



## Evaluation of Fatigue Life of Asphalt Pavement under the Effect of Load Speed and Tire Inflation Pressure by Numerical Method

Alireza Shokouhi<sup>1</sup>, Gholamali Shafabakhsh<sup>2✉</sup>, Peyman Hassanzadeh<sup>3</sup>

1. Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: [alirezashokouhi1369@gmail.com](mailto:alirezashokouhi1369@gmail.com)
2. Corresponding author, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran. E-mail: [shafabakhsh@semnan.ac.ir](mailto:shafabakhsh@semnan.ac.ir)
3. Department of Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: [pe\\_civ2022@yahoo.com](mailto:pe_civ2022@yahoo.com)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received 16 Jun 2024  
Revised 08 Nov 2024  
Accepted 22 Nov 2024  
Published 25 Nov 2024

**Keywords:**  
Top-Down Crack,  
Variable Speed,  
Tire Inflation Pressure,  
Fatigue Life,  
Finite Element Method.

### ABSTRACT

*Fatigue failure is a set of interconnected cracks in the asphalt concrete surface that occurs under repeated traffic loading. Various factors cause this type of cracks, including high repetition of tensile stresses and strains in the lower layers of the asphalt surface, low thickness of the surface or improper connection of its layers, excessive deformation of the pavement layers due to loading, low strength of the subgrade and the speed of passing vehicles. In this research, the tire speed parameter of the vehicle has been investigated in order to evaluate the fatigue life and calculate the parameter of the number of repetitions allowed to pass. Therefore, ABAQUS software was used and only the forces acting on the surface of the asphalt were used to simulate the tire. Also, in order to investigate and analyze the fatigue, the horizontal strain of the asphalt substrate was investigated. In order to check the accuracy, the answers of the model were compared with the results of the Pennsylvania field test that was conducted in 1993 by the US Federal Highway Administration. The results showed that with increasing speed, the values of stress, strain and displacement decrease. The effect of speed on the longitudinal tensile strain at the end of the asphalt layer is more significant at low speeds and the slope of the strain changes graph decreases with increasing speed in such a way that by increasing the speed from 32 kilometers per hour to 56, approximately 37% and up to 80 kilometers per hour, approximately 42% reduction in strain is observed.*

**Cite this article:** Shokouhi A, Shafabakhsh Gh, Hassanzadeh P. Evaluation of Fatigue Life of Asphalt Pavement under the Effect of Load Speed and Tire Inflation Pressure by Numerical Method. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(2): 163-178. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10885.1560>



## ارزیابی عمر خستگی روسازی آسفالتی تحت اثر سرعت بار و فشار باد چرخ به روش عددی

علیرضا شکوهی<sup>۱</sup>، غلامعلی شفابخش<sup>۲</sup>، پیمان حسن‌زاده<sup>۳</sup>

۱. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: [alirezashokouhi1369@gmail.com](mailto:alirezashokouhi1369@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. رایانامه: [shafabakhsh@semnan.ac.ir](mailto:shafabakhsh@semnan.ac.ir)

۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: [pe\\_civ2002@yahoo.com](mailto:pe_civ2002@yahoo.com)

### چکیده

خرابی خستگی عبارت است از مجموعه‌ای از ترک‌های متصل به هم در رویه بتن آسفالتی که تحت تکرار بارگذاری ترافیکی به وجود می‌آید. عوامل مختلفی سبب پیدایش این نوع از ترک‌ها می‌شود، از آن جمله می‌توان تکرار زیاد تنش‌ها و کرنش‌های کششی در تارهای تحتانی رویه آسفالتی، ضخامت کم رویه و یا اتصال نامناسب لایه‌های آن، تغییرشکل بیش از حد لایه‌های روسازی در اثر بارگذاری، مقاومت کم خاک بستر و سرعت وسایل نقلیه عبوری را نام برد. در این تحقیق، پارامتر سرعت چرخ وسیله نقلیه و همچنین فشار باد لاستیک جهت بررسی عمر خستگی و محاسبه پارامتر تعداد تکرار مجاز عبور، مورد بررسی قرار گرفته است. از این‌رو، از نرم‌افزار آباکوس بهره گرفته شد. جهت شبیه‌سازی چرخ، تنها از نیروهای وارده بر سطح رویه آسفالت استفاده شد. همچنین جهت بررسی و آنالیز خستگی، کرنش افقی زیرلایه آسفالتی مورد بررسی قرار گرفت. جهت صحت‌سنجی نیز پاسخ‌های مدل با نتایج آزمایش میدانی پنسیلوانیا که در سال ۱۹۹۳ میلادی و توسط اداره بزرگراه‌های فدرال آمریکا صورت گرفت، مقایسه گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سرعت، مقادیر تنش، کرنش و جابه‌جایی کاهش پیدا می‌کند. تأثیر سرعت بر کرنش کششی طولی انتهای لایه آسفالتی در سرعت‌های پایین چشمگیرتر است و با افزایش سرعت از شیب نمودار تغییرات کرنش کاسته می‌شود، به این صورت که با افزایش سرعت از ۳۲ کیلومتر بر ساعت به ۵۶، تقریباً ۳۷ درصد و تا سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت حدود ۴۲ درصد کاهش کرنش مشاهده می‌گردد.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۰۵

### کلیدواژه‌ها:

ترک بالا به پایین،  
سرعت متغیر،  
فشار باد چرخ،  
عمر خستگی،  
روش اجزای محدود.

