‌زمان شرایط بهینه برای چندین پاسخ اشاره نمود. برای ارزیابی رفتار قیر اصلاح شده با پودر لاستیک برای چهار فاکتور دمای اختلاط، زمان اختلاط، سرعت اختلاط و درصد وزنی افزودنی با پنج تکرار که سطح بالا و پایین آنها در جدول ۲ آمده است، تعداد آزمایش‌ها بر اساس رابطه ۱، برابر ۳۰ آزمایش می‌باشد. شایان ذکر است این چهار فاکتور و سطوح بالا و پایین آنها از جمع‌بندی پژوهش‌های اشاره شده در جدول ۱ به دست آمده است.

مرکزی و $\pm\alpha$ برای تعداد دو فاکتور برابر $\pm 1/41$ ، برای تعداد سه فاکتور برابر $\pm 1/68$ ، برای تعداد چهار فاکتور برابر ± 2 و برای دیگر فاکتورها از رابطه ۲ به دست می‌آید.

$$\alpha = \pm \sqrt[4]{2f} \quad (2)$$

که در آن f تعداد فاکتورها است (Bezerra et al., 2008). از مزایای روش سطح پاسخ می‌توان به کاهش تعداد آزمایش‌ها، ساده‌سازی یک مسئله پیچیده به یک مسئله ساده‌تر، مشخص کردن حساسیت پاسخ در برابر هر فاکتور، امکان تخمین نتایج در شرایط بهینه، امکان تخمین نتایج در

جدول ۲. فاکتورهای طراحی آزمایش

فاکتور	نام	واحد	سطح $+\alpha$	سطح بالا (+1)	سطح مرکزی	سطح پایین (-1)	سطح $-\alpha$
A	دمای اختلاط	°C	۱۹۰	۱۸۰	۱۷۰	۱۶۰	۱۵۰
B	زمان اختلاط	min	۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰
C	درصد وزنی پودر لاستیک	%	۱۰	۸	۶	۴	۲
D	سرعت (فرکانس) اختلاط	Hz	۱۰۰	۸۶	۷۱	۵۷	۴۲

فاکتورها را نیز مد نظر قرار داده و از رابطه ۳ به دست می‌آید.

مدل استفاده شده در طراحی مرکب مرکزی مدل درجه دو (Quadratic) است که علاوه بر در نظر گرفتن فاکتورهای اصلی و برهم‌کنش دوتایی فاکتورها، درجه دوم

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

که در رابطه بالا، y پاسخ، x فاکتورها، β ضرایب، k تعداد فاکتورها و ε خطا است (Bezerra et al., 2008).

۳-۱- قیر پایه

قیر پایه مورد استفاده در این پژوهش، قیر ۸۵/۱۰۰ تولیدی شرکت پالایش و انرژی شمالغرب آرکا (تبریز) بوده است. آزمون‌های کلاسیک روی این قیر که شامل آزمایش‌های درجه نفوذ، نقطه اشتعال، کشش پذیری، نقطه نرمی و حلالیت در تتراکلرواتیلن می‌باشد، انجام گرفته و نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

۳- برنامه آزمایشگاهی

نمونه‌ها مطابق با شرایط طراحی آماری آزمایش با روش طراحی مرکب مرکزی، به تعداد ۳۰ نمونه ۵۰۰ گرمی تهیه شده است. مشخصات قیر پایه مورد استفاده، افزودنی پودر لاستیک، روش اختلاط و نیز آزمایش ارزیابی شیارشدگی در ادامه تشریح شده است.

جدول ۳. نتایج آزمون‌های کلاسیک قیر خالص ۸۵/۱۰۰ مورد استفاده در پژوهش حاضر

مقدار	واحد	استاندارد	آزمون
۸۷	۰/۱ mm	ASTM D5 (ASTM, 2013)	درجه نفوذ در ۲۵°C
۲۹۴	°C	ASTM D92 (ASTM, 2018)	نقطه اشتعال (ظرف روباز کلیولند)
>۱۰۰	cm	ASTM D113 (ASTM, 2017)	کشش‌پذیری در ۲۵°C
۴۷/۵	°C	ASTM D36 (ASTM, 2014)	نقطه نرمی
۹۹/۹۲	%	ASTM D2042 (ASTM, 2015)	حلالیت در تتراکلرواتیلن

۳-۲- مواد افزودنی

پایه پلیمری، آنالیز حرارتی، میزان خاکستر و مواد فرار که توسط خود شرکت تولید کننده ارائه شده، در جدول ۴ آمده است.

