



## تعیین خواص ویسکوالاستیک مصالح با استفاده از مدل سازی المان محدود سه بعدی به صورت ویسکوزیته الاستوپلاستیک

مرتضی اویسی فر<sup>۱</sup>، محمد عابدینی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>. دانشجوی کارشناسی ارشد عمران گرایش راه و ترابری دانشگاه آزاد واحد بیرجند. [mortezaoveysifar@gmail.com](mailto:mortezaoveysifar@gmail.com)

<sup>۲</sup>. استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی بیرجند.

### چکیده:

یکی از نیازهای طراحی روسازی آسفالتی به روش مکانیستیک - تجربی تعیین مشخصات ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی، از جمله مدول دینامیک و زاویه فاز، است. از آنجایی که آزمایش تعیین مدول دینامیک مخلوط آسفالتی زمان بر و گران است، مدل‌هایی جهت پیش‌بینی آن توسط محققین مختلف ارائه شده است. از آنجایی که قیر ماده پوششی سطوح آسفالتی است و نیروهای اعمال شده بر آن نیز از نوع دینامیک می‌باشد، رفتار دینامیک مکانیکی آن اهمیت زیادی دارد. نتایج نشان داد که توابع رئولوژیکی مانند مدول‌های اتلافی، ذخیره و مختلط و گرانروی مختلط آمیخته‌های حاصله در محدوده مناسبی قرار دارند که نشان دهنده کاهش احتمال ترک در دمای پایین و شیاردار شدن در دمای بالا می‌باشد. بررسی برخی مدل‌های پیش‌بینی موجود جهت تعیین خواص ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی داغ، گرم و حاوی خرده آسفالت است. برای این منظور مخلوط‌های آسفالتی با دو نوع دانه‌بندی معرف مخلوط‌های لایه رویه و آستر هستند و نیز سه نوع قیر خالص، قیر اصلاحی با افزودنی ساسوبیت و قیر بازیافتی به روش روسازی ممتاز طراحی شدند که در این تحقیق با استفاده از نرم افزار ABAQUS نتایج مورد قبولی بدست آمد.

**واژگان کلیدی:** مخلوط‌های آسفالتی، قیر، خواص ویسکوالاستیک، توابع رئولوژیکی، مدول دینامیک

### مقدمه:

در روش طراحی روسازی آسفالتی به شیوه مکانیستیک تجربی که در راهنمای طراحی جدید آشتو مبنای تعیین ضخامت لایه‌های روسازی قرار گرفته است از مشخصات ویسکوالاستیک مصالح آسفالتی مانند مدول دینامیک و زاویه فاز به عنوان داده‌های ورودی فرآیند طراحی استفاده شده است، عملکرد روسازی انعطاف پذیر نیز به شدت تحت تأثیر مدول مخلوط آسفالتی است که خود با تغییر مشخصات مخلوط، سرعت بارگذاری و دما متغیر است.

قیر یکی از مشتقاتی است که از تقطیر نفت خام به دست می‌آید. باقیمانده یا ته مانده برج خلاء به عنوان خوراک در ساخت ۲۰ نوع قیر با درجات کارایی مختلف به کار می‌رود و گرانروی ته مانده برج به نوع نفت خام، دما و فشار برج خلاء در هنگام فرآیند بستگی دارد [۱]. قیر یک ماده چسبنده و پایه مناسب برای مصالح جاده است. قیر در دمای اتاق یک ماده انعطاف پذیر با چگالی حدود



### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

$1\text{g/cm}^3$  می‌باشد، اما در دمای پایین شکننده و در دماهای بالا مثل یک مایع گرانبه جریان می‌یابد. خواص فیزیکی مکانیکی و رئولوژیکی قیر مستقیماً به ساختار کلئیدی و ترکیبات شیمیایی آن یعنی آسفالتن و مالتن بستگی دارد. آسفالتن‌ها ترکیبات قطبی با وزن مولکولی ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ می‌باشند (بسته به حلال مورد استفاده که در نرمال هستان نامحلول هستند و بین ۲۵-۵٪ قیر را تشکیل می‌دهند). از طرف دیگر، مالتن‌ها شامل آروماتیک‌ها، رزین‌ها و ترکیبات اشباع هستند که در هیتان نرمال محلول می‌باشند و وزن مولکولی کمتری دارند [۴-۲]. انواع پلیمر در اصلاح خواص قیر به کار رفته‌اند. همانند اصلاح‌کننده‌های دیگر پلیمرها نیز دارای مزایا و معایب خاص خود هستند و باید رفتار قیر را به رفتار ایده آل نزدیک کنند. پلیمرها به گروه گرمانرم، گرماسخت و لاستیک‌ها تقسیم می‌شوند. پلیمرهای گرما سخت مانند رزین‌های اپوکسی و پلی یورتان به ندرت در اصلاح قیر به کار رفته‌اند. تعداد محدودی کار تحقیقاتی در این زمینه و تعداد اندکی از قیرهای اصلاح شده با رزین‌های گرماسخت به بازار مصرف راه پیدا کرده‌اند.

راهنمای طراحی مکانیستیک - تجربی آشتو برای اهداف طراحی روسازی سه سطح متمایز از ورودی‌های ترافیکی و خصوصیات مصالح را ارائه کرده است. در تحلیل سطح یک انجام آزمایش مدول دینامیک آزمایشگاهی در چندین فرکانس و دما مورد نیاز است. با این وجود، روند آزمایشگاهی برای تعیین مدول دینامیک همیشه امکان‌پذیر نیست؛ چرا که زمان بر گران و سخت است. تحلیل‌ها در سطوح دو و سه نیازمند داده‌های آزمایشگاهی مدول نیستند. اما مدل‌های تجربی که مبتنی بر ویژگی‌های مخلوط از جمله خواص حجمی هستند جهت تخمین مدول دینامیک استفاده می‌شوند مطالعات زیادی نشان داده‌اند که عملکرد این مدل‌ها پایدار و متقن نیست و وابسته به نوع مخلوط آسفالتی است. بنابراین، درک این که مقادیر مدول دینامیک برای مصالح بومی و محلی تا چه حد قابل مقایسه با مقادیر مدول دینامیک پیش‌بینی شده هستند حایز اهمیت است.