استناد: شکوهی علیرضا، شفابخش غلامعلی، حسن‌زاده پیمان. ارزیابی عمر خستگی روسازی آسفالتی تحت اثر سرعت بار و فشار باد چرخ به روش عددی. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳؛ ۱۰(۲): ۱۶۳-۱۷۸. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10885.1560>

## ۱- مقدمه

پدیده‌شناسی معمول‌تر می‌باشد، زیرا تنها نیاز به اندازه‌گیری پاسخ خستگی آزمایشات خستگی در مراحل آغازین است. هرچند این مدل، چگونگی گسترش خرابی در طول عمر خستگی را شامل نمی‌شود و قادر به پیش‌بینی ارزیابی خرابی‌های پیچیده تحت شرایط بارگذاری واقعی نمی‌باشد، اما برای تعدادی از شرایط و حالات بارگذاری کارا می‌باشد. روش مکانیستیک براساس اصول مکانیک شکست است که توسط بسیاری از محققین به کار برده شده و ایرادات روش تجربی را می‌پوشاند [۳].

## ۱-۲- مدل ترک خستگی

پارامتر کرنش کششی و مدول سختی مخلوط در اغلب مدل‌های پیش‌بینی تعداد عبور بار جهت ایجاد ترک دیده می‌شود. مدل نهایی کالیبره‌شده که در روش طراحی مکانیستیک- تجربی استفاده می‌شود به صورت رابطه (۱) خواهد بود:

$$N_f = 0.00432 \times C \times k_1' \left(\frac{1}{\varepsilon_f}\right)^{3.9492} \left(\frac{1}{E}\right)^{1.281} \quad (2)$$

در این رابطه،  $N_f$  تعداد تکرار بار منجر به ترک خستگی، برای تصحیح اثر ضخامت‌های مختلف لایه آسفالت می‌باشد که برای ترک‌های بالا به پایین و پایین به بالا جداگانه براساس ضخامت لایه آسفالتی حساب می‌شود. سایر مقادیر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C = 10^M \quad (3)$$

$$M = 4.84 \times \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.69\right) \quad (4)$$

$$k_1' = \frac{1}{0.000398 + \frac{0.003602}{1 + e^{(11.02 - 3.49h_{ac})}}} \quad (5)$$

$V_b$  درصد فضای پر شده با قیر (حدود پنج درصد)،  $V_a$  درصد فضای خالی آسفالت (حدود چهار درصد) و  $h_{ac}$  ضخامت لایه آسفالتی به اینچ است [۴ و ۵].

علاوه بر مدل مکانیستیک- تجربی مدل‌های دیگری نیز به وسیله پژوهشگران مختلف ارائه شده است. از این

سیستم‌های حمل‌ونقل به عنوان عامل کلیدی و اصلی رشد و توسعه اقتصادی و شریان‌های حیاتی یک کشور از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند. هرچند می‌توان یکی از عوامل رشد اقتصادی کشور را گسترش سیستم حمل‌ونقل راه‌ها دانست، ولی لازمه بهره‌گیری از پتانسیل راه‌های موجود، حفظ و نگهداری آنها است [۱].

در طرح روسازی مهمترین نکته این است که سازه مذکور باید بتواند در دوره بهره‌برداری بدون آنکه دچار خرابی زودرس گردد، اهداف اولیه روسازی را تأمین نماید [۲].

از انواع ترک‌خوردگی می‌توان به ترک‌های خستگی (پوست‌سوسماری)، ترک‌های طولی، ترک‌های عرضی، ترک‌های بلوکی و غیره اشاره کرد. خرابی‌های لایه آسفالتی عموماً به دلیل تنش کششی موجود است؛ در این حالت، ترک اولیه در زیر لایه آسفالتی ایجاد و در کل لایه پخش می‌شود. ترک‌خوردگی پوست‌سوسماری عبارت است از ترک‌های متصل به همدیگر که تحت تکرار بارگذاری ترافیکی به وجود می‌آید [۲]. از عوامل اصلی به وجود آمدن ترک‌های خستگی می‌توان تکرار زیاد تنش‌ها و کرنش‌های کششی در تارهای تحتانی رویه آسفالتی، ضخامت کم رویه و یا اتصال نامناسب لایه‌های آن، تغییرشکل بیش از حد لایه‌های روسازی در اثر بارگذاری و مقاومت کم خاک بستر نام برد.