پودر لاستیک به عنوان ماده افزودنی پلیمری در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۱ نمونه‌ای از پودر لاستیک مورد استفاده که از ضایعات تایر کامیون تهیه شده نشان داده شده است. نتایج آنالیز این افزودنی شامل آنالیز



شکل ۱. نمونه پودر لاستیک مورد استفاده در پژوهش حاضر

جدول ۴. نتایج آنالیز پودر لاستیک مورد استفاده در پژوهش حاضر

آزمون	استاندارد	واحد	نتایج
آنالیز پایه پلیمری	ASTM D3677	-	کانوچوی طبیعی
آنالیز حرارتی (درصد مواد)	ASTM E1131	%	پلیمر (کانوچو): $52/16 \pm 2$ دوده: $45/36 \pm 2$ باقیمانده یا ASH: $2/30 \pm 2$
میزان خاکستر	روش داخلی	%	4 ± 2
مواد فرار در 105°C	روش داخلی	%	$0/3$

۳-۳- روش اختلاط

دما شدن نمونه حاصل، اختلاط با سرعت و زمان مورد نظر انجام گرفته است. کلیه نمونه‌ها از نظر دمایی با خطای ± 3 درجه سلسیوس تولید شده‌اند. شکل ۲ تعدادی از نمونه‌های تولید شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

برای اختلاط قیر خالص با افزودنی پودر لاستیک از دستگاه مخلوط‌کن با دور بالا^{۱۶} استفاده شده است. برای این منظور ابتدا قیر خالص در آون به دمای مورد نظر طراحی آزمایش رسیده و سپس افزودنی به آن اضافه شده است. بعد از هم



شکل ۲. تعدادی از نمونه‌های تولید شده قیر اصلاح شده با پودر لاستیک

۳-۴- آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR)

شده است (شکل ۳). خروجی این آزمایش دو مقدار G^* و δ است که برای تعیین پارامتر شیارشدگی نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

آزمایش رئومتر برشی دینامیکی (DSR) بر روی قیرهای اصلاح شده با پودر لاستیک پیر نشده در دماهای ۵۲، ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه DSR مطابق استاندارد (AASHTO, 2012) AASHTO T315 انجام



شکل ۳. انجام آزمایش رئومتر برشی دینامیکی برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی نمونه‌ها

کوچک δ در افزایش مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائم مؤثر است، بنابراین برای کاهش تغییر شکل‌های دائم، استفاده از قیرهای سخت و الاستیک توصیه می‌شود (Asphalt Institute, 2007).

۴-۱- مدل‌سازی

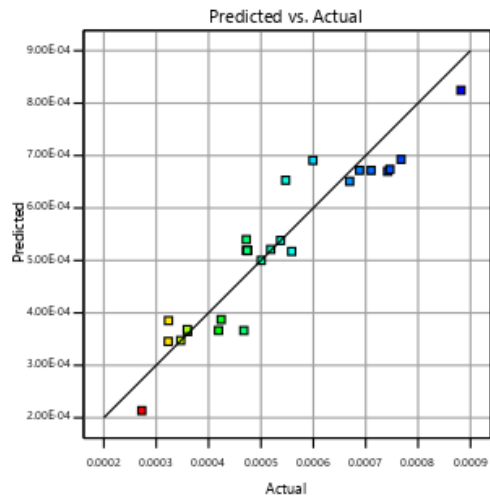
به منظور پیش‌بینی و انتخاب فاکتورهای اثرگذار (دمای اختلاط، زمان اختلاط، سرعت اختلاط و درصد وزنی پودر لاستیک) بر روی پارامتر شیارشدگی، با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert نسخه ۱۱، مدل‌های رگرسیونی خطی، دوتایی و درجه دوم برای پاسخ‌های به دست آمده از انجام ۳۰ آزمایش توسعه یافته است. دقت مدل‌های توسعه یافته در جدول ۵ و نمودارهای مقادیر پیش‌بینی در مقابل مقادیر واقعی در شکل ۴ ارائه شده است.