این مطالعه به دنبال دسترسی به اهداف زیر است:

- بررسی دقت مدل تجربی پیش‌بینی مدول در راهنمای طراحی جدید و واسنجی آن با مصالح بومی.
- بررسی دقت مدل میکرومکانیکی Hirsch و شکل اصلاح شده آن جهت پیش‌بینی مدول دینامیک مصالح بومی.
- ارزیابی مناسب بودن مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیک برای سه نوع مخلوط آسفالتی داغ گرم (با افزودنی ساسوبیت و آسفالت بازیافتی)
- مقایسه این مدل‌ها از لحاظ پیش‌بینی مدول دینامیک دو نوع دانه‌بندی متداول در راه‌های کشور با اندازه سنگ‌دانه بیشینه ۹/۵ و ۱۹ میلی‌متر.

به این منظور آزمایش تعیین مدول دینامیک روی مخلوط‌های متراکم شده در آزمایشگاه صورت گرفته و نتایج با مقادیر تعیین شده از مدل‌ها مقایسه شده است. مخلوط‌های مورد بررسی با دو نوع دانه‌بندی معرف لایه‌های آستر و رویه آسفالتی و به روش روسازی ممتاز طراحی شده‌اند در این مطالعه فرض بر رفتار الاستیک سنگ‌دانه و رفتار ویسکوالاستیک قیر و آسفالت است. قیر به صورت غیر تراکم پذیر با نسبت پواسون برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. همچنین بررسی‌ها مبتنی بر این فرض است که در مورد مخلوط‌های حاوی خرده آسفالت قیر حاصل از آسفالت بازیافتی به طور کامل با قیر جدید مخلوط می‌شود در ادامه پس از بررسی برخی مطالعات صورت گرفته در این زمینه و معرفی بعضی از مدل‌های پیش‌بینی مدول، دینامیک مصالح و روش‌های آزمایش به کار گرفته شده تشریح و نتایج به دست آمده شده‌اند.



### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

بررسی در مورد پلیمرهای گرمانرم و لاستیک‌ها حلالیت پلیمر در قیر و وزن مولکولی پلیمر نقش عمده‌ای در تعیین وسعت اثر پلیمر روی خواص قیر دارند [۶] پلیمرهای مختلف می‌توانند در قیر محلول و یا نامحلول باشند. عامل حلالیت سازگاری دو فاز قیر - پلیمر را تعیین می‌کند. با افزایش وزن مولکولی پلیمر کارایی [۷] مخلوط قیر پلیمر افزایش می‌یابد ولی سازگاری دو فاز کاهش می‌یابد و احتمال جدایی فاز افزایش می‌یابد. علاوه بر این به دلیل پیچیدگی سیستم چندفازی قیر، افزایش پلیمر ساختار درونی این سیستم پیچیده (سیستم کلوئیدی) را بر هم می‌زند و باعث رسوب آسفالتن می‌شود. علاوه بر این مسایل و برخی مسایل اقتصادی برای آنکه یک قیر اصلاح شده با پلیمر بتواند وارد بازار مصرف شود باید شرایط زیر را نیز برآورده سازد [۸]:

- مخلوط قیر پلیمر باید حداقل ۵-۷ روز در دماهای بالا پایدار باشد.
- پلیمر نیز باید در این مدت از نظر حرارتی پایدار باشد.
- زمان اختلاط طولانی یا دمای اختلاط خیلی بالا لازم نباشد.

تاکنون هیچ پلیمری نتوانسته است تمامی شرایط گفته شده را برآورده سازد. در طی سال‌های متمادی کاربرد پلیمر در قیر فرآیندهای مختلفی بسته به نوع پلیمر برای افزایش پلیمر به قیر ابداع شده است. برای مثال قیرهای اصلاح شده با پلیمرهای ناپایدار حرارتی سریعاً بعد از اختلاط مصرف می‌شوند و یا قیر پلیمرهایی که تمایل شدید به جدایی فاز دارند قبل از اختلاط با مصالح به طور مداوم هم زده می‌شوند. در صنعت قیر و راهسازی ترجیح داده می‌شود قیر از قبل اصلاح شود و در شکلی که خیلی با قیر معمولی تفاوت نداشته باشد در دمای اختلاط با مصالح، ویژگی یک سیال نیوتنی و گرانیوی پایینی داشته باشد (به کارخانه آسفالت سازی تحویل شود) این یک مزیت فنی است که در تهیه و ابداع مخلوط‌های قیر پلیمر باید در نظر گرفته شود.

فرکانس و دما از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر گرانیوی و مدول مختلط آمیخته‌های قیری هستند. از آنجا که پلیمرها می‌توانند اجزای با گرانیوی کمتر قیر مانند روغن‌های سیر شده را جذب کنند، به آسانی با افزودن اصلاح کننده‌های پلیمری می‌توان گرانیوی قیر را افزایش داد. بنابراین، قیرهای اصلاح شده با پلیمر در برابر شیاردار شدن مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهند ولی در دمای پایین، مقاومت در برابر ترک خوردن آن‌ها نسبتاً کم است. از آنجا که مقاومت در برابر ترک خوردن در دمای پایین و شیاردار شدن در دمای بالا، رابطه نزدیکی با ریزساختار میکروسکوپی و تنش-کرنش دارد.

#### پیشینه تحقیق:

معادلات زیادی برای تخمین سختی بتن آسفالتی توسعه یافته است که از اولین آن‌ها می‌توان به مدل Van der Poel اشاره کرد (وان در پول ۱۹۵۴). مدل‌های قابل کاربرد جدیدتری شامل مدل ۱-۳ Witezak (اندری و همکاران ۱۹۹۹) مدل & Bani Witezak مدل D۴۰-۱NCHRP و مدل Hirsch نیز در مطالعات به چشم می‌خورد طبق کارهای تحقیقاتی متعددی که به ارزیابی مدل‌های تجربی موجود پرداخته‌اند، عملکرد یک مدل با نوع مخلوط و دیگر خواص حجمی آن متغیر است. برخی محققین عملکرد مدل ۱-۳ Witezak را برای مخلوط‌های محلی بررسی کرده و دریافته‌اند که این مدل، مقدار مدول دینامیک را بیشتر تخمین می‌زند (کیم و همکاران ۲۰۰۵؛ ابولاردی ۲۰۰۶). همچنین، ابولاردی (۲۰۰۶) و برگیسون و همکاران (۲۰۰۵) نتیجه گرفتند دماهای که پیش‌بینی مدول مدل ۱-۳ Witezak. در بالاتر نسبت به دماهای کمتر نزدیک‌تر به مقادیر اندازه‌گیری شده بود با این وجود طبق مطالعه دیگری مدل ۱-۳۷ Witezak مقدار مدول را کمتر تخمین می‌زند و پیش‌بینی‌ها در دماهای کم و میانی



### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

نزدیک‌تر به مقادیر اندازه‌گیری شده بودند پلتی و همکاران (۲۰۱۳) رحمان و همکاران (۲۰۱۷) مدل‌های مبتنی بر رئولوژی قیر جهت پیش‌بینی مدول دینامیک و زاویه فاز مخلوط‌های آسفالتی را ارائه کردند که دو پارامتر مدول نرمی و ضریب یکنواختی سنگ‌دانه‌ها را نیز به عنوان ورودی در نظر می‌گرفت، نتایج بیانگر تطابق نسبتاً خوب مدل با نتایج آزمایشگاهی مدول در نیومکزیکو بود. ژو و همکاران (۲۰۱۱) منحنی‌های اصلی را برای مخلوط‌های آسفالتی اصلاح شده با پلیمر توسعه دادند و انطباق مدل Witezak ۱-۳۷ را بررسی کردند مشخص شد که این مدل برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی پلیمری مناسب است. کیم و بوتلار (۲۰۱۱) برای غلبه بر محدودیت‌های مدل تجربی Witezak یک چارچوب مدل سازی میکرومکانیکی بر اساس نظریه محیط واسط مؤثر طرح تفاضلی را توسعه دادند. آزمایش مدول دینامیک روی نمونه‌ها به روش استوانه توخالی انجام شد ناوارو و همکاران به دلیل قیمت بالای مواد پلیمری و از طرفی مناسب بودن این مواد برای اصلاح قیر از ضایعات پلیمری برای اصلاح استفاده کرده‌اند و این کار را از نظر اقتصادی و زیست محیطی مناسب می‌دانند. آنان در تحقیق خود تأثیر شرایط فرآیندی مخصوصاً دما را بر رفتار رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با خرده لاستیک بررسی کرده و بهترین شرایط دمایی را ۲۱۰ تعیین کرده‌اند [۳]. از ضایعات لوله‌های PVC به عنوان پرکننده‌های نرم (تقریباً ۱۱) محصولات قیری برای کاربردهای پوششی استفاده شده است. این ضایعات به صورت ریز ساختار در قیر مذاب به طور یکنواخت و همگن پراکنده می‌شوند. در این تحقیق خواص ویسکوالاستیک قیر پایه و مخلوط‌های قیری مثل مدول ذخیره، مدول اتلافی و گرانیوی دینامیکی مطالعه شد. نتایج نشان داده‌اند که ضایعات PVC این عوامل را در مورد مخلوط‌های قیری بهبود می‌بخشد [۱۳]. گارسیا مورالس و همکاران در تحقیقی با ضایعات مواد پلیمری به این نتیجه رسیده‌اند که قیرهای پلیمری کارایی پوشش‌ها را در دماهای بالا و پایین بهتر می‌کنند و به دلیل قیمت بالای پلیمرها استفاده از پلیمرهای بازیابی توصیه شده است [۱۴]. حسین و همکاران تأثیر جرم مولکولی LDPE و EVA بر خواص رئولوژیکی قیرهای اصلاح شده با پلیمر را بررسی کرده و نشان دادند که پلیمرها خواص رئولوژیکی قیر پایه را بهبود می‌بخشند و LDPE انرژی فعال سازی جریان (a) را افزایش ولی EVA این انرژی را کاهش می‌دهد. همچنین مشتقات دیگر وینیل استات و همین طور جرم مولکولی LDPE روی پایداری و ذخیره سازی قیر پلیمری مؤثر است و قیر اصلاح شده با EVA حساسیت کمتری به دما نسبت به قیر اصلاح شده با LDPE دارد [۱۵]. گنزالز و همکاران نیز در تحقیقی رئولوژی و پایداری مخلوط قیر EVA را بررسی کرده و نشان دادند که پارامترهای رئولوژیکی شامل خواص ویسکوالاستیک قیرهایی با درجه نفوذ ۷۰/۶۰ (قیری با درجه نفوذ بین ۶۰-۷۰) با افزودن EVA نو یا ضایعاتی و یا کاپلیمرهای مشابه وینیل استات بهبود می‌یابد و احتمال شکستن در دمای پایین و شیاردار شدن در دمای بالا کاهش می‌یابد خواص ویسکوالاستیک قیر اصلاح شده با ضایعات EVA (اتیلن وینیل استات) نسبت به EVA نو بهتر است. شاید به این دلیل که کرین بلاک موجود در ضایعات مثل یک ماده پرکننده عمل می‌کند. آزمایشات پایداری (دما) ۱۶۵C° و به مدت ۲۴ ساعت و نتایج میکروسکوپی مخلوط‌ها فقط با غلظت ۳/۳٪ پلیمر قابل قبول هستند اما در غلظت ۱٪ مخلوط‌ها برای چهار روز پایدار هستند. نتایج مشخص می‌کند که کارایی این قیرها با غلظت EVA نو و یا بازیابی شده به عنوان پایندر پوشش جاده مناسب هستند [۴]. خطاب و همکاران (۲۰۱۴) نیز به ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی مدول دینامیک - Wirezak و - NCHRP در سه سطح مشخصات قیر برای اجرای راهنمای تجربی در عربستان پرداختند. مدول مکانیستیک پیش‌بینی شده انحراف و پراکنش در مقادیر، به خصوص در دماهای زیاد و کم نشان داد مدول ۱۳۷۴ در مقایسه با D۴۰-۱ پیش‌بینی مدول بهتری در تمام سطوح ورودی مشخصات قیر داشت بیشترین انحراف در مقادیر مدل D۴۰-۱ در دمای خیلی کم (۱۰ درجه سلسیوس) و در مدل ۱۳۷۴ در دمای کم (۴/۴ درجه سلسیوس) رخ داد. سخایی فر و همکاران (۲۰۱۷) یک سری از مدل‌های تک دمایی برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی توسعه دادند که در آن از



### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

خواص مختلف قیر و مخلوط برای تخمین مدول استفاده شده بود. نتایج بیانگر آن بود که مدل‌های جدید عملکرد خوبی نسبت به مدل‌های Witezak و Hirsch داشتند.