## ۱-۱- مدل‌های خرابی روسازی

مدل‌های تعیین خرابی، پاسخ سازه‌ای را به انواع خرابی ربط می‌دهند. در واقع این مدل‌ها شاخه‌های فرعی مکانیک شکست می‌باشند. دو روش برای بیان ویژگی‌های خستگی مخلوط آسفالتی به کار می‌رود. روش پدیده‌شناسی و روش مکانیستیک، یکی از متعارف‌ترین و معمول‌ترین کاربردهای مدل خستگی، پدیده‌شناسی مربوط به پاسخ اولیه (مانند کرنش کششی) مخلوط آسفالتی در طی عمر خستگی است. این مدل

آسفالتی کاهش یافته و ضریب شدت تنش بدون توجه به موقعیت عرضی ترک، با افزایش عمق ترک افزایش پیدا می‌کند. در صورت افزایش فاصله ترک تا مرکز وسیله‌نقلیه، ضریب شدت تنش با شیب بیشتری به صورت نمایی کم می‌شود. نتایج همچنین نشان داد که نقطه اوج نمودار تغییرات ضرایب مود اول و دوم شدت تنش در برابر زمان با افزایش نسبت میرایی کاهش می‌یابد و حداکثر کرنش کششی و تنش برشی نیز با افزایش نسبت میرایی کاهش پیدا می‌کند. به این ترتیب با افزایش نسبت میرایی می‌توان در کاهش سرعت و مقدار ترک اثر زیادی را اعمال کرد [۸]. ژائو به کمک نرم‌افزار آباکوس، تحقیقی را بر روی ترک پایین به بالا صورت داد. در این تحقیق به کمک سری پرونی، خصوصیات ویسکوالاستیک به مخلوط آسفالتی داده شد و مدهای مختلف شکست توسط ضرایب شدت تنش مورد بررسی قرار گرفت. طبق این پژوهش، گسترش ترک‌های انعکاسی غالباً تحت تأثیر مدهای اول و دوم شکست بوده ولی این پدیده برای ترک‌های انعکاسی لبه روسازی، برعکس است و مد سوم از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد [۹]. محمود عامری و همکاران، در نرم‌افزار آباکوس به تحلیل مد ترکیبی شکست در نمونه‌های خمشی نیمه‌بیضی (SCB<sup>۷</sup>) پرداختند. خصوصیات لایه‌ها در این تحقیق به صورت الاستیک خطی مدل شد. پژوهشگران برای تحلیل ترک بالا به پایین در یک روسازی آسفالتی با دو روش اجزای محدود و گالرکین، مشخصات الاستیک خطی لایه‌های روسازی را به کار بردند [۶]. یک تحقیق میدانی در واشنگتن آمریکا نشان داد که میزان تأثیر سرعت وسایل نقلیه سنگین بر واکنش‌های روسازی آسفالتی زیاد است، به طوری که با افزایش تدریجی سرعت کامیون، کرنش‌های عرضی حداکثر ایجاد شده در یک لایه آسفالتی به میزان ۱۵ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. یعنی هنگامی که وسیله با سرعت پایین‌تر در حال حرکت است، مقدار خرابی افزایش

دسته پژوهش‌ها می‌توان به مدل مانیس‌میت<sup>۱</sup>، مدل شل<sup>۲</sup>، مدل انستیتو آسفالت<sup>۳</sup> و مدل تایبالی<sup>۴</sup> اشاره نمود [۴] و [۵].

### ۱-۳- پیشینه بررسی ترک‌های آسفالتی به وسیله نرم‌افزارهای المان محدود

محمود عامری و همکاران، تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس بر روی یک مدل سه‌بعدی اجزای محدود از روسازی آسفالتی ترک‌دار انجام دادند. ایشان در این پژوهش نشان دادند که مدهای I، II و III هرکدام به نوبه خود تأثیر زیادی در پیدایش ترک و گسترش درز دارند. این تحقیق با اعمال بار در نقاط مختلف نسبت به صفحه ترک، توانست نشان دهد که شکاف و درز می‌تواند همزمان تحت بازشدگی و لغزش قرار گیرد [۶].

ژائو و هوانگ<sup>۵</sup>، پاسخ روسازی‌های آسفالتی و خرابی خستگی را در اثر بارهای دینامیک به وجود آمده از شرایط ناهمواری و سختی رویه روسازی به روش مکانیستیک-تجربی، مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدل‌سازی نشان داد ضرایب بارگذاری دینامیکی متناسب با افزایش سختی بیشتر می‌شوند، اما با افزایش بار محوری کاهش یافتند. همچنین این تغییرات برای کرنش کششی حداکثر تحت بارهای دینامیکی، بسیار بیشتر از بارهای استاتیک بود [۷].

سان و دوان<sup>۶</sup>، به کمک آباکوس یک ترک بالا به پایین را در یک مدل سه‌بعدی روسازی مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق، تأثیر سرعت، موقعیت و عمق ترک و میرایی مصالح در حالت دینامیکی بود. طبق این پژوهش، در روسازی بدون ترک با افزایش سرعت، کرنش کششی حداکثر در زیر لایه

<sup>1</sup>- Monismith

<sup>2</sup>- Shell Model

<sup>3</sup>- Asphalt Institute Model

<sup>4</sup>- Tayebali Model

<sup>5</sup>- Zhao and Wang

<sup>6</sup>- Lu and Duan

<sup>7</sup>- Semi-Circular Bending Test

می‌یابد [۱۰].

