

## ارائه مدل تاثیر پارامترهای طراحی بر تنش و کرنش در روسازی ماندگار به روش اجزای محدود

### مقاله علمی - پژوهشی

حسن دیوانداری\*، گروه مهندسی عمران، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران  
ایرج اکراقبری، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد نوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، نوشهر، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [ha.divandari@iaiu.ac.ir](mailto:ha.divandari@iaiu.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

صفحه ۱۸-۱

### چکیده

دوام، هزینه کمتر و عمر بالای روسازی، نقش بسیار مهمی در انتخاب نوع روسازی دارند. در این پژوهش، عملکرد روسازی ماندگار با نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، مدل‌سازی گردید. سپس با ایجاد تغییرات در پارامترهای طراحی که عبارتند از: ضخامت لایه‌ها، ضریب پواسون و مدول یانگ، در سه لایه آسفالتی مقطع، تغییرات کرنش و تنش روسازی در دو زمان مختلف ۰/۱ و ۰/۱۶۴ ثانیه در ۹۶ مدل مختلف بررسی گردید. داده‌های نرم‌افزار توسط مدل رگرسیون چند متغییره و روش گام به گام بررسی و تحلیل شد و معادله نهایی برای کرنش و تنش تعیین و اعتبارسنجی گردید. نتایج نشان داد که با فرض تنش ثابت، تغییر ضخامت لایه‌های اول تا سوم، ضریب پواسون لایه اول و سوم و همچنین مدول یانگ لایه دوم در سطح معنی داری برای تغییر کرنش قرار دارند. همچنین در حالت کرنش ثابت، تغییر ضخامت لایه اول، ضریب پواسون لایه اول و همچنین مدول یانگ لایه اول تا سوم در سطح معنی داری برای تغییر تنش قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: روسازی ماندگار، اجزای محدود، پارامترهای طراحی روسازی، مدل‌سازی روسازی

### ۱-مقدمه

تعمیر و نگهداری و مرمت اصولی راه‌ها، مهمترین اقدام جهت بهبود شرایط فیزیکی راه‌ها و افزایش کیفیت و دوام روسازی جاده‌ها هستند که در تحلیل چرخه عمر روسازی، نقش مهمی دارند. این عملیات که از همان اولین سال‌های بهره‌برداری روسازی راه‌ها آغاز می‌گردد، سالانه بخش قابل توجهی از بودجه عمرانی کشور در بخش راهسازی را شامل می‌شود (Jafari, Hosseinjanzadeh and Divandari, 2017). یکی از عواملی که در جلوگیری از افزایش هزینه‌های تعمیر و بهسازی جاده‌ها تاثیرگذار است، انتخاب درست نوع روسازی است. علیرغم اینکه در اکثر جاده‌های جهان از روسازی‌های آسفالتی استفاده می‌شود، تعمیر و نگهداری و بازسازی این نوع روسازی هزینه زیادی دارد که در عین حال باعث افزایش زمان مختل شدن

جریان ترافیک عبوری و تبعات ناشی از آن می‌شود (Masada, 2007). همین عوامل، باعث پدید آمدن ایده استفاده از روسازی ماندگار<sup>۱</sup> که دارای کیفیت و عمر بالایی است، شده است. روسازی ماندگار به معنی روسازی با عمر زیاد است که از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشد. (Amini, Mashayekhi and Ziari, 2012) البته امروزه این روسازی با تعریف جدید خود، در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تعریف در سال ۲۰۰۰ توسط انجمن روسازی آسفالت<sup>۲</sup> چنین بیان شده است: روسازی آسفالتی که بیش از ۵۰ سال دوام بیاورد و ضمن اینکه در این مدت نیازی به بازسازی اساسی ندارد، فقط نیاز باشد بازسازی سطحی برای آن انجام شود (Asphalt Pavement Alliance, 2002). جهت طراحی روسازی

## ۲- پیشینه تحقیق

اگرچه مفهوم روسازی‌های ماندگار برای اولین بار در سال ۲۰۰۰ بیان شد ولی بسیاری از روسازی‌های آسفالتی که مدت‌ها پیش ساخته شده‌اند به عنوان روسازی‌های ماندگار عمل می‌کنند. انجمن روسازی آسفالت در سال ۲۰۰۱، برنامه جایزه روسازی‌های ماندگار را به رسمیت شناخت و شرط حضور در برنامه را شروط سه گانه ذیل اعلام کرد:

۱- جاده در زمان برنامه، حداقل ۳۵ سال عمر داشته و هیچ گونه خرابی ساختاری نداشته باشد.

۲- در ۱۳ سال اول طول عمر خود، نیاز به بازسازی نداشته باشد.

۳- حداکثر ضخامت روسازی، ۱۰۰ میلیمتر باشد.

اداره حمل و نقل مینه سوتا<sup>۶</sup> از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۷ توانسته است پیروز این مسابقه گردد و از این حیث رکورددار باشد. صبوری در تحقیقات خود عواملی از قبیل: مصالح تشکیل دهنده، عوامل طراحی و ملاحظات تعمیر و نگهداری و انجام آزمایشات لازم را به عنوان عوامل موثر در این انتخاب نام برده است، Sabouri (2020).

در سال ۲۰۰۵ اداره حمل و نقل کانزاس، در چهار بخش از خیابان‌های این ایالت، روسازی ماندگار را به عنوان جایگزینی مناسب و اقتصادی برای روسازی‌های آسفالتی معمولی انتخاب و اعلام کرد (Harvey et al., 2016).

والوبیتا و همکاران، در پژوهشگاه حمل و نقل تگزاس در سال ۲۰۰۹، با بررسی روسازی‌های ماندگار اجرا شده در این ایالت، تحقیقات گسترده‌ای را جهت ارتقای عملکرد این نوع روسازی انجام دادند (Walubita, Hu and Scullion, 2009).

دپارتمان حمل و نقل آیووا در سال ۲۰۱۶، یک پروژه روسازی با مفاهیم روسازی ماندگار را اجرا کرد. بررسی‌های انجام شده توسط محققان طرح نشان داد که با انجام این پروژه که ۳/۵ مایل از بزرگراهی در نزدیکی سدار ریپیدس<sup>۷</sup> بود، هزینه‌های چرخه عمر و اثرات مخرب زیست محیطی، کاهش چشم‌گیری خواهند داشت (Schram and linn, 2018).

پژوهشی دیگری در شهر برنکویلا<sup>۸</sup> کلمبیا انجام شد تا تاثیرات زیست محیطی و هزینه‌های مرتبط با چرخه عمر سه روسازی، یعنی روسازی ماندگار، روسازی انعطاف‌پذیر معمولی و روسازی صلب را برآورد و مقایسه کند. روش‌های ارزیابی چرخه عمر<sup>۹</sup> و تجزیه و تحلیل هزینه چرخه عمر<sup>۱۰</sup> بدین منظور مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج این بررسی نشان داد که روسازی ماندگار به

ماندگار، از روش مکانیستیک-تجربی استفاده می‌شود (Newcomb and Timm, 2010). طراحی به روش مکانیستیک-تجربی بر اساس کنترل دو پارامتر مهم کرنش فشاری قائم و کرنش کششی افقی در زیر لایه رویه روسازی انجام می‌شود و دو خرابی مهم روسازی یعنی ترک‌های خستگی<sup>۳</sup> و شیارشدگی<sup>۴</sup> را در روسازی لحاظ می‌کند (Huddleston and Buncher and Newcomb, 2004). شیارشدگی یا بروز تغییر شکل‌های ماندگار، یکی از مهم‌ترین انواع خرابی روسازی‌های آسفالتی است و به عوامل متعددی از قبیل: خصوصیات قیر مصرفی، درصد قیر مخلوط، خصوصیات و دانه-بندی مصالح سنگی، شرایط آب و هوایی، میزان رطوبت، درصد فضای خالی، میزان ترافیک و شدت بارگذاری بستگی دارد (Baradaran and Ameri, 2023). کرنش کششی ایجاد شده نیز به عوامل مختلفی مانند خصوصیات بارگذاری وسایل نقلیه، نظیر سرعت، مقدار بار و فشار سطح تماس وابسته است (Owaisifar and Abedini, 2023). خرابی شیارشدگی، غالباً در اثر تکرار عبور بارهای بیش از حد تحمل روسازی ایجاد می‌شود که در نتیجه لایه رویه را دچار تغییر شکل برگشت‌ناپذیر می‌کند. دو روش برای محدود کردن شیارشدگی وجود دارد: (Hafez et al., 2018)

۱- محدود کردن کرنش‌های فشاری عمودی در بالای بستر روسازی

۲- محدود کردن کل تغییر شکل سطح روسازی  
روش‌های متعددی جهت تحلیل روسازی‌ها آسفالتی توسط طراحان مورد استفاده قرار می‌گیرد که از جمله پرکاربردترین این روش‌ها می‌توان به نظریه چند لایه‌ای و روش المان محدود اشاره کرد (Ghanizadeh and Salehi, 2022).

البته نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که رفتار مخلوط‌های آسفالتی در اغلب شرایطی که در طول عمر خود در معرض آن قرار می‌گیرد، ویسکوالاستیک می‌باشد و یکی از روش‌هایی که به طور گسترده جهت پیش‌بینی پاسخ‌های ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش المان محدود با نرم افزار آباکوس<sup>۵</sup> می‌باشد که همه پارامترهای تعیین کننده رفتار مخلوط آسفالتی را شبیه سازی می‌نماید (Taherkhani and Jalali, 2015).

در دماهای بالاتر، تاثیر دما روی لایه آسفالتی افزایش می‌یابد که با افزایش ضخامت لایه آسفالتی، تاثیر دما بر عملکرد لایه، کمتر خواهد شد (Hernandez, 2010). لیاو در سال ۲۰۰۷ به مدلسازی ویسکوالاستیک روسازی‌های آسفالتی پرداخت و با مدلسازی، عملکرد روسازی ماندگار U.S.30 در آمریکا را بررسی کرد. هدف اولیه این تحقیق، مدلسازی خصوصیات ویسکوالاستیکی که در آزمایشگاه تعیین شده بود با یک مدل اجزای محدود سه بعدی بود تا رفتار یک روسازی ماندگار را که تحت بارگذاری وسایل نقلیه در دماهای مختلف و سرعت‌های متفاوت قرار داشت را به دقت شبیه‌سازی کند. در این تحقیق، جهت تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک مصالح در آزمایشگاه، آزمایش مدول دینامیکی انجام شد و یک سری پرونی پنج بخشی برای توصیف رفتار ویسکوالاستیک آسفالت به دست آمد.