۴-۲- بهینه‌سازی پارامتر شیارشدگی

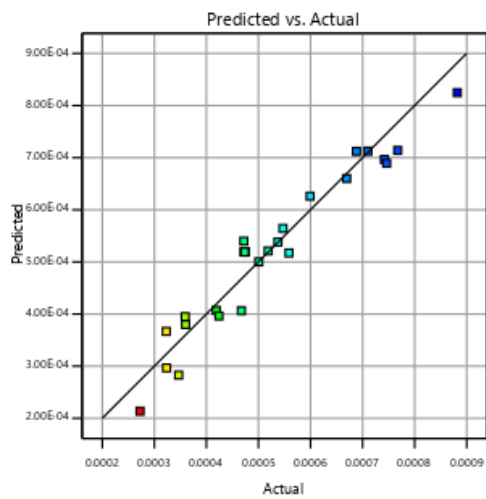
شیارشدگی در یک روسازی آسفالتی حاصل تجمیع تغییر شکل‌های غیرقابل بازگشت لایه آسفالتی تحت بارگذاری تکراری در دماهای بالا است. به منظور لحاظ نمودن پاسخ قیر به این بارهای تکراری، از ضریب $G^*/\sin\delta$ که پارامتر شیارشدگی نام دارد و معیاری از سختی قیر در دماهای بالا و یا مقاومت قیر در برابر تغییر شکل‌های دائم است، استفاده می‌شود. افزایش پارامتر شیارشدگی قیر اصلاح شده نسبت به قیر خالص نشان دهنده افزایش مقاومت قیر اصلاح شده در برابر تغییر شکل‌های دائم است. برای کاهش شیارشدگی روسازی آسفالتی، مقدار حداقل پارامتر شیارشدگی برابر یک کیلوپاسکال و ۲/۲ کیلوپاسکال به ترتیب برای قیرهای پیر نشده و قیرهای پیر شده در آزمایش آون لعاب نازک چرخشی^{۱۷} (RTFO) می‌باشد. مقادیر بزرگ G^* و مقادیر

جدول ۵. مقادیر پارامترهای ارزیابی دقت مدل‌های توسعه داده شده

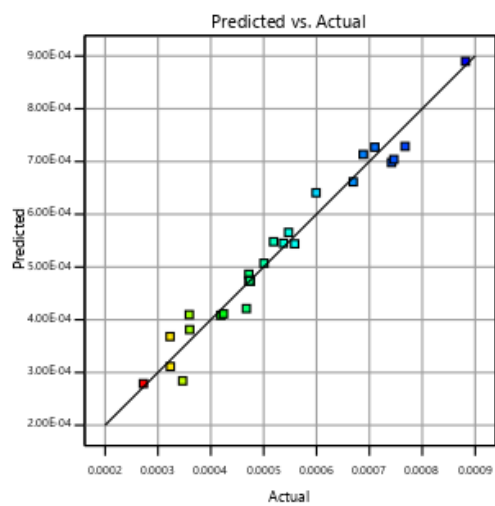
مدل	p-value	R^2 (ضریب تعیین)	R^2 تعدیل شده	R^2 پیش‌بینی
رگرسیون خطی	۰/۰۰۰۱	۰/۸۷۳	۰/۸۵۲	۰/۸۰۸
رگرسیون دوتایی	۰/۱۰۶۰	۰/۹۲۵	۰/۸۸۴	۰/۷۴۳
رگرسیون درجه دوم	۰/۰۱۵۸	۰/۹۶۷	۰/۹۳۴	۰/۷۸۷



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. نمودار مقادیر پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی شیارشدگی: الف) مدل خطی، ب) مدل دوتایی و ج) مدل درجه دوم

در مقدار ضریب تعیین مدل (R^2) می‌شود. این روش، ورود متغیرها به مدل را تا زمانی که سطح معنی‌داری به ۹۵ درصد برسد (یعنی سطح خطا پنج درصد شود) انجام داده و سپس عملیات متوقف می‌شود. در ۳۰ نمونه تولید شده مطابق با شرایط طراحی مرکب مرکزی، مقادیر پارامتر شیارشدگی برای نمونه‌ها در دماهای ۵۲، ۵۸، ۶۴ و ۷۰ درجه سلسیوس توسط دستگاه رئومتر برشی دینامیکی (DSR) برای قیرهای پیر نشده اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش نتایج مربوط به دمای ۶۴ درجه سلسیوس مورد بحث و تحلیل قرار گرفته است. رابطه δ مدل رگرسیون گام به گام برای پارامتر شیارشدگی را ارائه می‌نماید.

از میان مدل‌های توسعه داده شده دو مدل رگرسیون خطی و درجه دوم با دارا بودن مقدار p-value کمتر از ۰/۰۵ در سطح معناداری قابل قبولی قرار دارند. مدل درجه دوم با ضریب تعیین (R^2) بیشتر نسبت به مدل خطی از دقت بیشتری برخوردار است. شکل ۴ نشان دهنده دقت بیشتر مدل درجه دوم برای پیش‌بینی مقادیر پاسخ نسبت به سایر مدل‌ها است. برای مدل‌سازی نهایی از روش رگرسیون درجه دوم گام به گام^{۱۸} استفاده شده است. این روش، متغیرها را یک به یک وارد مدل می‌کند؛ به صورتی که ابتدا متغیری که بیشترین همبستگی را با متغیر وابسته (پاسخ) دارد، انتخاب می‌نماید. دومین متغیری که وارد تحلیل می‌شود متغیری است که پس از تفکیک متغیر مقدم بر آن، موجب بیشترین افزایش

$$\frac{1}{G^*/\sin \delta} = 0.002317 - 6.72687E - 07 \times A - 0.00015 \times B - 0.000153 \times C + 0.000029 \times D + 5.55878E - 07 \times A \times B - 2.12043E - 07 \times A \times D + 2.50122E - 07 \times B \times D + 6.344E - 07 \times B^2 + 6.3707E - 06 \times C^2 \quad (4)$$