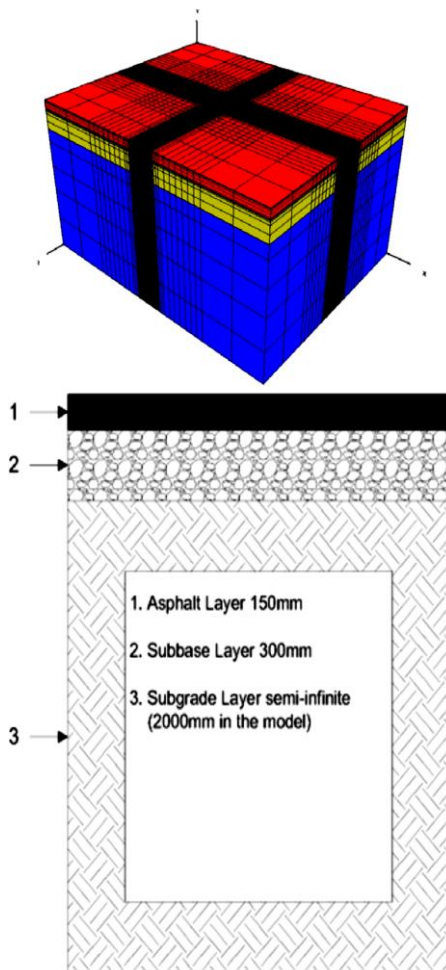
افزایش کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و کرنش عمودی بالای لایه بستر می‌شود [۱۲]. در تحقیقی دیگر، بررسی نحوه گسترش ترک‌های خستگی روسازی آسفالتی در اثر تغییر دما، با استفاده از فرضیه مکانیک شکست پرداخته شد. نتایج نشان داد که مقدار ضریب شدت تنش ارتباط مستقیمی با فاصله مرکز بارگذاری از ترک دارد. همچنین مشاهده شد که در اساس‌های دانه‌ای، مقدار ضریب شدت تنش در حالتی که بار در نزدیکی نوک ترک قرار دارد، افزایش بیشتری را نسبت به حالت اساس سیمانی نشان می‌دهند. این مسئله، تأثیر زیاد نوع اساس را بر تغییرات ضریب شدت تنش نشان می‌دهد. نوع المان محدود در این تحقیق به صورت کرنش صفحه‌ای<sup>۸</sup> بود. در این نوع تحلیل، طول روسازی نسبت به ضخامت آن بینهایت در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای در نظر گرفته شده در نرم‌افزار نیز شامل ضریب شدت تنش  $K$ ، انتگرال  $J$ ، مدول برجهنگی  $E$  و ضریب پواسون  $\nu$  می‌باشد [۱۳].

در تحقیقی با عنوان آنالیز حساسیت اثر سرعت وسایل نقلیه بر خرابی‌های روسازی‌های انعطاف‌پذیر با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس که توسط کی‌منش و همکاران صورت گرفت، رفتار لایه‌های اساس و سابگرید به صورت الاستیک در نظر گرفته شده است. این فرض با توجه به این که تحت بارهای عبوری از روسازی در لایه اساس تغییر شکل‌های بزرگ (در محدوده پلاستیک) رخ نمی‌دهد، واقع‌بینانه به نظر می‌رسد. اما رفتار مصالح لایه آسفالتی تحت دما و زمان بارگذاری تغییر می‌کند. به همین دلیل، این لایه را باید به صورت ویسکوالاستیک مدل کرد. با توجه به شرایط اقلیمی و محیطی ایران و وسایل نقلیه عبوری، آن‌ها در مدل‌سازی خود، سطح اثر چرخ وسیله نقلیه را دایره‌ای به شعاع ۲۰ سانتیمتر و شدت تنش وارده بر روسازی را ثابت و مقدار ۳۴۱۶۶۸ فرض کردند. به منظور بررسی اثر سرعت وسایل نقلیه بر روی خرابی‌های روسازی آسفالتی، زمان بارگذاری متغیر فرض شده است. برای مدل‌سازی اثر سرعت در

بار محوری وسایل نقلیه سنگین عاملی کلیدی در تعیین عمر روسازی‌های آسفالتی محسوب می‌شود، به طوری که میزان اثرگذاری فشار باد چرخ به میزان بار محوری وابسته است. در پژوهشی که توسط طاهرخانی و جلالی صورت گرفت، اثرات محورهای با بارهای مختلف در نرم‌افزار Kenlayer مورد بررسی قرار گرفت. محور استاندارد ۸/۲ تنی، محور ۱۰ تنی، محور ۱۳ تنی که همه آن‌ها از نوع محور منفرد با چرخ زوج بودند، بررسی گردید. فشار چرخ در این محورها برابر ۸۲۷ کیلوپاسکال (psi) (۱۲۰) و فاصله بین زوج‌چرخ‌ها برابر ۳۰ سانتیمتر (۱۲) اینچ) در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که با افزایش بار محوری، عمر روسازی کاهش می‌یابد و به‌طور کلی، عمر طرح روسازی برای محورهای با بار کم، با معیار خستگی و برای محورهای با بار بیشتر توسط معیار شیاردگی تعیین می‌شود. همچنین اثر افزایش باد چرخ روی روسازی به بار محوری وابسته است. به طوری که در بار محوری کم و متوسط، فشار بالای باد چرخ باعث افزایش ترک‌های خستگی می‌شود. این درحالی است که در بارهای محوری سنگین، با تغییرات فشار باد لاستیک، تغییرات شیاردگی روسازی ناچیز است. در این تحقیق مشخص شد که بدون در نظر گرفتن بارگذاری نامتقارن در زوج‌چرخ‌ها، لاستیک‌های عریض قدیمی بیشترین خسارت را به روسازی وارد می‌کنند [۱۱]. شفافبخش و طالب صفا با استفاده از نرم‌افزار 3D-Move به بررسی اثر توزیع تنش غیریکنواخت و فشار باد چرخ بر پاسخ روسازی‌های آسفالتی با در نظرگیری آسفالت به‌عنوان یک ماده ویسکوالاستیک پرداختند. نتایج نشان داد که بارگذاری به صورت غیریکنواخت، باعث افزایش کرنش کششی زیرلایه آسفالتی و کرنش عمودی بالای بستر می‌شود و همچنین با افزایش فشار باد چرخ، این مقادیر افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، افزایش فشار باد چرخ با بارگذاری غیریکنواخت، به دلیل تمرکز بیشتر تنش‌های عمودی در مرکز سطح تماس چرخ با روسازی، موجب