همچنین جهت اندازه‌گیری این پارامترها از آزمایش مدول برجهنگی استفاده شد. این خصوصیات اندازه‌گیری شده به عنوان ورودی برای مدل اجزای محدود سه بعدی در نرم‌افزار آباکوس استفاده شد و گرافی بدست آمد که کرنش کششی حداکثر را به ضخامت لایه‌ها مرتبط می‌کرد و سرانجام به مدلی رسیدند که کیفیت روسازی را با استفاده از نتایج آزمایش‌ها، به خوبی تخمین می‌زد (Liao, 2007). سوگایسه در سال ۲۰۲۳، تجزیه و تحلیل اجزای محدود سه بعدی بر روی چندین مدل از روسازی‌های معمولی و ماندگار را مورد ارزیابی قرار داد. مدل‌های استفاده شده در این تحقیق، برای طراحی از یک سیستم پنج لایه‌ای مطابق دستورالعمل روش‌های طراحی روسازی در کشور آفریقای جنوبی، استفاده کرد. در میان مدل‌های ساخته شده، وقتی بارگذاری از نوع محور تاندوم بود، کمترین ضریب ایمنی و بیشترین صدمه به روسازی در مدل مشاهده شد. پس از بررسی‌های انجام شده بر روی مدل‌های مختلف، نتیجه شد که روسازی ماندگار در مقایسه با سایر انواع روسازی‌های بررسی شده، در دراز مدت با دوام‌تر و دارای مقاومت بیشتری در برابر خرابی‌های ناشی از ترافیک می‌باشد (Sogayise, 2023).

ساحیس و همکاران در تحقیقی با استفاده از اصل ادرمارک<sup>۲</sup>، به توسعه مدل مکانیکی-تجربی در روسازی ماندگار پرداختند. در تحلیل مدل‌های استفاده شده، از فرمول‌ها و توصیه‌های مکانیکی-تجربی اشاره شده در متن IRC:37-2018 استفاده گردید و جهت اعتبارسنجی ضخامت روسازی ماندگار تعیین شده، از نرم‌افزار اجزای محدود IITPAVE استفاده گردید. طراحی ضخامت لایه آسفالتی، با محدود کردن کرنش کششی در

نسبت دو روسازی دیگر، آسیب زیست‌محیطی کمتر و کارایی و عملکرد بالاتری را به همراه دارد و جایگزینی بهتر و اقتصادی‌تر در قیاس با سایر نمونه‌های بررسی شده، می‌باشد (Polo-Mendoza et al., 2023). همچنین مطالعاتی با هدف جایگزینی روسازی ماندگار به جای روسازی صلب در جاده‌های شهر پونا<sup>۱۱</sup> در کشور هند که هیچ مقررات و استاندارد رسمی برای طراحی روسازی ماندگار تا سال ۲۰۱۲ وجود نداشت، انجام گردید تا دستور العملی بدین منظور، تهیه و ابلاغ گردد. در نهایت نتایج پژوهش مذکور نشان داد که روسازی ماندگار با توجه به عواملی مانند عمر طراحی، عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی، انتخاب بهتری خواهد بود (Kulkarni and Ranadive, 2022).

بررسی‌های انجام شده نشان داده است که محققین زیادی در پژوهش‌های متفاوت، از نرم‌افزار آباکوس جهت مدلسازی و شبیه‌سازی رفتار آسفالت و روسازی ماندگار استفاده نموده‌اند. القادی و همکاران، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به بررسی تاثیر تنش‌های تماسی و بارگذاری دینامیکی بر روسازی ماندگار در سه حالت مختلف پرداختند. نتیجه پژوهش اینگونه عنوان شد که هرچه شدت بار اعمالی افزایش یابد، طول ناحیه تماس نیز افزایش خواهد یافت. همچنین مشخص شد که کرنش کششی در پایین‌ترین لایه آسفالتی موجود، منطبق با مقادیر اندازه‌گیری شده در واقعیت بود (Al-Qadi et al., 2009).

هرمندز در سال ۲۰۱۰ به تخمین پاسخ روسازی ماندگار در بارگذاری سریع روسازی اقدام نمود. در این تحقیق، همزمان از آنالیز اجزای محدود و تحقیقات آزمایشگاهی استفاده شد و نتایج با هم مقایسه گردید. در پژوهش مذکور، جهت آنالیز اجزای محدود از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. مدل مورد استفاده، از شش لایه مختلف تشکیل شده بود که شامل چهار لایه آسفالتی و دو لایه از مصالح سنگدانه‌ای بود. خصوصیات مصالح لایه‌های آسفالتی، ویسکوالاستیک فرض شد. بارگذاری متحرک بود و دو حالت تنش تماسی یکنواخت و غیر یکنواخت در نظر گرفته شد. تاثیر جابجایی‌های عرضی مختلف، دماهای مختلف، عمق لایه‌ها، توزیع مقادیر مختلف تنش و ... برای کرنش‌های طولی، عرضی و تنش عمودی در بالای ساپگرید محاسبه شد و با مقدار اندازه‌گیری شده، مقایسه گردید. بررسی نتایج نشان داد که در دماهای پایین و متوسط چون آسفالت به صورت الاستیک خطی رفتار می‌کند، رابطه بین کرنش طولی و بار اعمال شده خطی است. اما

یانگ لایه‌ها در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی کرده و تاثیر پارامتر-های ذکر شده را در تنش و کرنش بیشینه ایجاد شده در یک تاریخچه زمانی مد نظر، یعنی ۰/۱ و ۰/۱۶۴ ثانیه مورد بررسی قرار دهد. سپس با استفاده از ابزارهای تحلیلی و مدل‌های رگرسیونی، مدل بهینه و اقتصادی را با توجه به نتایج بدست آمده، تعیین کند.

#### ۴-روش تحقیق

با مدل‌کردن روسازی ماندگار در نرم‌افزار و وارد کردن مشخصات لایه‌ها، سه لایه بالایی آن که از جنس روسازی آسفالتی می‌باشند مورد ارزیابی قرار می‌گیرند، تا تاثیر پارامترهای اولیه شامل مشخصات مصالح بر پارامترهای خروجی نرم‌افزار که در این تحقیق، تنش و کرنش در یک تاریخچه زمانی ذکر شده هستند، مورد مطالعه و تحلیل قرار گیرند. مدل‌سازی لایه‌ها، مطابق شکل ۱ انجام شده است و مشخصات مصالح به نرم‌افزار معرفی گردیده است. در ادامه، در سه مرحله تغییرات مد نظر پژوهش اعمال گردید:

۱- در ابتدا با ثابت فرض کردن پارامترهای ضریب پواسون و مدول یانگ، تاثیر ضخامت لایه‌ها بر تنش و کرنش بوجود آمده در سطح روسازی بررسی شد که در هر مرحله، ضخامت هر لایه با گام یک سانتی‌متر مطابق جدول ۱ افزایش داده شد.

۲- سپس با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای ضخامت لایه‌ها و مدول یانگ، ضریب پواسون هر کدام از لایه‌ها مطابق جدول ۲، با گام ۰/۰۱ افزایش داده شد و نمودارهای تنش و کرنش برحسب متغیر زمان، بررسی گردید.

۳- در ادامه، با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای ضخامت لایه‌ها و ضریب پواسون لایه‌ها، تاثیر مدول یانگ بر پارامترهای تنش و کرنش بوجود آمده، مورد بررسی قرار گرفت.

پس از انجام مراحل ذکر شده، نمودارهای تنش و کرنش بوجود آمده در روسازی، نسبت به زمان‌های مد نظر تحقیق، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در این تحقیق از نتایج تحقیقات والویتا و همکاران که به بررسی روسازی ماندگار اجرا شده در تگزاس پرداختند و دستورالعمل‌هایی برای طراحی، ساخت و عملکرد ساختارهای مختلف این روسازی بیان کردند، استفاده شده است. (جدول ۲)

پایین‌ترین لایه آسفالتی و کرنش فشاری در لایه رویه روسازی، انجام شد. نتایج نشان داد که روسازی مورد مطالعه، در برابر شیارشدگی مقاوم است اما تحت خستگی و بارگذاری تکرار شونده، به طور جزئی، ترک می‌خورد و دچار خرابی خستگی می‌شود (Sahis et al., 2023).

وانگ و یونگ تحقیقاتی را با هدف ارزیابی مدول لایه آسفالتی بر اساس حالات مختلف بارگذاری میدانی، انجام دادند. در این پژوهش، چهار ماموریت پژوهشی به شرح ذیل ارائه گردید:

۱- توسعه منحنی اصلی مدول لایه مخلوط آسفالتی تحت حالت بارگذاری میدانی

۲- شناسایی خواص مخلوط‌های آسفالتی تحت حالت بارگذاری آزمایشگاهی

۳- روابط بین مدول‌های مخلوط آسفالتی تحت حالت‌های آزمایشگاهی و بارگذاری صحرائی

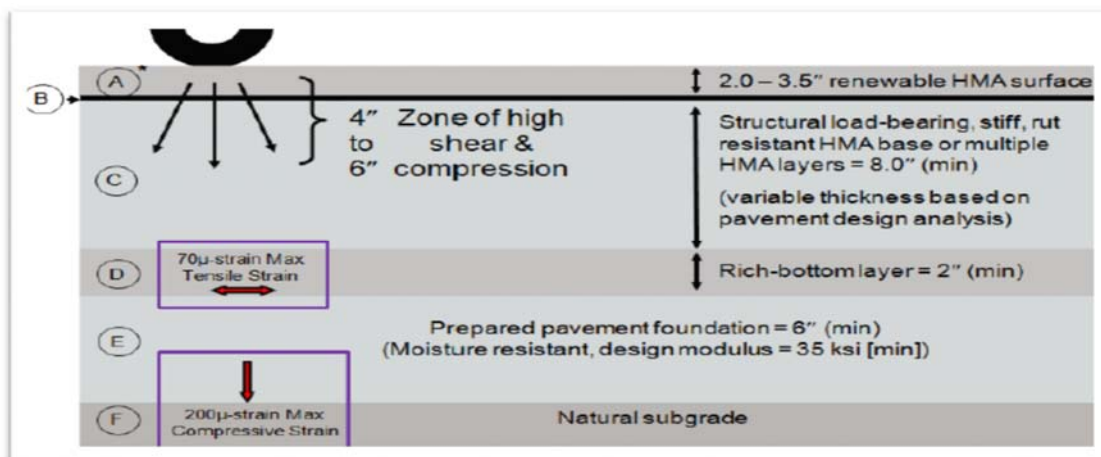
۴- ارزیابی مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی تحت موج‌های بارگذاری واقعی.