که در آن، A دمای اختلاط، B زمان اختلاط، C درصد وزنی پودر لاستیک و D سرعت اختلاط است.

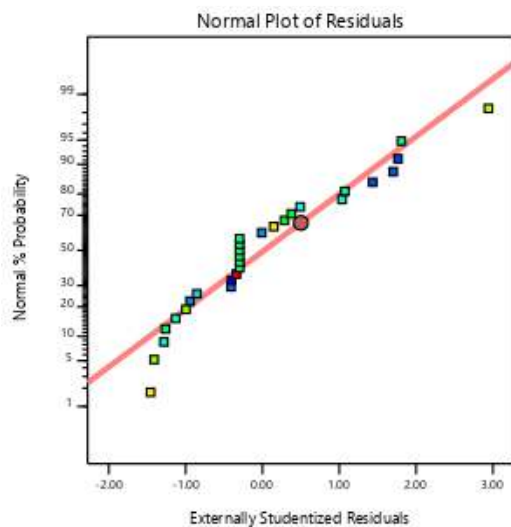
۴-۲- ارزیابی مدل

را در مقابل مقادیر پیش‌بینی نشان می‌دهد که برای بررسی ثابت بودن واریانس داده‌ها به کار می‌رود. این شکل نیز نشان می‌دهد داده‌ها از روند خاصی پیروی نمی‌کنند و توزیع به صورت نامنظم است. شکل ۵ (ج) مقادیر پیش‌بینی را در برابر مقادیر واقعی نشان می‌دهد. داده‌ها عمدتاً بر روی یک خط راست قرار دارند. این شکل نشان دهنده این است که مدل با وجود برخی از خطاها از دقت خوبی برخوردار است و بنابراین از این مدل می‌توان برای آنالیز کیفی و پیش‌بینی پارامتر شیارشدگی استفاده نمود.

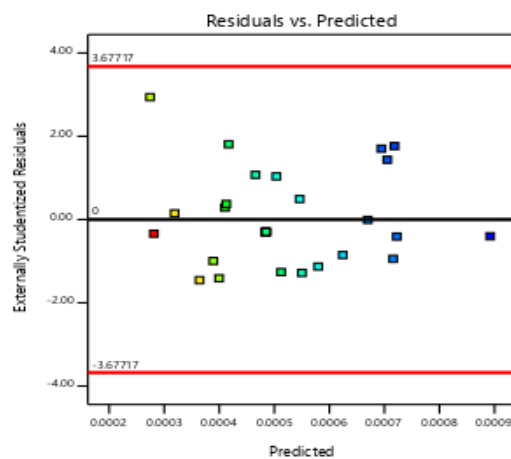
برای ارزیابی عملکرد مدل توسعه یافته، از نتایج آنالیز واریانس پارامتر شیارشدگی، بررسی کفایت مدل و ضریب تعیین آن استفاده شده است. نتایج آنالیز واریانس برای مدل پارامتر شیارشدگی در جدول ۶ آمده است. این جدول نشان می‌دهد که مقدار p-value مدل در سطح اطمینان ۹۵ درصد قرار گرفته است. شکل ۵ (الف) نمودار توزیع نرمال با باقیمانده‌های استاندارد را نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود خط راستی که از میان این نقاط رسم شده است، تقریباً همه داده‌ها را پوشش داده است و نرمال بودن تقریبی داده‌ها تأیید می‌شود. شکل ۵ (ب) مقادیر باقی‌مانده‌ها