<sup>8</sup> - Plane Strain

یکنواخت، برای تمامی ترکیب بارهای فشارچرخ و بار چرخ، تأثیر به‌سزایی روی کرنش‌های به‌دست آمده در لایه رویه دارد. تفاوت بین این دو فشار با افزایش عمق کاهش می‌یابد. در خاتمه، آنان به این نتیجه رسیدند که اگر نیاز به تحلیل پیچیده با دقت بالا بود، تحلیل سه‌بعدی در کنار روش اجزای محدود بهترین گزینه است؛ هرچند اگر نیاز به تحلیل‌های معمولی و عادی باشد، آنگاه ارائه فشار تماسی یکنواخت هم می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱۵].



شکل ۱- تصویر سه‌بعدی از سازه مدل‌شده و ساختار لایه‌ها

[۱۵]

بسکو<sup>۱۲</sup> و همکاران، معیار واقعی تری از شکست خستگی برای روسازی‌های آسفالتی مرتبط با تعداد تکرار بار مجاز به کرنش کششی حداکثر در زیر لایه آسفالتی را

نرم‌افزار آباکوس از دامنه بارگذاری استفاده شده است. نتایج نشان داد که با کاهش مدت زمان بارگذاری (افزایش سرعت) تعداد تکرار منجر به خرابی خستگی، شیارشدگی و ترک‌های نزدیک به سطح افزایش پیدا می‌کند. از این‌رو، در سرعت‌های پایین وسایل نقلیه، احتمال وجود خرابی‌های خستگی، شیارشدگی بستر و ترک‌های نزدیک به سطح بیشتر است و هرچه سرعت وسیله نقلیه کمتر شود، تعداد تکرار بار منجر به خرابی نیز کاهش می‌یابد [۱۴]. رضایی در پژوهشی به مطالعه و بررسی ضرایب شدت تنش تحت ترک در روسازی آسفالتی پرداخت. ترک مدل شده در این تحقیق از نوع پایین به بالا و بارگذاری نیز به صورت فشاری یکنواخت به کمک برنامه‌نویسی در آباکوس تعریف شد. در این پژوهش، پارامترهای جنس و ضخامت، ضرایب پوآسون و خصوصیات دینامیکی لایه‌ها بررسی گردید. مطابق نتایج این تحقیق، ضریب شدت تنش با افزایش مدول الاستیسیته لایه‌ها کاهش یافته و همچنین بار افقی باعث گسترش دامنه تأثیر بارگذاری تا فاصله‌های دورتر از محل ترک می‌شود. از طرف دیگر، عمر روسازی با ضرایب میرایی آسفالت رابطه عکس دارند و افزایش ضرایب، کاهش عمر سازه روسازی را در پی دارد [۳].

درموت‌بی‌کیسی<sup>۹</sup> و همکاران در تحقیقی به بررسی فشار تماسی یکنواخت لاستیک و فشار سه‌بعدی آن به کمک اجزای محدود پرداختند. در این تحقیق، یک میس اجزای محدود از سازه روسازی به صورت سه‌لایه‌ای نازک (شکل ۱) در نرم‌افزار CAPA-3D مدل شد و علاوه بر فشار چرخ<sup>۱۱</sup>، بار چرخ<sup>۱۱</sup> نیز اعمال شده است. فشار چرخ معادل،  $\pm 200$  کیلوپاسکال در نظر گرفته شد. کرنش‌های کلیدی و بحرانی در نقاط مختلف سازه روسازی متناسب با خرابی‌های مرتبط با آن‌ها اندازه‌گیری شدند. نتایج نشان داد که فشار تماسی سه‌بعدی به نسبت فشار تماسی

<sup>۹</sup>- Dermot B Casey

<sup>۱۰</sup>- Inflation Pressure

<sup>۱۱</sup>- Tire Load

<sup>۱۲</sup>- Beskou

نشان می‌دهد که این ترک‌ها در سه مرحله می‌توانند در روسازی شکل گیرند. همچنین ترک‌ها از یک عمق مشخص، زاویه ۲۰ تا ۴۰ درجه نسبت به صفحه عمود خواهند ساخت. ترک‌های از بالا به پایین حرارتی، غالباً قابل اغماض هستند. در حال حاضر، هیچ روش آزمایشی به طور جهانی به‌عنوان مناسب برای توصیف تجربی عملکرد ترک‌های از بالا به پایین در مخلوط‌های آسفالتی تأیید نشده است [۱۸].