آنها در نتایج پژوهش‌های خود اعلام کردند که روسازی ماندگار دارای مزایایی مانند کاهش هزینه چرخه عمر، کاهش مصرف مواد غیر قابل بازیافت و کاهش تاخیرهای ترافیکی ناشی از فعالیت‌های بازسازی روسازی می‌باشد و روسازی ماندگار در طول عمر سازه‌ای خود بیش از ۴۰ تا ۵۰ سال دوام می‌آورد (Wang and Yuhong, 2022).

در پژوهشی دیگر، جاده‌های آزمایشی با روسازی ماندگار و با ضخامت‌های مختلف آسفالت، در مسیر شماره بیست و سه ایالت اوهایو ساخته شد. آزمایش بار کنترل‌شده خودرو<sup>۱۳</sup> جهت به‌دست آوردن پاسخ‌های بار دینامیکی تحت بار خودرو و ارزیابی تأثیر سرعت خودرو و فشار تایر، انجام شد و بعد از گذشت حدود ۱۰ سال از احداث این مسیرها، مشخص گردید که پاسخ‌های کرنش محاسبه شده مطابقت خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده داشته‌اند و خیلی به مقادیر آزمایشگاهی نزدیک هستند (Zhu et al., 2022).

#### ۳-هدف تحقیق

این پژوهش در نظر دارد مقطعی از روسازی ماندگار را با متغیر در نظر گرفتن پارامترهای طراحی و مشخصات مکانیکی مصالح روسازی، از جمله ضخامت، ضریب پواسون و مدول



شکل ۱. مشخصات لایه‌ها در طراحی روسازی آسفالتی ماندگار در تگزاس (Walubita et al., 2009)

جدول ۱. اجزای سازه روسازی ماندگار بر اساس پیشنهاد موسسه آسفالت (APA, 2002)

شماره لایه	ضخامت (سانتی‌متر)	مدول لایه (گیگاپاسکال)
لایه اول	۳/۸ - ۷/۸	۵/۵۷۵
لایه دوم	۱۰/۲ - ۱۷/۸	۴/۰۲
لایه سوم	۷/۷ - ۱۰/۲	۱۱/۳۲
لایه چهارم	متغیر	۰/۱۳۷۸۹
لایه پنجم	متغیر	۰/۰۵

جدول ۲. مقادیر پیشنهادی مدول طراحی روسازی ماندگار آبی تگزاس در دمای ۷۷ درجه فارنهایت (Walubita et al., 2009)

نام لایه	محدوده پواسون	محدوده مدول طراحی	مدول پیشنهادی (گیگاپاسکال)
آسفالت متخلخل	۰/۳-۰/۴	۳۰۰-۴۵۰	۳۵۰
آسفالت با استخوان‌بندی سنگدانه	۰/۳-۰/۴	۵۰۰-۸۵۰	۶۰۰
لایه مقاوم در برابر شیارشدگی	۰/۳-۰/۴	۶۰۰-۱۲۰۰	۸۰۰
لایه مقاوم در برابر خستگی	۰/۳-۰/۴	۷۰۰-۱۳۰۰	۸۰۰
بستر آسفالتی با مقاومت بالا	۰/۳-۰/۴	۴۰۰-۶۵۰	۵۰۰
اساس دانه‌ای	۰/۳۵-۰/۴۵	۳۵-۱۵۰	حد اقل ۳۵
بستر طبیعی	۰/۳۵-۰/۴۵	-	با توجه به شرایط بستر تعیین می‌شود.

#### ۴-۱-مدل‌سازی

نظر گرفتن خصوصیات خطی و غیر خطی مصالح، رفتار الاستیک و ویسکوالاستیک و سایر مشخصات، مورد استفاده قرار گیرد (Chundi Si et al., 2018). مصالح آسفالتی توسط مدل

در این پژوهش، مدل‌سازی المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ۲۰۱۹ انجام شده است. آباکوس می‌تواند ضمن شبیه سازی مناسب عملکرد مواد و مصالح، جهت حل مسائل، با در

#### ۴-۳- وابستگی زمان و سری های پرونی

لایه های مختلف روسازی از نظر ویژگی های رفتاری را می توان به دو گروه الاستیک و ویسکوالاستیک تقسیم کرد که لایه آسفالتی دارای رفتار ویسکوالاستیک و سایر لایه ها، رفتار الاستیک دارند. در آباکوس می توان خاصیت ویسکوالاستیک مواد را با کمک سری پرونی تعریف کرد. برای این منظور لازم است که مقادیر ثابت پرونی، مدول الاستیک لحظه ای و نسبت پواسون مخلوط آسفالتی، تعیین شوند (Hadian, 2019). در این نرم افزار، وابستگی به زمان با استفاده از سری های پرونی به شکل مدول برشی اعمال می شود. مدول برشی  $G(t)$  با استفاده از مدول خزشی  $E(t)$  از رابطه ۲ محاسبه می شود:

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

جهت محاسبه مدول برشی لحظه ای که با  $g(t)$  مشخص شده، از مقدار به دست آمده مدول برشی و ساختن تابع آن به صورت  $gi(t)$  استفاده می شود. وابستگی زمان با استفاده از سری های پرونی به شکل مدول برشی در نرم افزار قابل مشاهده است. همچنین مقدار  $g(t)$  از رابطه ۳ تعیین می گردد:

$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N gi(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (3)$$

پارامترهای این معادله که در جدول ۴ ارائه شده اند، عبارتند از:  $N$ : تعداد گزینه های سری،  $gi$ : ثابت مصالح،  $\tau_i$ : زمان تأخیر. هر بخش نمایی رابطه، یک گزینه سری پرونی نامیده می شود.

جدول ۳. مدول یانگ و ضریب پواسون برای مدل اولیه

مدول لایه (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون	لایه
۵/۵۷۵	۰/۳۵	آسفالت با استخوان بندی سنگدانه ای
۴/۰۲	۰/۳۵	آسفالت با عملکرد بالا
۱۱/۳۲	۰/۳۵	لایه مقاوم در برابر خستگی
۰/۱۳۷۸۹	۰/۳۵	اساس دانه ای
۰/۰۵	۰/۳۵	بستر طبیعی

ویسکوالاستیک و تحلیل ویسکوز بررسی می شوند و بدین ترتیب زمان کل بارگذاری نیز در این تحلیل وارد می گردد. با فرض ثابت بودن سرعت در هنگام عبور از مقطع، کل مدت زمان عبوری از رابطه ۱ بدست می آید:

$$t = \frac{l}{17.6 \times v_s} \quad (1)$$

که در این رابطه:

$t$ : زمان بارگذاری بر حسب ثانیه،

$l$ : طول مؤثر بر حسب اینچ،

$v_s$ : سرعت محاسبه شده بر حسب مایل بر ساعت.

#### ۴-۲- مشخصات مصالح

روسازی ماندگار ساخته شده در ایالت تگزاس که توسط نرم افزار آباکوس مدل سازی گردیده، مطابق شکل ۱، از پنج لایه تشکیل شده است که از بالا به پائین عبارتند از:

۱- لایه رویه به ضخامت ۷۶ میلی متر،

۲- لایه بیندر یا لایه میانی آسفالتی به ضخامت ۱۷۸ میلی متر،

۳- لایه مقاوم در برابر خستگی به ضخامت ۱۰۰ میلی متر،

۴- لایه اساس دانه ای به ضخامت ۱۵۲ میلی متر،

۵- لایه سابگرید به ضخامت ۳۰۰ میلی متر.

مطابق پژوهش های بررسی شده، محدوده معتبر متغیرهای تحقیق که عبارتند از ضخامت لایه ها، ضریب پواسون و مدول یانگ لایه های اول تا سوم، به شرح ذیل در نظر گرفته شد:

-محدوده ضخامت: لایه اول از ۳ تا ۱۳، لایه دوم از ۱۳ تا ۲۳، لایه سوم از ۵ تا ۱۵ سانتی متر. (TxDOT, 2001)

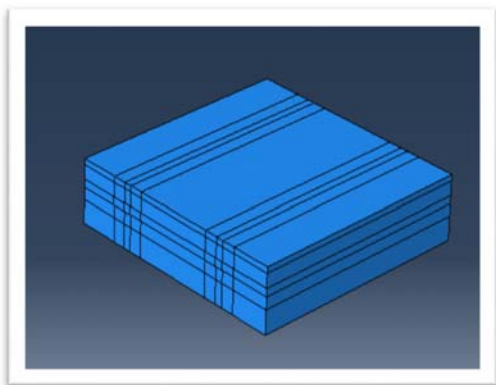
-محدوده ضریب پواسون لایه های آسفالتی: از ۰/۳ تا ۰/۴ مطابق مقادیر پیشنهادی در جدول ۲ در نظر گرفته شده است (Walubita et al., 2009).

-محدوده مدول یانگ: لایه اول از ۱/۹۹۱ تا ۵/۵۷۵، لایه دوم از ۱/۱۱۴ تا ۴/۰۲، لایه سوم از ۴/۶۶۵ تا ۱۱/۳۲ گیگاپاسکال (Liao, 2007).

-ابعاد مدل: سطح مدل ۳/۶۵ \* ۳/۶۵ متر (عرض یک خط عبوری) و عمق مدل برابر با ۰/۸ متر می باشد. ابعاد در نظر گرفته شده به این دلیل بزرگ می باشد تا اثرات لبه های کناری مدل تا حد ممکن کاهش یابد و منحنی کرنش مناسبی ارائه گردد.