جدول ۶. نتایج آنالیز واریانس پارامتر شیارشدگی برای مدل نهایی توسعه یافته

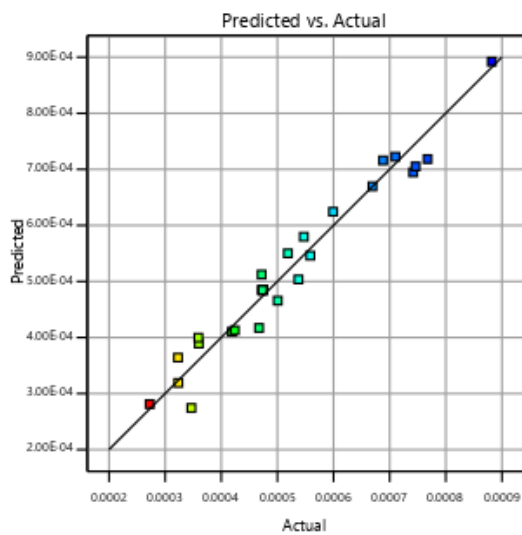
p-value	F-value	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
۰/۰۰۰۱ <	۴۸/۰۹	6.877×10^{-10}	۹	6.189×10^{-10}	مدل
		1.430×10^{-9}	۱۹	2.717×10^{-10}	باقی مانده
		1.941×10^{-9}	۱۴	2.717×10^{-10}	نقص برازش
		۰/۰۰۰۰	۵	۰/۰۰۰۰	خطای محض
			۲۸	6.461×10^{-10}	تغییرات پیرامون میانگین



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. بررسی کفایت مدل: الف) نمودار نرمال بر اساس باقی مانده‌های استاندارد، ب) نمودار مقادیر باقی مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی و ج) نمودار مقادیر پیش‌بینی در مقابل مقادیر اندازه‌گیری

با توجه به مقدار ضریب تعیین (R^2) تعدیل شده برای متغیر پاسخ یا همان پارامتر شیارشدگی، مجموعه متغیرهای ورودی حاضر در معادله رگرسیون توانسته‌اند ۹۳/۸ درصد از تغییرات متغیر پاسخ یعنی پارامتر شیارشدگی را تبیین کنند. جدول ۷ این موضوع را نشان می‌دهد.

جدول ۷. مقادیر ضریب تعیین برای مدل نهایی

R^2	R^2 تعدیل شده	R^2 پیش‌بینی
۰/۹۵۸	۰/۹۳۸	۰/۸۸۵

۴-۳- تحلیل حساسیت نسبت به فاکتورهای موثر

جدول ۸ ضرایب تأثیر هر یک از فاکتورها را بر روی مدل و شکل ۶ تأثیر تغییرات هر یک از فاکتورها را بر روی پارامتر شیارشدگی ارائه می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود بیشترین فاکتور تأثیرگذار بر روی مدل، درصد وزنی افزودنی پودر لاستیک می‌باشد. از سوی دیگر فاکتور درصد وزنی

افزودنی و برهم‌کنش دمای اختلاط و سرعت اختلاط با پارامتر شیارشدگی رابطه مستقیم داشته و رابطه پارامتر شیارشدگی با دیگر فاکتورها، برهم‌کنش آنها و درجه دوم آنها به صورت عکس است.

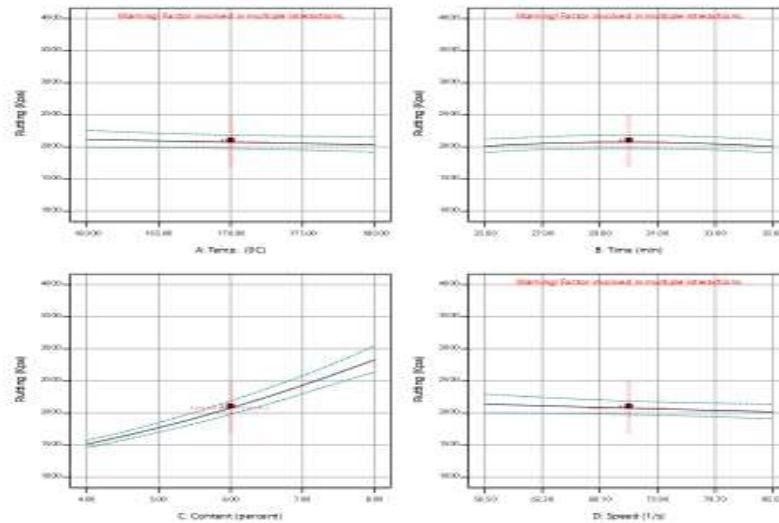
جدول ۸. ضرایب تأثیر فاکتورهای موثر و بررسی آماری نتایج