هو و همکاران (۲۰۱۶) عملکرد مخلوط‌های آسفالتی را بر اساس مدول دینامیک پیش‌بینی شده از مدل‌های ۱-۳۷۴ Witezak و ۱NCHRP-۴۰ ارزیابی کردند و به این نتیجه رسیدند که این مدل‌ها برای پیش‌بینی عملکرد مخلوط آسفالتی مناسب هستند. همچنین مشخص شد که مدل ۱-۴۰ NCHRP مقادیر مدول دینامیک پیش‌بینی شده بهتری ارائه می‌کند. نعمتی و داو (۲۰۱۸) مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر خواص اسمی مخلوط که طی طرح اختلاط در دسترس هستند برای مدول مختلط مخلوط آسفالتی ارائه کردند. شاخص‌های رئولوژیک برای عملکرد روسازی نیز به سادگی با استفاده از مدل‌ها قابل محاسبه بودند و طراحان می‌توانند با بهینه‌سازی مشخصات طرح اختلاط قابلیت اطمینان طرح را افزایش و هزینه‌های چرخه عمر را کاهش دهند.

بر اساس مرور مطالعات صورت گرفته در این مقاله مدل ۱-۴۰۰ NCHRP و نیز مدل‌های نیمه تجربی مبتنی بر میکرومکانیک Hirsch و Hirsch اصلاح شده برای پیش‌بینی مدول دینامیک مخلوط‌های آسفالتی بررسی شدند. بیشترین دمایی است که یک بایندر کارآیی ویسکوالاستیک را دارد. در اروپای جنوبی بالاترین دمای جاده نزدیک ۶۰°C می‌باشد که ممکن است تأثیرات شیاردار شدن مشاهده بشود و تمام نمونه‌های تولیدی توسط آنان مقدار بسیار بالایی برای Sina می‌دارند. برای نمونه‌های گنزالز این دما بالای ۶۰°C می‌باشد [۴] جی ژانگ و همکاران در تحقیقی خواص قیر اصلاح شده با زغال سنگ هوازده و مخلوطی از SBR زغال سنگ هوازده را بررسی کرده‌اند. مشخص شده است که پایداری ذخیره سازی قیر اصلاح شده با زغال سنگ هوازده به وسیله افزودن SBR بهبود می‌یابد. زغال سنگ هوازده روی نقطه نرمی و SBR روی خواص قیر در دماهای پایین مؤثر هستند. شکل‌های میکروسکوپی نمونه‌های آنان نیز حاکی از توزیع مناسب زغال هوازده در قیر می‌باشد و آزمایش FTIR نیز یک پیک جدید را در قیر اصلاح شده نشان می‌دهد [۱۶] اسکار گنزالز در تحقیقی خواص رئولوژیکی قیر اصلاح شده با انواع PE را بررسی کرده است نتایج وی حاکی از این است که در تمام دماها و تمامی نمونه‌های قیر پلیمر مدول اتلافی بیشتر از مدول ذخیره می‌باشد یعنی GG و برای مایعات پلیمری همگن نیز اثبات شده است که Ga و Ga o نتایج ویسکوالاستیک دینامیکی در دمای ۷۰-۳۰ مشخص می‌کند که پاسخ گرانرو (GG) برای تمام نمونه‌ها برقرار است.

#### روش تحقیق:

در این تحقیق برای انجام محاسبات و آنالیز مصالح الاستو پلاستیک قیر، آسفالت و مصالح روسازی راه از نرم افزار تخصصی ABAQUS استفاده شده است.

ابتدا به معرفی مصالح راهسازی و روسازی راه می‌پردازیم:

جدول ۱. مشخصات قیر پایه

وضعیت قیر	مشخصه	استاندارد آزمایش	معیار استاندارد	نتیجه آزمایش
قیر پیرنشده	نقطه اشتعال و ویسکوزیته	ASHTOO T48	>۲۳۰	۳۱۳
قیر پیر شده در RTFO	تغییر جرم	ASHTOO T240	<۱	۰,۰۶
قیر پیر شده در PAV	سختی خزشی	ASHTOO T313	<۳۰۰	۱۱۱



### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

در این مطالعه ساسوبیت به میزان ۱,۵ درصد وزنی قیر و در دمای ۱۰ درجه سلسیوس به کمک یک همزن برشی دور بالا با قیر مخلوط شد تا قیر اصلاح شده با ساسوبیت بدست آید.

جدول ۲. مشخصات قیر اصلاح شده با ساسوبیت

وضعیت قیر	مشخصه	استاندارد آزمایش	معیار استاندارد	نتیجه آزمایش
قیر پیرنشده	نقطه اشتعال و ویسکوزیته	ASHTOO T48	>۲۳۰	۳۱۳
قیر پیر شده در RTFO	تغییر جرم	ASHTOO T240	<۱	۰,۰۸
قیر پیر شده در PAV	سختی خزشی	ASHTOO T313	<۳۰۰	۱۵۶

و همین طور با انجام فرایند استخراج و جداسازی فیلر از محلول استخراج مطابق استاندارد ASTM تقطیر محلول حاصل به روش اَبسُون طبق استاندارد بازیابی شد.

جدول ۳. مشخصات قیر بازیافتی

وضعیت قیر	مشخصه	استاندارد آزمایش	معیار استاندارد	نتیجه آزمایش
قیر پیرنشده	نقطه اشتعال و ویسکوزیته	ASHTOO T48	>۲۳۰	۳۲۸
قیر پیر شده در RTFO	تغییر جرم	ASHTOO T240	<۱	۰,۱۱
قیر پیر شده در PAV	سختی خزشی	ASHTOO T313	<۳۰۰	۲۹,۱۹

جدول ۴. مشخصات مصالح سنگی

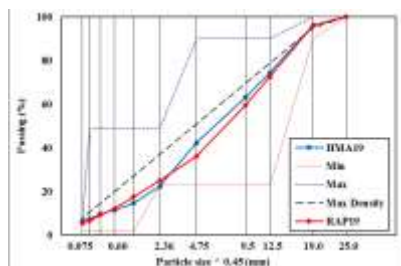
مشخصه	استاندارد	معیار	شن درشت	شن متوسط	شن ریز	ماسه	بازیافتی درشت دانه	بازیافتی ریز دانه
وزن مخصوص ظاهری	ASTM	---	۲,۶۶۸	۲,۶۷۴	۲,۶۷۵	۲,۶۸۱	۲,۶۲۰	۲,۶۸۲
وزن مخصوص حقیقی	ASTM	---	۲,۵۵۳	۲,۵۴۶	۲,۵۲۹	۲,۴۸۳	۲,۵۰۹	۲,۴۸۹
درصد جذب آب	ASTM	---	۱,۷	۱,۹	۲,۲	۳,۰	۱,۶۸۴	۲,۸۸۷
سنگ دانه پهن	ASTM d4791	<۱۰	۰,۲	۰,۶	۲,۴	---	۰,۵	---
شکستگی مصالح روی الک ۴	ASTM d5821	>۹۵	۹۸	۹۷	۹۸	---	۹۹	---