در نهایت جهت ساخت مدل اولیه، مدول یانگ و ضریب پواسون لایه ها مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شد.

پس از وارد کردن مشخصات لایه‌ها در نرم‌افزار و مونتاژ کردن لایه‌ها روی یکدیگر، نمای کلی روسازی، در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمای کلی لایه‌ها در نرم‌افزار آباکوس

جدول ۴. ضرایب سری پرونی

ثابت	لایه مقاوم در برابر خستگی	آسفالت با عملکرد بالا	لایه آسفالت با استخوان بندی سنگدانه‌ای
$g_1$	۰/۱۷۴۷	۰/۲۵۷	۰/۲۳۰۱
$g_2$	۰/۲۲۹۳	۰/۲۵۴۵	۰/۲۸۴۷
$g_3$	۰/۲۵۹۷	۰/۲۰۵۷	۰/۲۴۳۲
$g_4$	۰/۲۳۱۳	۰/۱۷۵۴	۰/۱۵۶۶
$g_5$	۰/۰۹۴۴	۰/۰۹۰۶	۰/۰۷۰۳
$\tau_1$	۰/۰۰۲۰۷	۰/۰۰۰۳۲۳	۰/۰۰۰۰۹۶۶
$\tau_2$	۰/۰۰۵۲۸	۰/۰۰۱۳۳	۰/۰۰۲۳۷
$\tau_3$	۰/۲۳۸	۰/۰۳۹۴	۰/۱۵۸
$\tau_4$	۱۱/۸۹۴	۱/۱۳	۸/۴۷۹
$\tau_5$	۶۳۱	۵۵/۷	۴۷۵/۵

#### ۴-۵- سرعت بارگذاری ترافیکی

در این پژوهش سرعت وسایل نقلیه برابر ۵۵ مایل در ساعت، (۸۷/۵ کیلومتر در ساعت) در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۶- شبیه سازی بارگذاری ترافیکی

بارهای اعمال شده توسط وسایل نقلیه که در شکل ۳ نشان داده شده است، به صورت دینامیکی به روسازی وارد می‌شود. برای شبیه‌سازی این بار، از کامیون سنگین دو محوره که فاصله بین دو چرخ در هر محور ۰/۱۲۴ متر، فاصله‌ی بین دو محور برابر ۱/۲۹۵ متر و فاصله‌ی بین دو محور جلویی و عقبی برابر ۴/۵۰۶ متر است، استفاده شده‌است و عرض هر مسیر چرخ برابر با ۲۱۲/۸ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌است. حرکت بارگذاری ترافیکی، با ترسیم ناحیه‌ای به ابعاد هر چرخ، در طول مسیر چرخ در جهت ترافیک شبیه‌سازی شده است.

#### ۴-۴- وابستگی دما

بعد از تعریف وابستگی زمانی، وابستگی دمایی نیز باید به نرم افزار معرفی گردد. این کار با استفاده از معادله‌ی ویلیام لندل فری<sup>۱۴</sup> به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\log(aT) = \frac{-C_1(T-T_{ref})}{C_2+(T-T_{ref})} \quad (۴)$$

که در این رابطه:

$aT$ : فاکتور انتقال دما-زمان،

$C_1$  و  $C_2$ : ثابت‌های رگرسیون

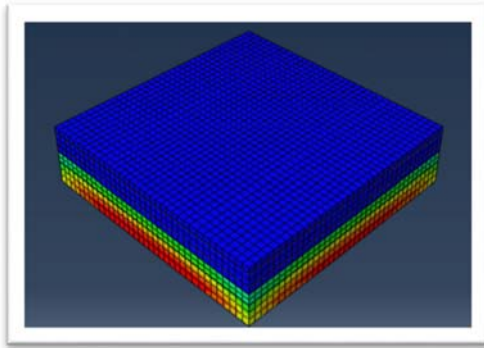
$T_{ref}$ : دمای مرجع ( $^{\circ}C$ ).

$T$ : دمای آزمایش ( $^{\circ}C$ ).

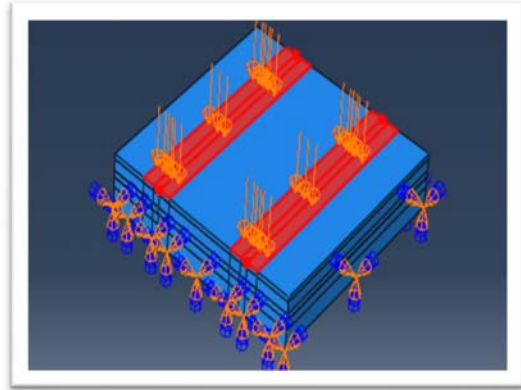
مقدار ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  با توجه به نوع مخلوط آسفالتی، از جدول ۵ تعیین می‌گردد.

جدول ۵. ضرایب معادله WLF

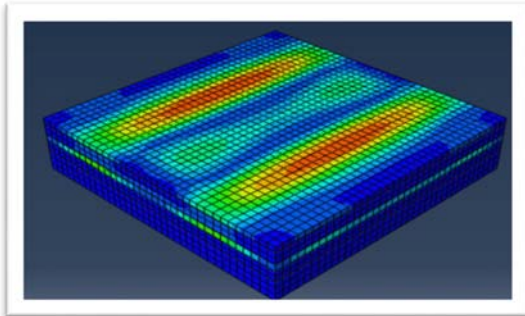
$C_1$	$C_2$	لایه
۱۶/۶۴۸	۱۲۶/۷۶	آسفالت با استخوان بندی سنگدانه‌ای
۱۷/۹۴۷	۱۵۵/۰۳	آسفالت با عملکرد بالا
۲۱/۹۱۴	۱۵۷/۳۹۶	لایه مقاوم در برابر خستگی



شکل ۵. مدل شبیه‌سازی شده روسازی تحت کرنش ثابت



شکل ۳. بارگذاری در نرم‌افزار آباکوس



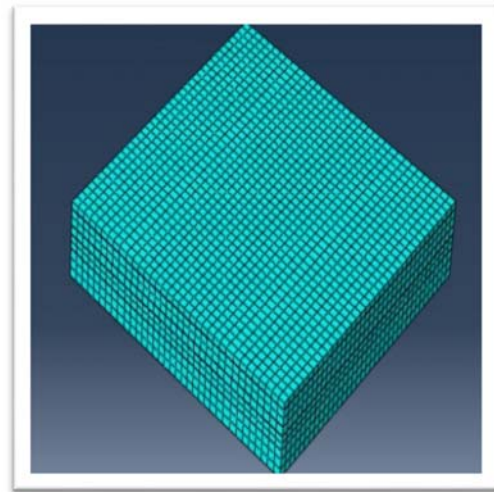
شکل ۶. مدل شبیه‌سازی شده روسازی تحت تنش ثابت

#### ۴-۷- خروجی نرم‌افزار

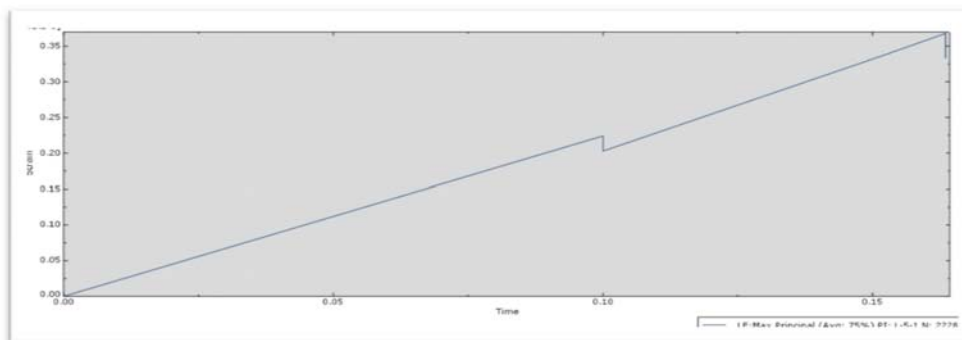
با در نظر گرفتن شرایط ویسکوالاستیک برای روسازی، اعمال بارگذاری و سرعت وسایل نقلیه و ایجاد مش بندی نهایی (شکل ۴)، شرایط برای ساخت مدل نهایی، آماده گردید. تاریخچه زمانی در دو حالت تنش ثابت و کرنش ثابت در جدول ۶ ارائه شده است. شکل‌های ۵ و ۶ نیز مدل شبیه سازی شده روسازی ماندگار را در حالت کرنش ثابت و تنش ثابت را نمایش می‌دهد. شکل‌های ۷ و ۸، گراف کرنش-زمان در حالت تنش ثابت و گراف تنش-زمان در حالت کرنش ثابت را نشان می‌دهد.