فاکتور	ضریب تاثیر	درجه آزادی	خطای استاندارد	۹۵٪ پایین بازه اطمینان	۹۵٪ بالای بازه اطمینان	$VIF^{۱۹}$
عرض از مبدا	۰/۰۰۰۵	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵	-
A (دمای اختلاط)	$9/486 \times 10^{-10}$	۱	$7/719 \times 10^{-10}$	$-6/671 \times 10^{-10}$	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰
B (زمان اختلاط)	$9/991 \times 10^{-10}$	۱	$7/719 \times 10^{-10}$	-۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰
C (درصد وزنی)	-۰/۰۰۰۲	۱	$7/719 \times 10^{-10}$	-۰/۰۰۰۲	-۰/۰۰۱۰	۱/۰۰
D (سرعت اختلاط)	۰/۰۰۰۰	۱	$8/534 \times 10^{-10}$	$-4/027 \times 10^{-10}$	۰/۰۰۰۰	۱/۰۱
AB	۰/۰۰۰۰	۱	$9/454 \times 10^{-10}$	$8/007 \times 10^{-10}$	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰
AD	-۰/۰۰۰۰	۱	$9/454 \times 10^{-10}$	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۰	۱/۰۰
BD	۰/۰۰۰۰	۱	$9/454 \times 10^{-10}$	$-1/653 \times 10^{-10}$	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰
B ²	۰/۰۰۰۰	۱	$7/221 \times 10^{-10}$	$7/472 \times 10^{-10}$	۰/۰۰۰۰	۱/۰۳
C ²	۰/۰۰۰۰	۱	$7/221 \times 10^{-10}$	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۱/۰۳

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Original Scale

Rutling (Kpa)
● Design Points
--- 95% CI Bands

Actual Factors
A: Temp. = 170.00
B: Time = 30.00
C: Content = 6.00
D: Speed = 71.00



شکل ۶. تأثیر تغییرات هر یک از فاکتورها بر روی پارامتر شیارشدگی

۴-۴- اعتبارسنجی

نمونه به همراه نتیجه آزمایش (پاسخ) آمده است. همان طوری که مشاهده می‌شود مدل توسعه داده شده توانسته است مقدار پارامتر شیارشدگی را برای نمونه اعتبارسنجی با خطای ۱/۹۵ درصد پیش‌بینی نماید.

برای اعتبارسنجی مدل از مقایسه مقدار پارامتر شیارشدگی به دست آمده از آزمایش و مقدار پیش‌بینی شده با مدل توسعه یافته استفاده شده است. برای این منظور یک نمونه قیر اصلاح شده با افزودنی پودر لاستیک با شرایط متفاوت از طراحی آزمایش تولید شده است. در جدول ۹ شرایط تولید

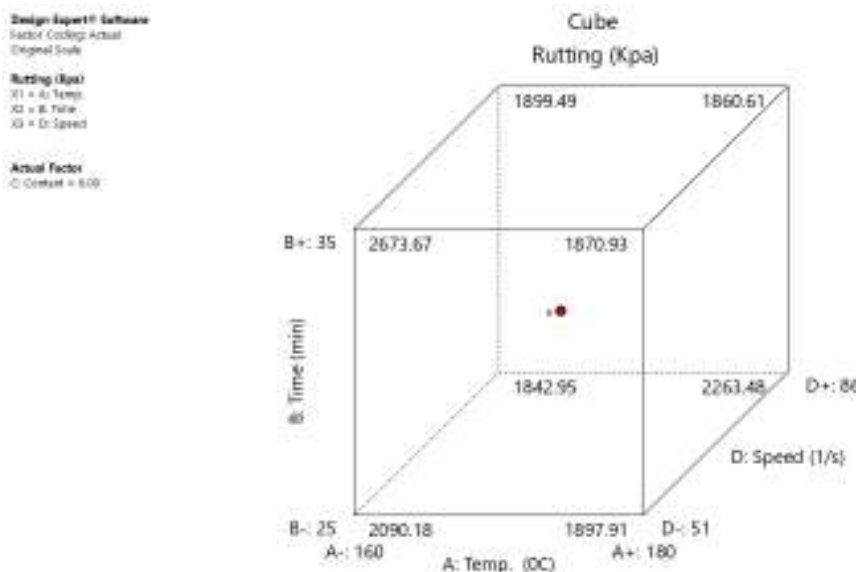
جدول ۹. اعتبارسنجی مدل با مقایسه نتایج اندازه‌گیری و نتایج پیش‌بینی

خطا (درصد)	پارامتر شیارشدگی (kPa)	شرایط تولید نمونه				اندازه‌گیری (آزمایش) پیش‌بینی (مدل)
		سرعت اختلاط (Hz)	درصد وزنی (%)	زمان اختلاط (min)	دمای اختلاط (°C)	
۱/۹۵	۲۷۷۱	۸۶	۸	۲۵	۱۷۰	
	۲۷۱۷					

۴-۵- شیارشدگی بهینه

اختلاط در سطح بالا و زمان اختلاط در سطح پایین باشد، با افزایش دمای اختلاط مقدار پارامتر شیارشدگی کاهش می‌یابد. با افزایش زمان اختلاط مقدار پارامتر شیارشدگی در تمامی شرایط به استثنای هنگامی که دمای اختلاط در سطح بالا باشد، افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت اختلاط مقدار پارامتر شیارشدگی کاهش می‌یابد مگر هنگامی که دمای اختلاط در سطح بالا و زمان اختلاط در سطح پایین باشد.