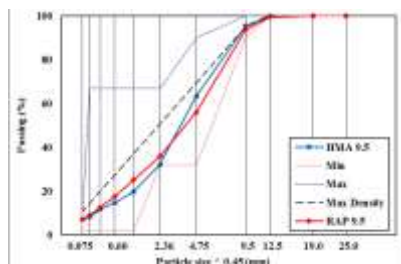
### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

---	۹۵	---	۹۵	۹۴	۹۴	>۹۰	ASTM d 5821	شکستگی مصالح روی الک ۴در دوجبهه
۴۵	---	۴۵,۵	---	---	---	>۴۵	ASTM c1252	گوشه داری مصالح سنگی ریز دانه

از این رو با استفاده از اطلاعات فوق و ویژگی و خصوصیات مصالح نتایج و نمودارهای زیر بدست آمد.



شکل ۱. منحنی دانه بندی مخلوط‌های معمولی و دارای خرده آسفالت با اندازه max19mm



شکل ۲. منحنی دانه بندی مخلوط‌های معمولی و دارای خرده آسفالت با اندازه max9.5mm

### آزمایش رئومتر برشی دینامیکی قیر:

این آزمایش مطابق با استاندارد آشتو تی ۳۱۵ AASHTO ۲۰۱۵d برای اندازه‌گیری خواص ویسکوالاستیک قیر از جمله مدول دینامیک برشی و زاویه فاز به کار رفت. آزمایش روی نمونه‌های پیرشده در آون لایه نازک چرخشی (RTFO) و نیز محفظه پیرشدگی تحت فشار (PAV) در دماهای ۱/۲۱، ۸/۳۷، ۵۴ و ۶۴ درجه سلسیوس و به ترتیب با هندسه صفحات موازی با قطر ۲۵ میلی‌متر و ضخامت نمونه یک میلی‌متر و صفحات موازی با قطر ۸ میلی‌متر و ضخامت نمونه ۲ میلی‌متر انجام شد. آزمایش به صورت کنترل تنش و با رعایت قرارگیری مصالح در محدوده رفتار خطی در فرکانس‌های ۱/۰ تا ۲۵ هرتز صورت پذیرفته است.

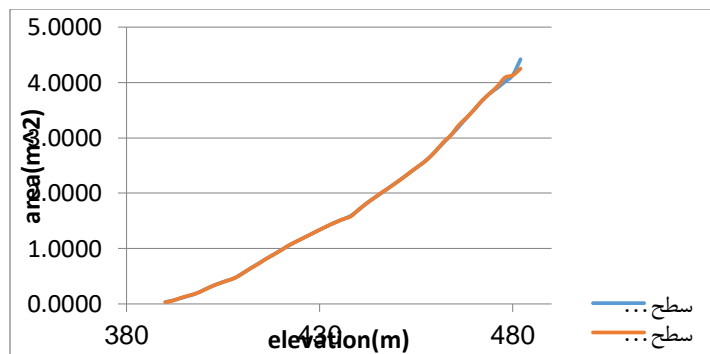




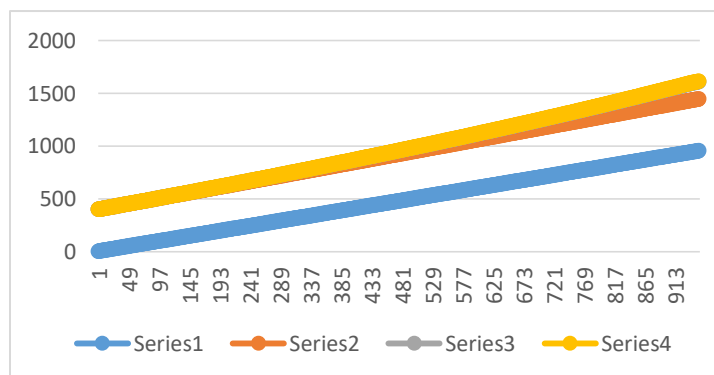
### آزمایش تعیین مدول دینامیک مخلوط آسفالتی

جهت تعیین ویژگی‌های ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی (مدول دینامیک و زاویه فاز) از آزمایش تعیین مدول دینامیک مطابق با استاندارد آشتوتی - ۳۴۲ AASHTO ۲۰۱۵ استفاده شد. در این روش، بار نیم سینوسی به صورت فشار محوری به نمونه استوانه‌ای شکل به ارتفاع ۶ و قطر ۴ اینچ اعمال شده و میزان تغییر شکل آن اندازه‌گیری می‌شود آزمایش در ۵ دمای، ۱/۲۱، ۸/۳۷ و ۵۴ و ۶۴ درجه سلسیوس و در فرکانس‌های بارگذاری ۲۵، ۱۰، ۱۵، ۵/۰ و ۲۰۱ هرتز صورت می‌گیرد. در ادامه نتایج آزمایش و ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی مختلف مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

در ادامه نتایج و نمودارها با استفاده از داده‌های پیش فرض Abaqus در دو تحلیل گر Abaqus و Exel به صورت زیر درآمد: ابتدا نتایج حاصله با استفاده از Exel:



شکل ۳. منحنی سطح محاسباتی و مشاهداتی مصالح آسفالتی راه‌سازی

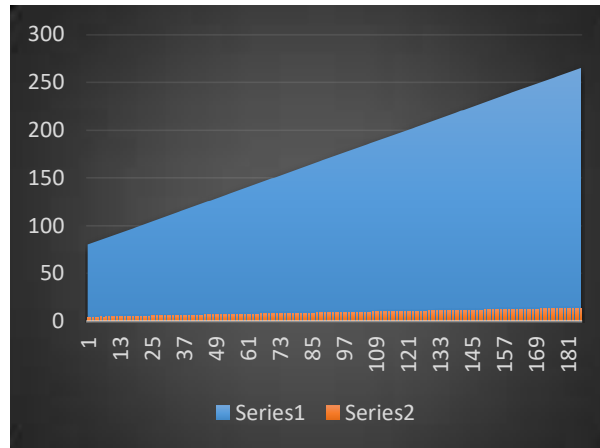


شکل ۴. منحنی سطح حجم داده پیش فرض مصالح روسازی

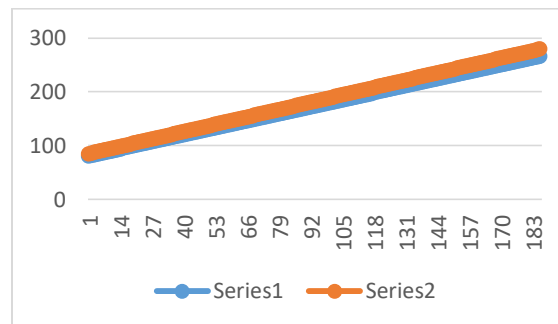




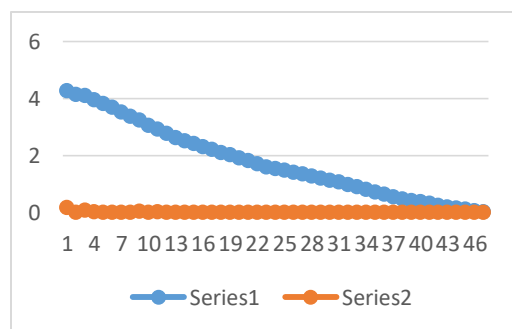
### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۵. منحنی سطح حجم داده پیش فرض سنگدانه‌های درشت و ریز



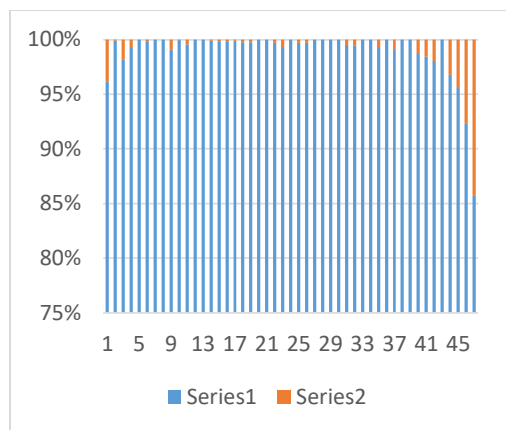
شکل ۶. منحنی سطح حجم داده پیش فرض مصالح آسفالتی با ذرات زیر ۶ میلی‌متر



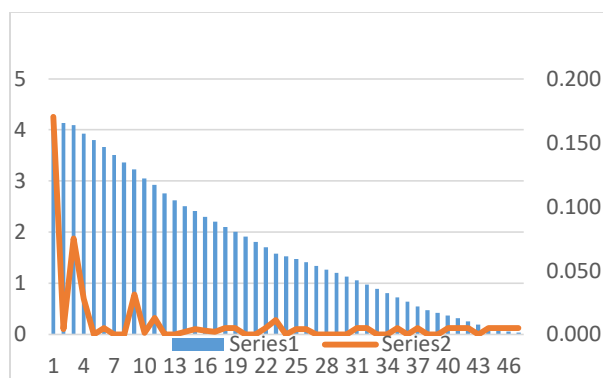
شکل ۷. منحنی سطح حجم داده پیش فرض مصالح آسفالتی زیر ۱۲ میلی‌متر



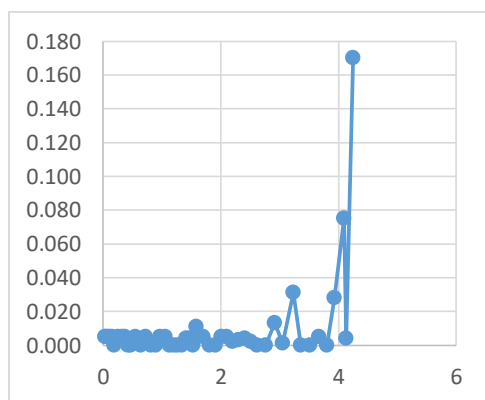
### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۸. منحنی سطح حجم داده پیش فرض مصالح ریز دانه زیر ۶ میلی متر



شکل ۹. منحنی سطح حجم داده پیش فرض مصالح ریز دانه زیر ۱۲ میلی متر

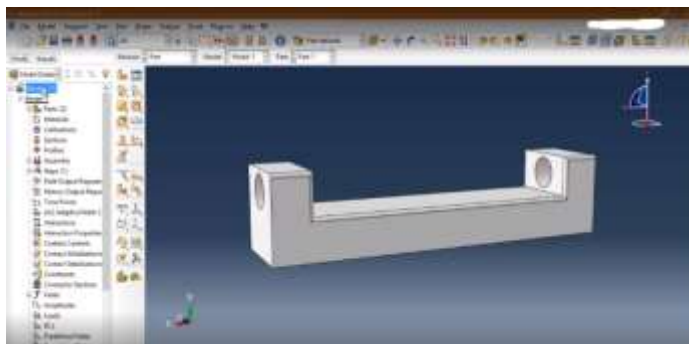


شکل ۱۰. منحنی سطح حجم داده پیش فرض مصالح آسفالتی و سنگ دانه

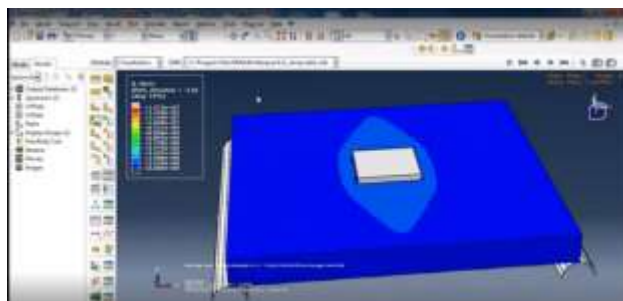


## هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

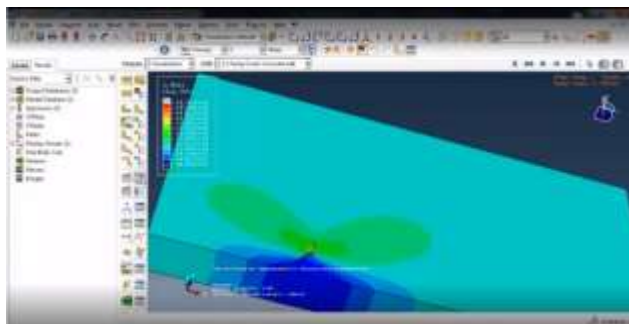
از این رو بر اساس مشاهدات و نتایج حاصله در نمودارهای فوق که در نرم افزار اکسل بدست آمده بودند در نرم افزار آباکوس به صورت زیر درآمد:



شکل ۱۱. شماتیک پایه عرض راه و وارد کردن نقاط کنترل



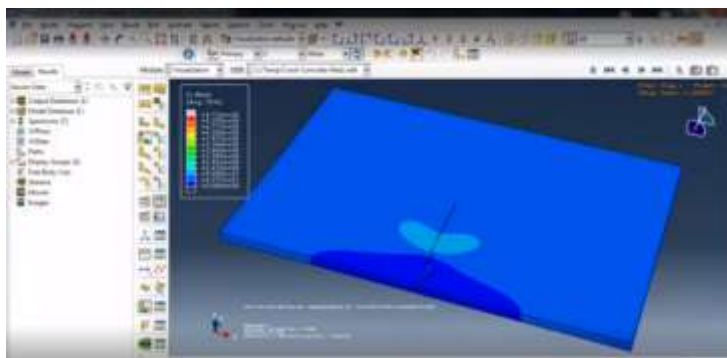
شکل ۱۲. نحوه انعطاف پذیری مصالح روسازی به ویژه آسفالت



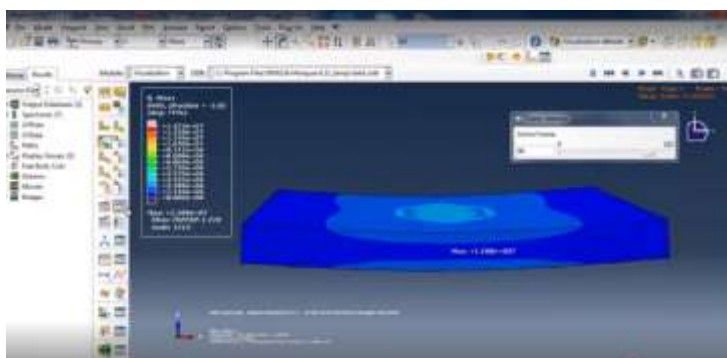
شکل ۱۳. نحوه بروز تنش از کنار جاده در راستای عرض جاده



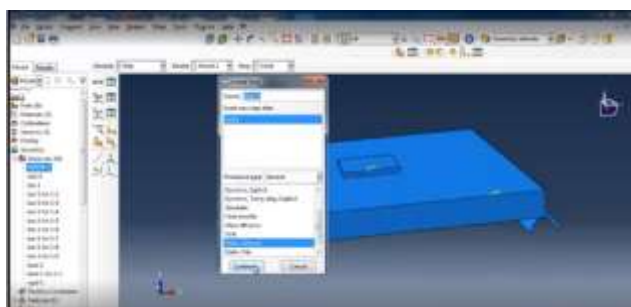
## هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۱۴. ادامه پیدا کردن تنش و ترک در راستای عرض جاده



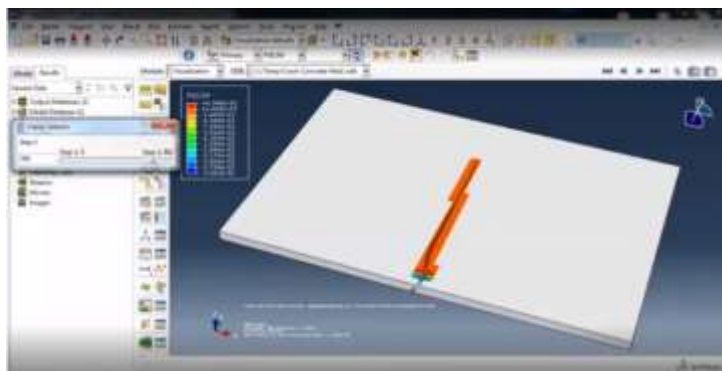
شکل ۱۵. بالانس وارده به وسط جاده در راستای طول



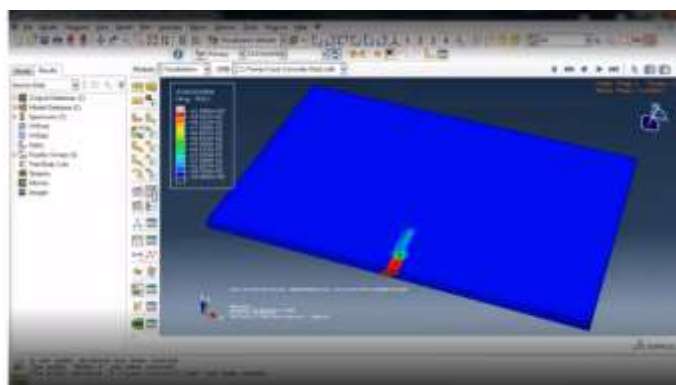
شکل ۱۶. وارد نمودن استاتیک کنترل جهت بارگذاری راه



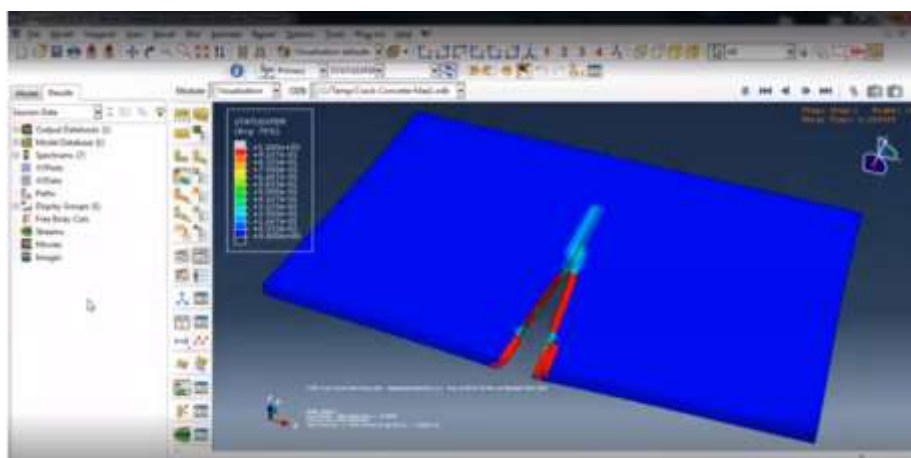
### هجدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست



شکل ۱۷. با فعال کردن گزینه selector و وارد نمودن اعداد مربوطه تنش در عرض ادامه پیدا می کند.