جدول ۶. تاریخچه زمانی در دو حالت تنش ثابت و کرنش ثابت

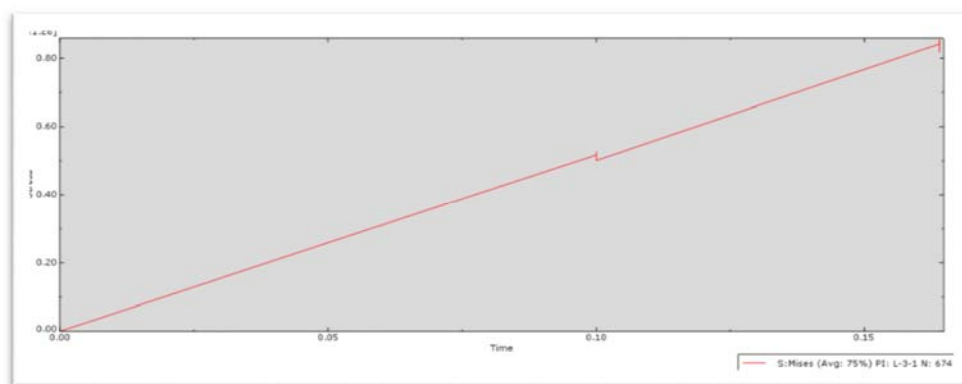
ردیف	در حالت تنش ثابت		در حالت کرنش ثابت	
	زمان	تنش	زمان	کرنش
۱	۰	۰	۰	۰
۲	۰/۱	۵۱۷۲۰۰	۰/۱	۰/۰۰۰۲۲۹۷۵
۳	۰/۱	۵۲۵۵۲۱	۰/۱	۰/۰۰۰۲۲۳۹۷
۴	۰/۱	۵۰۹۳۶۷	۰/۱	۰/۰۰۰۲۰۲۳۴۲
۵	۰/۱	۵۰۱۰۸۶	۰/۱	۰/۰۰۰۲۰۲۷۳۳
۶	۰/۱۶۴	۸۴۱۸۰۲	۰/۱۶۴	۰/۰۰۰۳۶۷۸۸۴
۷	۰/۱۶۴	۸۵۴۸۰۹	۰/۱۶۴	۰/۰۰۰۳۶۷۸۵۵
۸	۰/۱۶۴	۸۲۸۰۹۳	۰/۱۶۴	۰/۰۰۰۳۳۲۸۳۹
۹	۰/۱۶۴	۸۱۵۱۳۴	۰/۱۶۴	۰/۰۰۰۳۳۲۸۳۵



شکل ۴. مش بندی نهایی در نرم‌افزار آباکوس



شکل ۷. گراف کرنش-زمان در حالت تنش ثابت



شکل ۸. گراف تنش-زمان در حالت کرنش ثابت

گام اول: تغییر مدول یانگ لایه اول از ۱/۹۹۱ تا ۵/۵۷۵ گیگاپاسکال، (۱۱ مقدار)، گام دوم: تغییر مدول یانگ لایه دوم از ۱/۱۱۴ تا ۴/۰۲ گیگاپاسکال، (۱۱ مقدار)، گام سوم: تغییر مدول یانگ لایه سوم از ۴/۶۶۵ تا ۱۱/۳۲ گیگاپاسکال (۱۱ مقدار) که در نهایت ۳۳ حالت و ۱۳۲ گراف در این مرحله ارائه گردید. بدین ترتیب در این تحقیق، ۹۹ حالت مختلف بررسی و ۳۹۶ گراف تنش و کرنش در مقابل زمان تهیه گردید.

### تحلیل آماری

در این پژوهش، تاثیر پارامترهای طراحی به عنوان متغیرهای مستقل بر تغییرات تنش و کرنش به عنوان متغیرهای وابسته، بررسی گردید. جهت تحلیل تاثیر تغییر مقادیر متغیرهای مستقل بر متغیرهای وابسته، از رگرسیون خطی به روش گام به گام استفاده شد. در مدل گام به گام، در سه لایه آسفالتی موجود، ضخامت لایه‌ها، ضریب پواسون و مدول یانگ هر یک از سه لایه، به عنوان ۹ متغیر مستقل و مقادیر تنش و کرنش در دو تاریخچه زمانی مختلف، به عنوان متغیر وابسته لحاظ شده است. برای تحلیل اطلاعات گراف‌های بدست آمده، از نرم‌افزار اس پی

جهت بررسی روسازی ماندگار مد نظر با سه لایه آسفالتی، ابتدا با ثابت در نظر گرفتن مدول یانگ و ضخامت‌ها، ضریب پواسون برای هر لایه، از مقدار ۰/۳ تا ۰/۴ با گام ۰/۰۱ افزایش داده شد (۳۳ حالت) و برای دو حالت تنش و کرنش ثابت و با در نظر گرفتن دو تاریخچه زمانی، در مجموع ۱۳۲ گراف به عنوان خروجی نرم‌افزار، در این بخش تهیه گردید.

سپس با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای مدول یانگ و ضریب پواسون، تاثیر ضخامت لایه‌ها بر تنش و کرنش در هر سه لایه بصورت مجزا بررسی شد که در هر مرحله ضخامت هر لایه، با نرخ یک سانتی‌متر مطابق مراحل ذیل، افزایش داده شد.

گام اول: تغییر ضخامت لایه اول از ۳ سانتی‌متر تا ۱۳ سانتی‌متر (۱۱ حالت)، گام دوم: تغییر ضخامت لایه دوم از ۱۳ سانتی‌متر تا ۲۳ سانتی‌متر (۱۱ حالت)، گام سوم: تغییر ضخامت لایه سوم از ۵ سانتی‌متر تا ۱۵ سانتی‌متر (۱۱ حالت) که نتیجه آن ۳۳ حالت و ۱۳۲ خروجی گراف دیگر برای این مرحله شد.

در انتها با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای ضخامت و ضریب پواسون لایه‌ها، تاثیر مدول یانگ بر تنش و کرنش بوجود آمده به شرح ذیل بررسی گردید:

زمانی، مدل‌های مختلفی در نرم افزار ارائه گردید و مدلی که بیشترین ارتباط معنایی را با متغیرها داشت به عنوان گزینه قابل قبول طرح در این بخش انتخاب و برای آن گراف‌های مربوطه ارائه گردید. به عنوان مثال، در حالت کرنش در تاریخچه زمانی ۰/۱ ثانیه، شش مدل مختلف طبق جدول ۷ (خلاصه مدل<sup>۱۶</sup>) مطرح شد که مدل شماره ۶، با توجه به مقدار  $p$ -value و  $Sig < 0.05$ ، به عنوان بهترین مدل در این حالت انتخاب گردید.

اس اس<sup>۱۵</sup> استفاده گردید. در ادامه تحقیق، اطلاعات تنش در دو تاریخچه زمانی ۰/۱ و ۰/۱۶۴، اطلاعات کرنش در دو تاریخچه زمانی ۰/۱ و ۰/۱۶۴ و در نهایت میانگین تنش و کرنش‌ها بدون تاریخچه زمانی، تحلیل شد که منجر به ارائه شش مدل مطابق روابط ۵ تا ۱۰ و شکل‌های ۹ تا ۱۴ گردید. همچنین بر اساس درصد سهم و اثرگذاری هر یک از متغیرهای مستقل، در واریانس متغیر وابسته، برای حالت‌های تنش و کرنش در تاریخچه زمانی مد نظر و تنش و کرنش نهایی بدون در نظر گرفتن تاریخچه

جدول ۷. خلاصه مدل رویکردهای مختلف برای کرنش در زمان ۰/۱ ثانیه

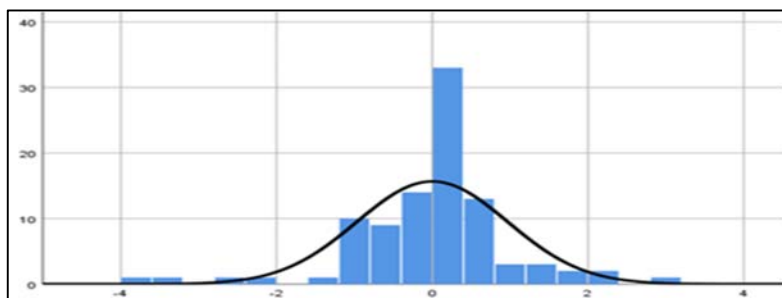
شماره مدل	خطای استاندارد	ضریب تعیین تعدیل شده	ضریب تعیین	ضریب همبستگی پیرسون
۱	۰/۰۰۰۰۰۰۶۷۹۱۰۳۸	۰/۳۳۸	۰/۳۴۵	۰/۵۸۷
۲	۰/۰۰۰۰۰۰۴۹۶۶۹۴۱	۰/۶۴۶	۰/۶۵۳	۰/۸۰۸
۳	۰/۰۰۰۰۰۰۲۳۷۷۵۵۷	۰/۹۱۹	۰/۹۲۱	۰/۹۶۰
۴	۰/۰۰۰۰۰۰۱۹۱۷۷۳۰۰	۰/۹۴۷	۰/۹۴۹	۰/۹۴۷
۵	۰/۰۰۰۰۰۰۱۸۰۹۰۴۸	۰/۹۵۳	۰/۹۵۶	۰/۹۷۸
۶	۰/۰۰۰۰۰۰۱۷۲۴۲۳۳	۰/۹۵۳	۰/۹۶۰	۰/۹۸۰

در این جدول، مقدار ضریب همبستگی پیرسون<sup>۱۷</sup>، نشانگر همبستگی بین مقدار متغیرهای وابسته و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل است. هر چه این ضریب به ۱ یا -۱ نزدیکتر باشد، یعنی مدل توانسته بهتر تغییرات متغیر وابسته را نشان دهد. ضریب تعیین تعدیل شده<sup>۱۸</sup> در مدل‌های رگرسیونی، میزان تغییرات در متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل را تبیین می‌کند. در جدول ۸، تحلیل واریانس<sup>۱۷</sup> برای گزینه قابل قبول یعنی مدل شماره ۶، ارائه گردیده است. برای سایر حالت‌های تنش و کرنش، فقط نتایج جدول خلاصه مدل و تحلیل واریانس، در قسمت مربوطه آورده شده است. در ادامه، برای بهترین مدل در هر حالت (منظور شش حالت تنش و کرنش در دو تاریخچه زمانی متفاوت و میانگین تنش و کرنش می‌باشد)، یک معادله رگرسیونی ارائه می‌گردد که پارامترهای استفاده شده در این مدل‌ها، به شرح ادامه می‌باشند.

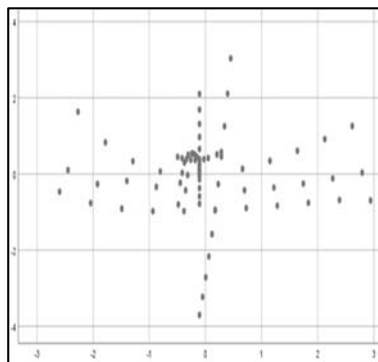
$\epsilon_1$ : کرنش در زمان ۰/۱ ثانیه،  
 $\epsilon_2$ : کرنش در زمان ۰/۱۶۴ ثانیه،  
 $\delta_1$ : تنش در زمان ۰/۱ ثانیه،  
 $\delta_2$ : تنش در زمان ۰/۱۶۴ ثانیه،  
 $\epsilon$ : میانگین کرنش،  
 $\delta$ : میانگین تنش،  
 $H_1, H_2, H_3$ : ضخامت لایه‌های اول تا سوم،  
 $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ : ضریب پواسون لایه‌های اول تا سوم،  
 $E_1, E_2, E_3$ : مدول یانگ لایه‌های اول تا سوم.  
 در ادامه، مدل‌های رگرسیونی و گراف‌های خروجی SPSS برای بهترین مدل حالت‌های مختلف تنش و کرنش ذکر شده، به ترتیب ارائه می‌شوند.  
 مدل رگرسیونی به دست آمده از کرنش در زمان ۰/۱ ثانیه، مطابق شکل ۹ و رابطه ۵ ارائه شده است.