تأثیر دما و خواص مواد، حوزه اصلی مورد توجه در رفتار روسازی آسفالتی می‌باشد. سیواپراکاش<sup>۱۵</sup> و همکاران، طی پروژه‌ای تلاش کردند تا تأثیر خواص مواد ترکیب محور در محدوده دوره خستگی را بر روی رفتار سطح مقطع‌های مختلف روسازی بررسی کنند. در این مطالعه، مقطع عرضی روسازی تحت سه نسبت باربری متفاوت کالیفرنیا (CBR) مورد بررسی قرار گرفت و کرنش کششی افقی با کمک نرم‌افزار مشخص گردید. تأثیر خواص مواد مانند مدول الاستیسیته، نسبت پواسون مخلوط قیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است و تأثیر پیکربندی‌های تک‌محور و محور پشت سر هم در دماهای خستگی کم و زیاد مورد بررسی قرار گرفتند. علاوه بر این، کارایی ساختار روسازی برای خواص مختلف مواد و پیکربندی محورها در دمای خستگی کم و زیاد مورد ارزیابی قرار گرفت [۱۹].

در چهار دهه گذشته، محققین آزمایشات و تحقیقات زیادی را برای بررسی و درک ترک خستگی انجام داده‌اند. سودارسنان و کیم<sup>۱۶</sup>، با هدف ارائه چکیده‌ای از این بررسی‌ها به بحث در مورد مهمترین مدل‌های پدیدار شناختی مکانیستیک جهت پیش‌بینی عمر خستگی روسازی آسفالتی پرداختند. پژوهش ایشان نحوه کاربرد و استفاده مدل‌های رایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری و قابلیت پیش‌بینی عمر خستگی را به تفصیل شرح می‌دهد. این مرور نقادانه با پیش‌بینی عمر خستگی مخلوط

ارائه دادند. این رابطه ترکیبی از رابطه تجربی تعداد تکرارهای بار به‌عنوان یک تابع از ضخامت‌های لایه و بار محورهای به‌دست آمده از آزمایش آشتو می‌باشد. این معیار اثر سرعت و رفتار ویسکوالاستیک را نیز در نظر می‌گیرد [۱۶].

تمرکز محققین در سال‌های اخیر، بیشتر معطوف به موارد جدیدی همچون تأثیر انواع مواد افزودنی و مانند آن گردیده و از تعداد تحقیقات در زمینه عمر خستگی روسازی‌های آسفالتی کاسته شده است.

در پژوهشی دیگر، بررسی تأثیر دما و سرعت بار متحرک بر پاسخ روسازی انعطاف‌پذیر با استفاده از مدل اجزای محدود با نرم‌افزار آباکوس پرداخته شد. برای مدل‌سازی بارگذاری متحرک در شبیه‌سازی از بارهای تکه‌ای در گره‌های متوالی طی مسیر حرکت استفاده شده است و همچنین رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالتی نیز به صورت مدل تعمیم‌یافته ماکسول در قالب سری پرونی لحاظ گردیده است. نتایج نشان داد که افزایش دما و کاهش سرعت باعث افزایش پاسخ روسازی مطالعه‌شده گردیده است و به ازای یک دمای خاص، افزایش سرعت باعث کاهش پاسخ روسازی می‌شود. به‌طوری که بیشترین کرنش‌های کششی زیر سطح لایه آسفالتی به ازای بیشترین دمای مدل‌سازی شده (۴۰ درجه سانتیگراد) و کمترین سرعت (۱۰ کیلومتر بر ساعت) اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج تحلیل نشان داد که کرنش‌های طولی به صورت کششی و کرنش‌های عرضی به صورت کششی-فشاری می‌تواند ظاهر شوند. لازم به ذکر است المان به کار رفته از نوع هشت گره‌ای (C3D8R) و تماس بین لایه‌های روسازی به صورت اتصال کامل<sup>۱۳</sup> مدل شده است [۱۷].

کنستراتی و اینگراسیا<sup>۱۴</sup> نیز در پژوهش خود علل ترک‌های خستگی از بالا به پایین، مدل‌ها، ابزارهای آزمایش و چالش‌های پیش رو را مرور کردند. مرور ادبیات

<sup>15</sup> Sivaprakash

<sup>16</sup> Sudarsanan and Kim

<sup>13</sup> - Full Interface Bonding

<sup>14</sup> - Canestrari and Ingrassia

بررسی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که تأثیر فرکانس و دما بر استحکام اولیه و زاویه فاز بیشتر از تنش بوده و استحکام خمشی مخلوط آسفالت نشان‌دهنده یک منحنی S شکل است. همچنین، تحلیل تکامل آسیب مخلوط آسفالت تحت بارگذاری مراحل مختلف تنش نشان‌دهنده تغییرات در ترک خستگی می‌باشد. مطالعه ایشان به پیش‌بینی خستگی و آسیب مخلوط آسفالت در مرحله پایانی سرویس می‌پردازد و می‌تواند در طراحی و بررسی بهتر آسفالت در مراحل پایانی سرویس مفید باشد [۲۳].