شکل ۱۸. آنالیز حساسیت آسفالت و تحت تأثیر قرار گرفتن سنگدانه ها



شکل ۱۹. پاره شدن رویه راه که آسفالت و زیرسازی راه می باشد.



### نتیجه گیری:

در این تحقیق مشخص شد که هر چه قدر مدول دینامیکی مصالح راهسازی و مخلوطهای آسفالتی پایین تر می رود خصوصیت الاستوپلاستیکی مصالح بالاتر می رود چرا که استاندارد آزمایش و معیار استاندارد رابطه معکوس دارند. اگر چه در بعضی نقاط عرض راه استاندارد آزمایش و معیار استاندارد برابر بودند که در این حالت مدول الاستیکی مصالح راهسازی و خصوصیت الاستوپلاستیکی برابر و تغییری پیدا نمی کند.

خواص مصالح الاستوپلاستیک راهسازی و روسازی راه از نظر ژئوفیزیک و ژئولوژیکی هر چقدر از لحاظ آماری و اعدادی در نرم افزار Abaqus بالا و پایین می شدند تغییری در پاره گی عرض جاده پیدا نمی شد.

بر اساس آمارهای موجود یعنی داده های پیش فرض که در نرم افزار Abaqus ثابت قرار گرفتند نتایج حاصله نیز به صورت قابل تأمل تر و دقیق تر بدست آمد که درصدها و نتایج بدست آمده مقالات اخیر نزدیک تر بود که این موفقیت خوبی برای این پژوهش به شمار می رود.

درصد قیر آسفالت مورد استفاده در هسته راه ضمن ارتقاء کارایی و تراکم بالا باید نفوذ پذیری، مقاومت، خواص ویسکوالاستیک - پلاستیک و خود ترمیمی آسفالت را تأمین نماید. در درصد قیرهای پائین ضمن افزایش نفوذپذیری، سختی و مقاومت باعث کاهش کارایی و خاصیت ویسکوالاستیک پلاستیک می شود. به دلیل آن که هسته های آسفالتی خصوصاً در ناحیه بالایی تحت تأثیر کرنش های بزرگی ناشی از ارتعاشات زلزله قرار می گیرد. استفاده از درصد قیرهای بالاتری نسبت به آنچه به عنوان درصد قیر بهینه از آزمایش مارشال حاصل می گردد توصیه می شود. نتایج آزمایشات سه محوری برآورد پارامترهای استاتیکی مخلوطهای بتن آسفالتی با درصد قیر مختلف مورد استفاده قرار گرفته و بطور عمومی نشان می دهد افزایش درصد قیر به میزان قابل توجهی به کاهش سختی مصالح و افزایش انعطاف پذیری آن می گردد.

### مراجع:

- [1] Zelelew H., Papagiannakis T. (2009) "Analysis of Truck Dynamic Axle Loads using Hilbert-Huang Transform" Transportation Research Board 89th Annual Meeting January 22-26, 2009 Washington, D.C.
- [2]. M. h. nahi, "analysis of asphalt pavement under nonuniform tire-pavement contact stress using finite element method"
- [3] Pradeep M. Ritter M. Marzougui Dh. Brown D. (2009) "Modeling, testing, and validation of the 2007 chevysilverado finite element model" Transportation Research Board 89th Annual Meeting January 22-26, 2009 Washington, D.C.
- [4] Al-Qadi, Yoo, P.J. and Elseifi M.A. (2008) "In-Situ Validation of Mechanistic Pavement Finite Element Modeling" Transportation Research Board 85th Annual Meeting January 22-26, 2006 Washington, D.C.
- [5] MINKWAN KIM, (199<sup>^</sup>), "THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FLEXIBLE PAVEMENTS CONSIDERING NONLINEAR PAVEMENT FOUNDATION BEHAVIOR". pp 1-19
- [6] J. Zhang, Y. Wul, J. Wang, Y. Wange, Improved properties of weathered coal and SBR/weathered coal compound modified asphalt. Iran. Polym. J. 16(2007), 251-259. 17. O. G. Uranga, Rheological properties of bitumen



- modified with polyethylene and polyethylene based blends. (2002), ([http://www.rheofuture.de/papers2002/190902\\_es\\_01.pdf](http://www.rheofuture.de/papers2002/190902_es_01.pdf))
- [7]. A. Yousefi, A. A. Yousefi, Polymer-modified bitumen using vacuum bottom and wastes of PE and SBR Plants. Iran. Polym. J. 21(2008), 235-241.
- [8]. A. A. Yousefi, Rotational rheometers and their applications. Iran. Polym. J. 14(2001), 83-92.
- [9]. S. S. Sandyani, Physical classification of Iran's bitumen based on SHRP method. MSc. Thesis, Dept. Civil Eng. Tehran University, (1997).
- [10]. A. A. Yousefi, A. Yousefi, Report of Project no 31713103. Iran Polymer and Petrochemical Institute, (2007)
- [11]AASHTO. 2015a. "Standard specification for performance-graded asphalt binder (AASHTO: M320-10)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. AASHTO. 2015b. "Standard practice for superpave volumetric design for asphalt mixtures (AASHTO: R35- 15)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. AASHTO. 2015c. "Standard specification for superpave volumetric design (AASHTO: M323-13)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [12]AASHTO. 2015d. Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR) (AASHTO: T315-12)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [13]AASHTO. 2015e. "Standard method of test for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR) (AASHTO: T313-12)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [14]AASHTO. 2015f. "Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA) (AASHTO: T342-11)". American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- [15]Andrei, D., Witczak, M. W. and Mirza, W. 1999. "Appendix CC-4: Development of a revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures". Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final Document, NCHRP Project1-37A, pp. 66-204, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.
- [16]ASTM. 2015. "Standard test method for recovery of asphalt from solution by Abson method (ASTM: D1856-09)". ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [17]ASTM. 2011. "Standard test methods for quantitative extraction of bitumen from bituminous paving mixtures (ASTM: D2172/D2172M-11)". ASTM International, West Conshohocken, PA.