جدول ۸. تحلیل یا آنالیز واریانس رگرسیون خطی کرنش در زمان ۰/۱ ثانیه برای متغیرهای مستقل مدل شماره ۶

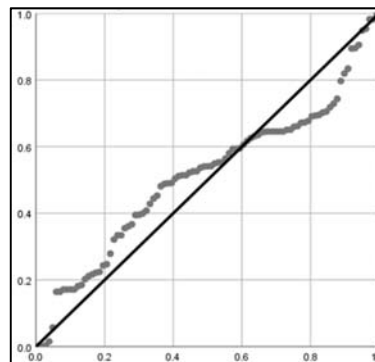
مجموع مربعات پراکندگی	درجه آزادی	میانگین مجموع مربعات	آماره F	میزان بزرگی	رگرسیون باقیمانده مجموع متغیر شماره
۰/۰۰۰	۱	۰/۰۰۰	۴۸/۹۹۶	۰/۰۰۰	۱
۰/۰۰۰	۹۳	۰/۰۰۰			
۰/۰۰۰	۹۴	۰/۰۰۰			۲
۰/۰۰۰	۲	۰/۰۰۰	۸۶/۶۹۳	۰/۰۰۰	
۰/۰۰۰	۹۲	۰/۰۰۰			۳
۰/۰۰۰	۹۴	۰/۰۰۰			
۰/۰۰۰	۳	۰/۰۰۰	۳۵۵/۷۴۲	۰/۰۰۰	۴
۰/۰۰۰	۹۱	۰/۰۰۰			
۰/۰۰۰	۹۴	۰/۰۰۰			۵
۰/۰۰۰	۴	۰/۰۰۰	۴۲۲/۵۶۶	۰/۰۰۰	
۰/۰۰۰	۹۰	۰/۰۰۰			۶
۰/۰۰۰	۹۴	۰/۰۰۰			
۰/۰۰۰	۵	۰/۰۰۰	۳۸۲/۳۱۵	۰/۰۰۰	۷
۰/۰۰۰	۸۹	۰/۰۰۰			
۰/۰۰۰	۹۴	۰/۰۰۰			۸
۰/۰۰۰	۶	۰/۰۰۰	۳۵۳/۳۸۲	۰/۰۰۰	
۰/۰۰۰	۸۸	۰/۰۰۰			۹
۰/۰۰۰	۹۴	۰/۰۰۰			



الف. رگرسیون استاندارد شده



پ. وابستگی و پراکندگی داده‌ها



ب. برازش داده‌ها

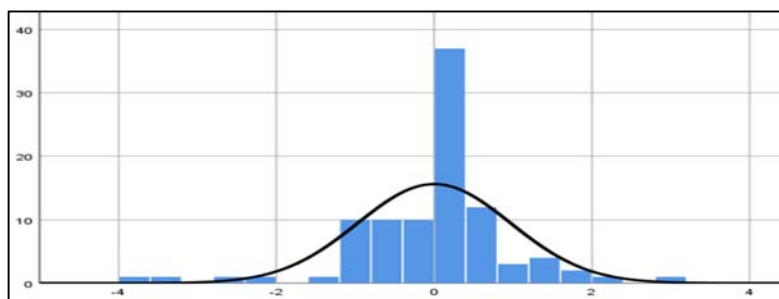
شکل ۹. کرنش در زمان ۰/۱ ثانیه

بودن این دو مقدار، نشانگر آن است که متغیرهای به کار رفته در مدل، توانسته‌اند به خوبی به کار آیند و در نهایت برازش مناسبی ارائه دهند.

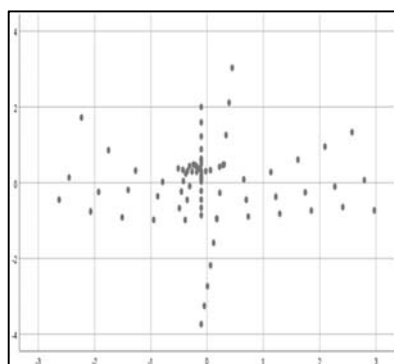
در ادامه، مدل رگرسیونی کرنش در زمان ۰/۱۶۴ ثانیه، مطابق شکل ۱۰ و رابطه ۶ ارائه شده است.

در این حالت، ضریب همبستگی برابر ۰/۹۸ می‌باشد که عدد قابل قبولی است. مربع ضریب همبستگی نیز، در این حالت برابر با ۰/۹۶ است که نشانگر سهم ۹۶ درصدی مدل در بیان پراکندگی متغیر وابسته به کرنش در این تاریخچه زمانی است. در این مدل، ضریب تعیین برابر ۰/۹۶ بدست آمد در حالیکه مقدار ضریب تعیین اصلاح شده برابر با ۰/۹۵۳ بود که نزدیک

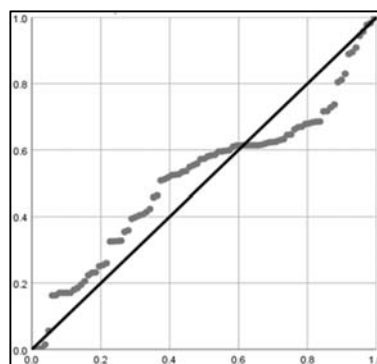
$$\varepsilon_1 \times 10^3 = 0.194 + 0.0045H_3 + 0.043H_2 + 0.040H_1 + 0.005\mu_1 + 0.0006\mu_3 + 1062.3\mu_2 - 7000E_2 \quad (5)$$



الف. رگرسیون استاندارد شده



ب. وابستگی و پراکندگی داده‌ها



ب. برازش داده‌ها

شکل ۱۰. کرنش در زمان ۰/۱۶۴ ثانیه

در ادامه، مدل رگرسیونی به دست آمده برای تنش در زمان ۰/۱ ثانیه، مطابق شکل ۱۱ و رابطه ۷ ارائه شده است.

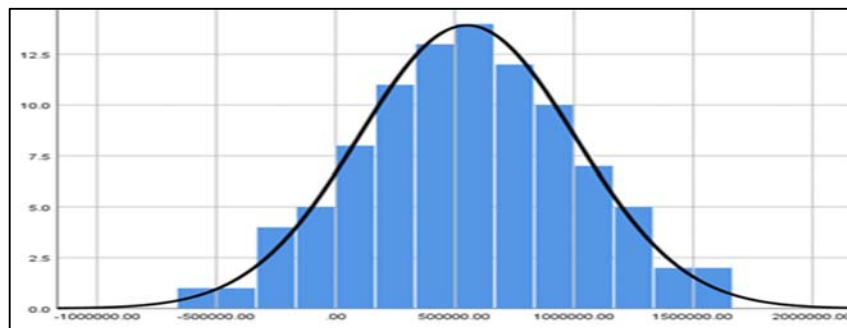
در مدل ارائه شده برای کرنش در ۰/۱۶۴ ثانیه، مقدار ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۹۷۸، مربع ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۵۶، ضریب تعیین اصلاح شده برابر ۰/۹۵۶ بدست آمد.

$$\varepsilon_2 \times 10^{-3} = 0.319 + 0.07H_3 + 0.068H_2 + 0.063H_1 + 0.007\mu_1 + 0.011\mu_3 + 1237.2\mu_2 - 7000E_2 \quad (6)$$

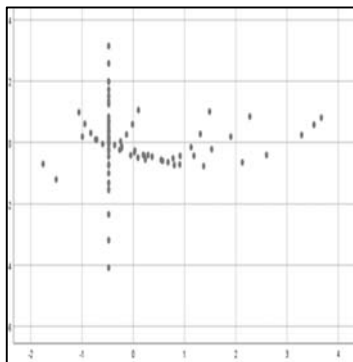
مدل رگرسیونی به دست آمده برای تنش در زمان ۰/۱۶۴ ثانیه، مطابق شکل ۱۲ و رابطه ۸ تعیین گردید.

در مدل ارائه شده برای تنش در ۰/۱ ثانیه، مقدار ضریب همبستگی پیرسون مدل برابر با ۰/۹۱۹، مربع ضریب همبستگی نیز مقدار ۰/۸۴۵ و ضریب تعیین اصلاح شده نیز برابر با ۰/۸۳۰ تعیین گردید.

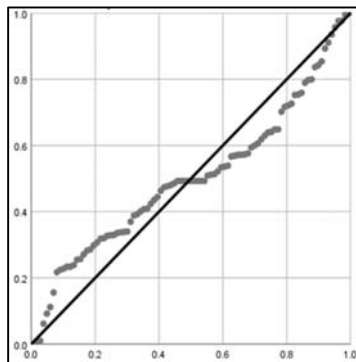
$$\delta_1 \times 10^{-3} = 0.11 + 0.14H_2 + 0.002E_1 + 0.023H_1 + 0.012H_3 + 0.042\mu_1 + 0.007\mu_3 + 0.001\mu_2 - 0.0006E_3 \quad (7)$$



الف. رگرسیون استاندارد شده

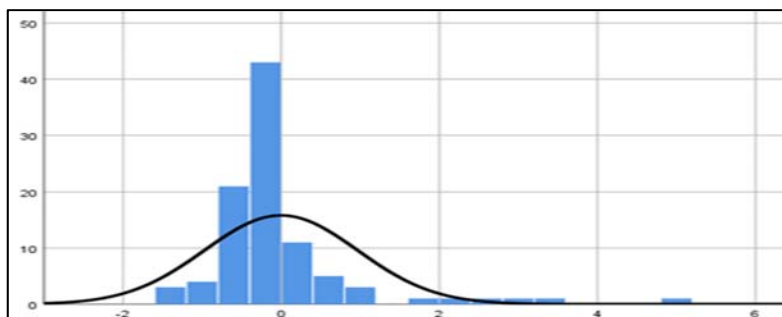


پ. وابستگی و پراکندگی داده‌ها

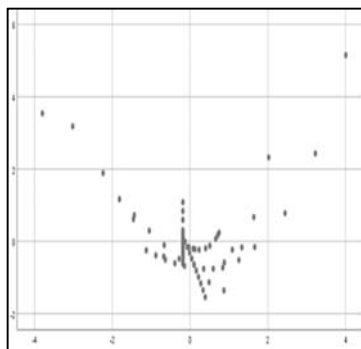


ب. برازش داده‌ها

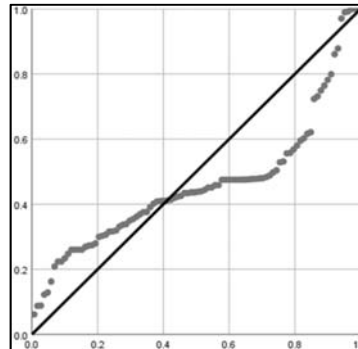
شکل ۱۱. تنش در زمان ۰/۱ ثانیه



الف. رگرسیون استاندارد شده



پ. وابستگی و پراکندگی داده‌ها



ب. برازش داده‌ها

شکل ۱۲. تنش در زمان ۰/۱۶۴ ثانیه

$$\delta_2 \times 10^{-3} = 0.002 + 0.30H_2 + 0.0031E_1 + 0.0471H_1 - 0.009H_3 + 0.0007\mu_1 \quad (8)$$

زمانی ذکر شده، برای تنش و کرنش یک معادله واحد تعریف شده است.