## ۲- مدل‌سازی

### ۲-۱- ابعاد هندسی و مشخصات لایه‌ها

جهت پژوهش حاضر از یک مدل سه لایه آسفالتی استفاده شده است. در این پژوهش، لایه‌های رویه آسفالتی، اساس و بستر به‌طور جداگانه مدل شده و سطح تماس بین تمامی لایه‌ها دارای پیوستگی کامل می‌باشد. مدل‌سازی به‌صورت سه‌بعدی انجام شده تا هرچه بیشتر به شرایط واقعی نزدیک باشد و از طرفی مواردی مانند بارگذاری، طول ترک، جابه‌جایی‌ها، سرعت و غیره راحت‌تر و با سهولت بیشتری ترسیم و مدل شوند. شرایط تکیه‌گاهی مدل به این صورت تعریف شده است که کف لایه بستر به صورت کاملاً گیردار (قید Encastre) می‌باشد تا از حرکت و دوران در هر جهت و مسیری جلوگیری شود. به همین شکل طرفین مدل نیز در هر دو راستای طولی و عرضی مسپر مقید شده است (شکل ۲). ترک‌ها را می‌توان به صورت‌های گوناگون (طولی، عرضی و مورب) مدل نمود. اما از آنجا که هدف در این پژوهش بررسی بحرانی‌ترین حالات است، ترک مدل‌سازی شده به‌صورت عمود بر مسیر (در راستای عرض) می‌باشد تا تنش و ضریب شدت تنش بیشینه حاصل شود. ابعاد لایه‌های روسازی مدل شده در شکل ۳ نمایش داده شده است.

آسفالتی و روسازی‌ها، می‌تواند سبب تصحیح و یا بازآفرینی تحقیقات آتی گردد. در این بررسی مشاهده می‌شود که معیارهای متفاوت مدل‌های پدیدار شناختی عموماً نقاط خرابی یکسانی را برای یک نمونه آزمایش نشان می‌دهند [۲۰].

عطایی و همکاران، در بخشی از پژوهش خود تحت عنوان شبیه‌سازی المان محدود مشخصات ناپیوستگی سطحی در عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر ترک‌خورده در اثر بارگذاری دینامیکی، نشان دادند که نتایج به‌دست آمده از بارگذاری مستطیلی به اندازه ۳۵٪ بیشتر از شبیه‌سازی با بارگذاری نیمه‌سینوسی است. در این پژوهش از المان C3D8R و تحلیل از نوع دینامیکی ضمنی<sup>۱۷</sup> استفاده شده است [۲۱].

ژیا<sup>۱۸</sup> و همکاران مقاله‌ای منتشر کردند که حاصل مدل‌سازی المان محدود انواع ترک‌ها برای بررسی فرآیند شروع و گسترش آن‌ها می‌باشد. مدل‌ها براساس فاکتورهایی مانند توزیع سنگدانه، طول ترک اولیه، مقاومت کششی ناحیه انتقال سطحی (ITZ)<sup>۱۹</sup> و توزیع بار برای بار شکست می‌باشند. بر طبق یافته‌های ایشان، ترک‌های بالا به پایین به‌صورت ترک چندنقطه‌ای بر روی رویه به حالت نامنظم و پریچ و ناپیوسته بوده و در مقابل، ترک‌های انعکاسی دارای تمرکز تنش قابل‌توجه در نوک خود هستند. شکل توزیع سنگدانه، طول ترک از پیش تعیین شده و شکل توزیع بار تأثیر زیادی بر مد اولیه خرابی نداشته، اما تا حدودی بر نقطه شروع ترک، باربری ترک و مسیر گسترش آن اثرگذارند [۲۲]. به<sup>۲۰</sup> و همکاران نیز در مقاله‌ای به منظور بررسی قانون کاهش عملکرد و خستگی پوشش آسفالتی در مرحله پایان سرویس، میزان تأثیر کرنش، فرکانس و دما بر سختی اولیه لایه سطح آسفالت، عمرخستگی، زاویه فاز و انرژی پراکنده تجمعی در حالتی که نیمی از سختی اولیه از دست رفته باشد را