شکل ۷ نمودار مکعبی دمای اختلاط، زمان اختلاط و سرعت اختلاط برای پاسخ یعنی پارامتر شیارشدگی را در دمای ۶۴ درجه سلسیوس با درصد وزنی پودر لاستیک ۶ درصد نشان می‌دهد. همان طوری که مشاهده می‌شود شیارشدگی بهینه یعنی بیشترین مقدار پاسخ در دمای ۶۴ درجه سلسیوس هنگامی که دمای اختلاط در سطح پایین، زمان اختلاط در سطح بالا و سرعت اختلاط در سطح پایین باشد، اتفاق می‌افتد. در تمامی شرایط به استثنای هنگامی که سرعت



شکل ۷. نمودار مکعبی تاثیر دمای اختلاط، زمان اختلاط و سرعت اختلاط برای پارامتر شیارشدگی بهینه

۵- نتیجه گیری

- نتایج تحلیل حساسیت مدل در نقطه مرکزی نشان می‌دهد که درصد وزنی با پارامتر شیارشدگی رابطه مستقیم و سرعت اختلاط و دمای اختلاط با پارامتر شیارشدگی رابطه عکس دارد.
- اعتبارسنجی مدل توسعه یافته برای پیش‌بینی پارامتر شیارشدگی با خطای ۱/۹۵ درصد انجام شده است.
- با در نظر گرفتن سرعت و دمای اختلاط در سطح پایین و زمان اختلاط در سطح بالا مقدار پاسخ یعنی پارامتر شیارشدگی بهینه در درصد وزنی معین بیشترین مقدار شده است.
- در نهایت می‌توان گفت با استفاده از مدل متدولوژی سطح پاسخ و با انجام آزمایش‌های مربوط به قیرهای با درجه عملکردی، می‌توان به قیر اصلاح شده با پارامترهای بهینه مورد نیاز دست یافت.

- در این پژوهش، از مدل متدولوژی سطح پاسخ (RSM) برای آنالیز خصوصیات مکانیکی و رئولوژیکی قیر اصلاح شده با پودر لاستیک با مدل‌سازی پارامتر شیارشدگی بهینه با فاکتورهای دمای اختلاط، زمان اختلاط، درصد وزنی افزودنی و سرعت اختلاط استفاده شده است. نتایج زیر از این پژوهش به دست آمده است:
- مدل رگرسیونی درجه دوم گام به گام از دقت بیشتری نسبت به دیگر مدل‌ها برخوردار بوده و به عنوان مدل نهایی انتخاب شده است. از مدل توسعه یافته (رابطه ۴) می‌توان برای پیش‌بینی و تعیین مقدار بهینه پارامتر شیارشدگی استفاده کرد.
- فاکتور درصد وزنی پودر لاستیک مؤثرترین فاکتور تاثیرگذار بر روی مقدار پارامتر شیارشدگی است. این فاکتور با پارامتر شیارشدگی رابطه مستقیم دارد. سایر فاکتورها و برهم‌کنش فاکتورها نیز در مقدار پارامتر شیارشدگی تا حدودی مؤثر می‌باشند.

6. Phase Angle
7. Bending Beam Rheometer
8. Stiffness
9. Penetration,30
10. Penetration,50
11. Response Surface Methodology
12. <https://www.statease.com/dx11.html>
13. Design of Experiments

۶- پی نوشت

1. Rutting
2. Fatigue Cracking
3. Low Temperature Cracking
4. Dynamic Shear Rheometer
5. Complex Shear Modulus

Cup Tester, ASTM International, ASTM D92-18", West Conshohocken, PA.

-Azadedel, R. and Solatifar, N. (2018), "Comparison of Different Design of Experiment Methods for Evaluating Behavior of Crumb Rubber Modified Binders (in Persian)". Paper presented at the 1st National Conference on Infrastructure Engineering, Urmia, Iran.

-Behnood, A. and Olek, J. (2017) "Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA)". *Construction and Building Materials*, 151: pp.464-478.

-Bezerra, M.A., Santelli, R.E., Oliveira, E.P., Villar, L.S. and Escalera, L.A. (2008), "Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry". *Talanta*, 76(5): pp.965-977.

-Chen, Z., Pei, J., Wang, T. and Amirkhanian, S. (2019), "High temperature rheological characteristics of activated crumb rubber modified asphalts". *Construction and Building Materials*, 194, pp.122-131.