بعد از نرمال کردن داده‌ها، مشخصات در دو حالت تنش نهایی و کرنش نهایی جدید در جدول ۹ ارائه شده است.

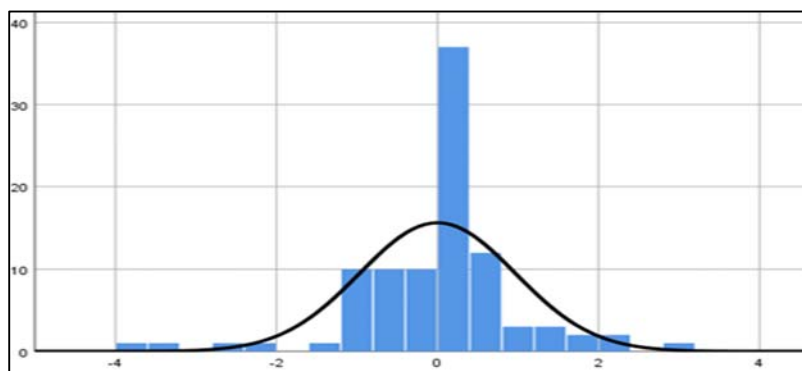
در مدل ارائه شده برای تنش در ۰/۱۶۴ ثانیه، ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۹، مربع ضریب همبستگی برابر با ۰/۸۱۱ و ضریب تعیین اصلاح شده برابر ۰/۸۱۱ تعیین گردید. در ادامه، پس از نرمالسازی و با میانگین‌گیری از داده‌ها در دو تاریخچه

جدول ۹. جدول خلاصه برازش مدل برای حالت‌های نهایی بعد از نرمال کردن داده‌ها

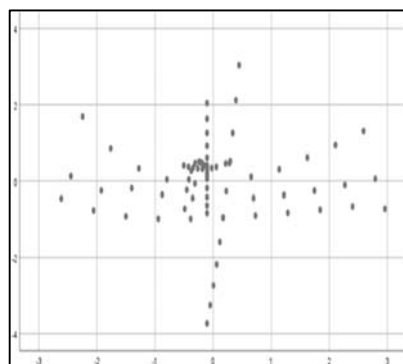
نوع مدل	خطای استاندارد برآورد	ضریب تعیین اصلاح شده	مربع ضریب همبستگی	ضریب همبستگی پیرسون
کرنش ثابت نهایی	۰/۰۰۰۰۰۰۲۳۰۰۲۲۱	۰/۹۵۵	۰/۹۵۸	۰/۹۷۹
تنش ثابت نهایی	۰/۰۰۰۰۰۰۴۱۳۶۹۸۵	۰/۸۲۰	۰/۸۳۰	۰/۹۱۱

رگرسیون به دست آمده از تنش ثابت نهایی، بدون در نظر گرفتن تاریخچه زمانی نیز با استفاده از میانگین‌گیری از داده‌ها مطابق شکل ۱۴ و رابطه ۱۰ ارائه شده است.

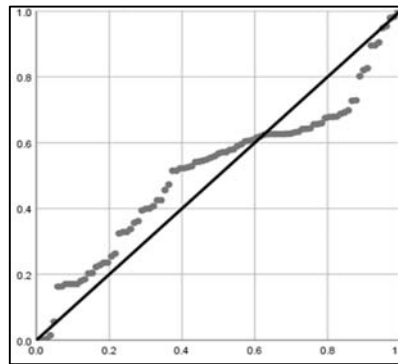
مدل رگرسیونی به دست آمده از کرنش ثابت نهایی بدون در نظر گرفتن تاریخچه زمانی با استفاده از میانگین‌گیری از داده‌ها مطابق شکل ۱۳ و رابطه ۹ ارائه شده است. همچنین مدل



الف. رگرسیون استاندارد



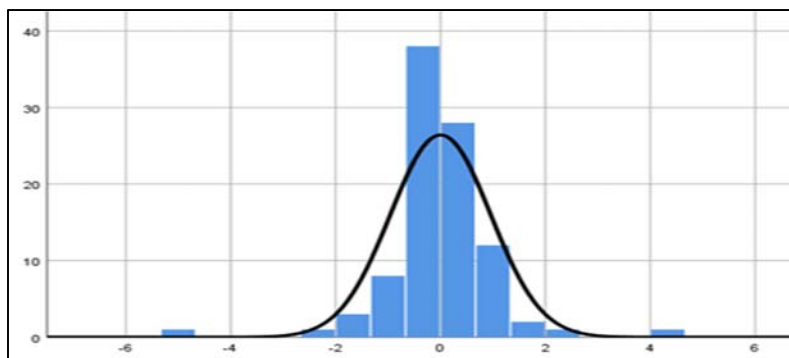
ب. وابستگی و پراکنندگی داده‌ها



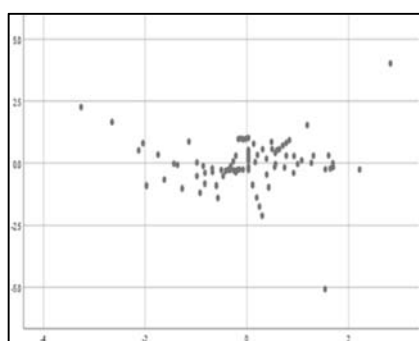
ب. برازش داده‌ها

شکل ۱۳. کرنش ثابت نهایی

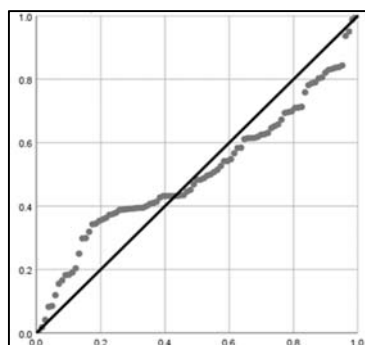
$$\varepsilon \times 10^{-3} = 0.25 + 0.005H_3 + 0.005H_2 + 0.005H_1 + 0.0006\mu_1 + 0.008\mu_3 + 1399.7\mu_2 - 7000E_2 \quad (9)$$



الف. رگرسیون استاندارد شده



ب. وابستگی و پراکنندگی داده‌ها



ب. برازش داده‌ها

شکل ۱۴. تنش ثابت نهایی

$$\delta \times 10^{-3} = 0.23 + 0.001E_1 + 0.001H_1 - 7000E_3 + 5875.3\mu_1 + 0.002\mu_3 + 3694.7\mu_2 - 7000E_2 \quad (10)$$

در دو تاریخچه زمانی داشته باشند و از اعتبار مناسبی برخوردار باشند.

-هر دو تابع نهایی به دست آمده ناشی از میانگین‌گیری و نرمالسازی تنش‌ها و کرنش‌ها که در متن با عنوان معادلات شماره ۹ و ۱۰ ذکر شده‌اند، روابطی با اعتبار قابل قبول هستند.

- در حالت کرنش: متغیرهای مستقل ضخامت لایه‌های اول تا سوم، ضریب پواسون لایه اول و سوم و همچنین مدول یانگ لایه دوم در سطح معنی‌داری برای تخمین کرنش قرار دارند.

- برای حالت تنش: متغیرهای مستقل ضخامت لایه اول، ضریب پواسون لایه اول و همچنین مدول یانگ لایه اول تا سوم در سطح معنی‌داری برای تخمین تنش قرار دارند.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با مدل‌سازی مقطعی از روسازی ماندگار، سه لایه بالایی آن که از جنس روسازی آسفالتی فرض شد، مورد ارزیابی قرار گرفت و با متغیر در نظر گرفتن پارامترهای طراحی شامل ضخامت، ضریب پواسون و مدول یانگ لایه‌ها، تاثیر این پارامترها در یک تاریخچه زمانی بر تنش و کرنش ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت، در انتها با استفاده از مدل‌سازی رگرسیونی، مدل بهینه تعیین گردید. پس از انجام مراحل ذکر شده، نمودارهای تنش و کرنش بوجود آمده در روسازی، در دو تاریخچه زمانی، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و نتایج ذیل حاصل شد:

- مقادیر ضریب همبستگی و مربع آن در نتایج نرم‌افزار، نشان داد که مدل‌ها توانسته‌اند پیش‌بینی مناسبی از متغیرهای وابسته

۶- پی‌نوشت‌ها

doi:10.22034/road.2021.284943.1952

-A. A. Amini, M. Mashayekhi, H. Ziari. (2012). Life Cycle Cost Comparison of Highways with Perpetual and Conventional Pavements. *Inter. J. Pavement Eng.* 13 (6) 553-568(in Persian),

doi: 10.1088/1755-1315/1084/1/012053

-AL-Qadi, I. L., Wang, H., Yoo, P. J., & Dessouky, S. H. (2009). Dynamic analysis and in-situ validation of perpetual pavement response to vehicular loading. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2087, 29-39,

doi:10.3141/2087-04.

-Asphalt Pavement Alliance (APA). (2002). *Perpetual Pavements. A Synthesis*. APA 101. Lanham. Maryland.

[https://www.driveasphalt.org/uploads/documents/Perpetual\\_Pavement\\_Synthesis.pdf](https://www.driveasphalt.org/uploads/documents/Perpetual_Pavement_Synthesis.pdf).

-Chundi Si. Hang Cao. Enli Chen. Zhanping You. Ruilan Tian. Ran Zhang and Junfeng Gao (2018). Dynamic Response Analysis of Rutting Resistance Performance of High Modulus Asphalt Concrete Pavement. *Journal of Applied Sciences*.8. 2701. App122701.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.183

-Hafez, M., Mousa, R., Awed, A., & El Badawy, S. (2018). Soil Reinforcement Using Recycled Plastic Waste for Sustainable Pavements International Congress and Exhibition Sustainable Civil Infrastructures. *Innovative Infrastructure Geotechnology*, Cham.

doi:10.1007/978-3-030-01911-2\_2

-Harvey, John & Meijer, Joep & Ozer, Hasan & Al-Qadi, Imad & Saboori, Arash & Kendall, Alissa. (2016). Pavement Life Cycle Assessment Framework Harvey, John T., Joep Meijer, Hasan Ozer, Imad L. Al-Qadi, Arash Saboori, and Alissa Kendall.

Doi:10.1201/9781003092278-38

-Hernandez, J.A. (2010). Evaluation of the Response of Perpetual Pavement at Accelerated Pavement Loading Facility: Finite Element Analysis and Experimental Investigation [Master's thesis, Ohio University]. *OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center*.

[http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc\\_num=ohiou1281705838](http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=ohiou1281705838).

-Jim Huddleston. P.E. Mark Buncher. Ph.D. P.E. David Newcomb. (2004). Asphalt Pavement Alliance Perpetual Pavement. Asphalt pavements and its applications to U.S. 30 perpetual pavement. *Ph.D. Dissertation, Civil Engineering Department, Ohio University, Athens, OH*. 2007.

-Junqing Zhu, Shad Sargand, Issam Khoury, Derar Tarawneh, Tao Ma, Feng Chen (2022). Dynamic load responses of perpetual pavement test roads on U.S. 23: Full-scale instrumentation and evaluation, *Construction and Building Materials*, Vol. 331, 2022, 127326, ISSN 0950-0618.

doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127326

1. Perpetual Pavement (PP)
2. Asphalt Pavement Alliance (APA)
3. Fatigue Cracks
4. Rutting
5. ABAQUS
6. Minnesota
7. Cedar Rapids
8. Barranquilla
9. Life Cycle Cost (LCA)
10. Life Cycle Cost Analysis (LCCA)
11. PUNE
12. Odemark
13. CVL
14. Williams-Landel-Ferry (WLF)
15. Statistical Package for Social Science (SPSS)
16. Model Summary
17. Analysis of Variance (ANOVA)
17. Pearson Coefficient of Correlation
18. R<sup>2</sup> adjusted (Adjusted R Square)

۷- مراجع

- اویسی فر، مرتضی و عابدینی، محمد (۱۴۰۲). طراحی مدل سرعت وسایل نقلیه بر خرابی بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر. فصلنامه جاده، ۳۱(۱۱۷)، ۱۹۵-۲۱۲.

doi: 10.22034/road.2023.382270.2134

-برادران، ساجد و عامری، محمود (۱۴۰۲). بررسی خرابی شیارشدگی در مخلوط‌های آسفالتی و راهکارهای بهبود آن. فصلنامه جاده، ۳۱(۱۱۴)، ۷۰-۵۳.

doi: 10.22034/road.2022.337945.2041

-جعفری، محمد حسین. حسین جانزاده، حسین و دیواندری، حسن. (۱۳۹۷). اولویت‌بندی گزینه‌های تعمیر و نگهداری روسازی راه با رویکرد محدودیت بودجه (مطالعه موردی: محور کلارآباد-عباس‌آباد). فصلنامه جاده، ۲۶(۹۵).

[https://road.bhrc.ac.ir/article\\_65618.html](https://road.bhrc.ac.ir/article_65618.html)

-ظاهرخانی، حسن و جلالی جیرندهی، مسعود. (۱۳۹۵). تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی جهت مدل‌سازی به روش المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS. فصلنامه جاده، ۲۴(۸۹)، ۲۳۶-۲۱۹.

[https://road.bhrc.ac.ir/article\\_50957.html](https://road.bhrc.ac.ir/article_50957.html)

-غنی زاده، علیرضا و صالحی، ماندانا. (۱۴۰۰). مقایسه پاسخ‌های بحرانی روسازی حاصل از تحلیل غیرخطی با استفاده از نظریه چندلایه‌ای و روش المان محدود. فصلنامه جاده، ۲۹(۱۰۹)، ۵۶-۴۳.

- Sahis, M. K., Biswas, P. P., Sadhukhan, S., Saha, G. (2023). Mechanistic-empirical Design of Perpetual Road Pavement Using Strain-based Design Approach. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(4), 1105–1114.  
**doi.org/10.3311/PPci.19745**
- Schram, S. linna. (2018). 100Perpetual Pavemen Technical Presentation. *Iowa Department of Transportation*. Ames. IA.
- Seyed Masoud Hadian (2019). Evaluation of Viscoelastic Properties of Asphalt Mixtures by Finite Element Modeling Using Abaqus Software. *Sumerianz Journal of Scientific Research* .Vol. 2. No. 4. 49-54.  
<https://ideas.repec.org/a/sum/sjsrsm/2019p49-54.html>
- Sogayise, L. (2023). Mechanistic response of conventional vs perpetual flexible pavements under similar loading condition : a 3-d finite element analysis. *Papers presented virtually at the 41st International Southern African Transport Conference on 10-13 July*.  
<http://hdl.handle.net/2263/92501>
- TxDOT (2001). Memorandum on Full-depth Asphalt Pavements, Flexible Pavement Design Task Force Implementation. Texas Department of Transportation. *Austin*. Texas. April 23.
- Walubita. L.F., Hu. S and Scullion.T. (2009). The Texas Perpetual Pavement Database Users' Manual. *Technical Report 0-4822-4.TTI*. College Station.  
[https://scholar.google.com/scholar?cluster=641514013769847475&hl=en&as\\_sdt=2005&scioldt=0,5](https://scholar.google.com/scholar?cluster=641514013769847475&hl=en&as_sdt=2005&scioldt=0,5)
- Wang, Yuhong (2022). Determination of the stiffness moduli and fatigue endurance limits of asphalt pavements for perpetual pavement design. PolyU Electronic Theses. *Color Illustrations*. 350-351.  
<https://theses.lib.polyu.edu.hk/handle/200/12176>.
- Kulkarni, S., Ranadive, M. (2022). Comparative Study between Proposed Rigid Pavement and Flexible Perpetual Pavement for Western Alignment of Pune Ring Road. In: Laishram, B., Tawalare, A. (eds) Recent Advancements in Civil Engineering. ACE 2020. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol. 172. Springer, Singapore.  
**doi.org/10.1007/978-981-16-4396-5\_65**
- Liao, Y. (2007). Viscoelastic FE modeling of asphalt pavements and its applications to U.S.30 perpetual pavement. *Ph.D. Dissertation, Civil Engineering Department, Ohio University. Athens. OH*.  
[http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc\\_num=ohiou1190919049](http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=ohiou1190919049)
- Masada, T. (2007). Laboratory characterization of materials and data management for Ohio-SHRP project. (U.S.23) Report No. FHWA/OH-2001/07. *Department of civil engineering, Ohio University. Athens, Ohio*.
- Mohammadreza Sabouri (2020). An investigation on perpetual asphalt pavements in Minnesota. *International Journal of Pavement Research and Technology*. Chinese Society of Pavement Engineering. *Production and Hosting by Springer Nature*.  
**doi.org/10.1007/s42947-020-0149-2**  
[https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/20634/dot\\_20634\\_DS1.pdf](https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/20634/dot_20634_DS1.pdf)
- Newcomb. D.E. Willis. R & Timm, D.H. (2010). Perpetual asphalt pavements: A synthesis. [http://asphaltroads.org/documents/Perpetual\\_Pavement\\_Synthesis.pdf](http://asphaltroads.org/documents/Perpetual_Pavement_Synthesis.pdf)
- Rodrigo Polo-Mendoza, Otto Mora, Jose Duque, Emilio Turbay, Gilberto Martinez-Arguelles, Luis Fuentes, Oswaldo Guerrero, Sergio Perez .(2023). Environmental and economic feasibility of implementing perpetual pavements (PPs) against conventional pavements: A case study of Barranquilla city, Colombia, *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 18, ISSN 2214-5095.  
**doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02112**

# Presenting a Model of the Effect of Design Parameters on Stress and Strain in Perpetual Pavement by Finite Element Method

*Hassan Divandari, Civil Engineering Department, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.*

*Iraj Ekraghanbary, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Nowshahr Branch, Islamic Azad University, Nowshahr, Iran.*

*E-mail: ha.divandari@iau.ac.ir*

Received: August 2024- Accepted: December 2024

## **ABSTRACT**

Today, durability, lower cost and long life of pavement, play a very important role in choosing the type of pavement. In this research, with Abacus finite element software, a type of pavement called perpetual pavement is modeled, then by making the rate of changes in design parameters, which are: layer thickness, Poisson's coefficient and Young's modulus, in 3 The cross-sectional asphalt layer is tested on strain and stress at two different times of 0.1 and 0.164 seconds in 96 different models. The software data are analyzed by multivariate regression model and stepwise method and the final equation for strain and stress is reached which has a suitable correlation coefficient. The results show that in the strain mode, the change in thickness of the first to third layers, the Poisson coefficient of the first and third layers as well as the Young modulus of the second layer are at a significant level. For the stress state, the change in the thickness of the first layer, the Poisson's ratio of the first layer as well as the Young's modulus of the first to third layers are at a significant level for the stress.

**Keywords:** Perpetual Pavement, Finite Elements, Pavement Design Parameters, Pavement Modeling