-Fini, E.H., Hosseinnazhad, S., Oldham, D., McLaughlin, Z., Alavi, Z. and Harvey, J. (2017), "Bio-modification of rubberised asphalt binder to enhance its performance". *International Journal of Pavement Engineering*, pp.1-10.

-Hajikarimi, P., Aflaki, S. and Hoseini, A.S. (2013), "Implementing fractional viscoelastic model to evaluate low temperature Characteristics of crumb rubber and gilsonite modified asphalt binders". *Construction and Building Materials*, 49 (Supplement C), pp.682-687.

-Kim, H.-S., Lee, S.-J. and Amirkhanian, S. (2010), "Rheology investigation of crumb rubber modified asphalt binders". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14(6): pp.839-843.

-Liu, W., Yan, K., Ge, D. and Chen, M. (2018), "Effect of APAO on the aging properties of waste tire rubber modified

14. Central Composite Design
15. Box Behnken Design
16. High-Shear Mixer
17. Rolling Thin Film Oven
18. Stepwise
19. Variance Inflection Factor

۷- مراجع

-AASHTO. (2012), "Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR), American Association of State Highway and Transportation Officials", AASHTO Designation: T. 315.

-Aflaki, S. and Tabatabaee, N. (2009), "Proposals for modification of Iranian bitumen to meet the climatic requirements of Iran". *Construction and Building Materials*, 23(6): pp.2141-2150.

-Al-Khateeb, G.G. and Ramadan, K.Z. (2015), "Investigation of the effect of rubber on rheological properties of asphalt binders using superpave DSR". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(1): pp.127-135.

-Asphalt Institute, (2007), MS-4 "The asphalt handbook .Manual series, ed. 7th. Lexington, KY,; Asphalt Institute.

-ASTM. (2013), "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials", ASTM International, ASTM D5 / D5M-13, West Conshohocken, PA.

-ASTM. (2014), "Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball - Apparatus)", ASTM International, ASTM D36 / D36M-14e1, West Conshohocken, PA.

-ASTM. (2015), "Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene", ASTM International, ASTM D2042-15, West Conshohocken, PA.

-ASTM. (2017), "Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials", ASTM International, ASTM D113-17, West Conshohocken, PA.

-ASTM. (2018), "Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open

- Construction and Building Materials, 47, pp.431-440.
- Thodesen, C., Shatanawi, K. and Amirkhanian, S. (2009), "Effect of crumb rubber characteristics on crumb rubber modified (CRM) binder viscosity. Construction and Building Materials, 23(1), pp.295-303.
- Venudharan, V. and Biligiri, K.P. (2017), "Effect of crumb rubber gradation on asphalt binder modification: rheological evaluation, optimization and selection". Materials and Structures, 50(2), pp.129.
- Venudharan, V., Biligiri, K.P. and Das, N.C. (2018), "Investigations on behavioral characteristics of asphalt binder with crumb rubber modification: Rheological and thermo-chemical approach". Construction and Building Materials, 181, pp.455-464.
- Wang, D., Li, D., Yan, J., Leng, Z., Wu, Y., Yu, J. and Yu, H. (2018), "Rheological and chemical characteristic of warm asphalt rubber binders and their liquid phases". Construction and Building Materials, 193, pp.547-556.
- Wang, H., You, Z., Mills-Beale, J. and Hao, P. (2012), "Laboratory evaluation on high temperature viscosity and low temperature stiffness of asphalt binder with high percent scrap tire rubber". Construction and Building Materials, 26(1), pp.583-590.
- asphalt binder". Construction and Building Materials, 175, pp.333-341.
- Montgomery, (2017), D.C., Design and analysis of experiments. John wiley & sons.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C. and Anderson-Cook, C.M., (2016), "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. Wiley.
- Shafabakhsh, G., Taghipoor, M., Sadeghnejad, M. and Tahami, S.A. (2015), "Evaluating the effect of additives on improving asphalt mixtures fatigue behavior". Construction and Building Materials, 90, pp.59-67.
- Sienkiewicz, M., Borzędowska-Labuda, K., Zalewski, S. and Janik, H. 2017. The effect of tyre rubber grinding method on the rubber-asphalt binder properties. Construction and Building Materials, 154: pp.144-154.
- Subhy, A. (2017), "Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterisations of modified bitumen: Literature review". Construction and Building Materials, 156: pp.28-45.
- Thives, L.P., Pais, J. C., Pereira, P.A.A., Trichês, G. and Amorim, S.R. (2013), "Assessment of the digestion time of asphalt rubber binder based on microscopy analysis".