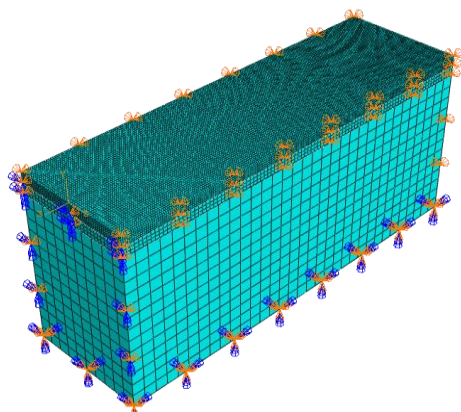
17- Dynamic, Implicit

18- Xia

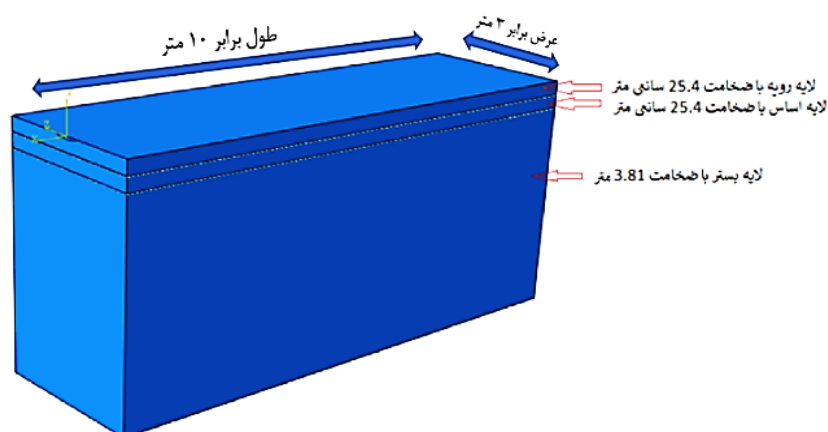
19- Interfacial Transition Zone

20- Ye





شکل ۲- شرایط تکیه‌گاهی و اتصال لایه‌ها به یکدیگر



شکل ۳- مدل هندسی لایه‌ها و ابعاد آن

ترسیم شده در جهت طولی برابر ۱۰۲۰ سانتیمتر و در جهت عرضی ۵۱۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد تا اثرات ناشی از لبه‌ها به حداقل برسد [۱۷]. تعداد المان به کار رفته برای لایه رویه برابر ۱۷۸۲۰ و برای لایه‌های اساس و زیراساس در مجموع برابر ۴۲۹۰ المان بوده که همگی از نوع C3D8R می‌باشند.

لایه رویه آسفالتی در این پژوهش به صورت ویسکوالاستیک در نظر گرفته شد که در ادامه، پارامترهای لازم برای تعریف خواص ویسکوالاستیک آن (سری پرونی) در جدول ۱ آورده شده است. سایر لایه‌ها (اساس و بستر) نیز با تعریف مدول الاستیسیته و ضریب پواسون، به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شدند. فرض الاستیک خطی گرفتن مصالح دانه‌ای با واقعیت سازگار بوده و تقریباً در اغلب پژوهش‌ها و مدل‌سازی‌های داخلی و خارجی مصالح اساس، زیراساس و بستر بدین صورت تعریف شده‌اند [۲۴ و ۲۵].

با توجه به تحقیق انجام شده توسط القادی و وانگ<sup>۲۲</sup> با نام تأثیر تغییرات دما بر پاسخ‌های روسازی به وسیله تحلیل الاستیک چندلایه‌ای سه‌بعدی و همچنین آرائوخو<sup>۲۳</sup> و همکاران که از مدل‌سازی اجزای محدود جهت بررسی رفتار الاستیک و ویسکوالاستیک روسازی آسفالتی استفاده کردند، ابعاد انتخابی برای این پژوهش معقول و منطقی می‌باشد، زیرا مطابق این تحقیقات معمولاً مرز طولی حدود ۱۲ تا ۲۰ برابر شعاع بارگذاری و مرز قائم نیز ۲۰ برابر شعاع سطح بارگذاری در نظر گرفته شده است [۲۴ و ۲۵].

در تحقیقی با عنوان بررسی تأثیر دما و سرعت بار متحرک بر پاسخ روسازی انعطاف‌پذیر با رفتار ویسکوالاستیک با استفاده از مدل سه‌بعدی اجزای محدود که توسط نجفی و همکاران صورت گرفت نیز ابعاد مدل

<sup>22</sup>- Al-Qadi and Wang

<sup>23</sup>- Araújo

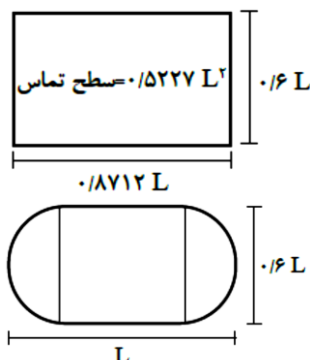
اعمالی مطابق مشخصات آزمایش میدانی (پنسیلوانیا) معادل ۵ kips (۲۲۶۸ kg) در نظر گرفته شده است. این نیرو به صورت یکنواخت و با سرعت ثابت بر سطح اعمال و نتایج برداشت شد. بار افقی نیز که معادل نیروهای برشی و اصطکاک موجود در مسیر است، به صورت ضریبی از بار قائم لحاظ شده است [۲۶]. به وسیله ساپروتین نویسی در محیط آباکوس می توان چندین بار استاتیکی فشاری را به صورت مختلف تحت یک بار اعمال و برازش نموده و از طرفی دقت بارگذاری را افزایش داد [۸ و ۲۷]. از آنجا که سطح تماس چرخ و روسازی به صورت بیضوی است، نزدیک ترین شکل سطح تماس به واقعیت فیزیکی از یک مستطیل و دو نیم دایره تشکیل می شود [۵].

در طراحی روسازی صلب یا بتنی به منظور اعمال بار متحرک، می توان سطح تماس لاستیک و جاده را به صورت مستطیلی مدل نمود؛ البته برای طراحی روسازی انعطاف پذیر و استفاده از تئوری لایه های برمیستر، شکل مستطیلی توصیه نشده است و از این رو، برای سهولت در تحلیل آن را دایره ای در نظر می گیرند که در نرم افزارهای مرسوم طراحی و تحلیل روسازی انعطاف پذیر مانند Kenlayer بدین گونه است (شکل ۴) [۵]. در این صورت، شعاع سطح تماس به صورت زیر به دست می آید:

$$P = \frac{F}{A} \quad (6)$$

$$A = \pi(0.3L)^2 + (0.4L)(0.6L) = 0.5227L^2 \quad (7)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{P}{\sigma\pi}} \quad (8)$$



شکل ۴- تخمین سطح تماس چرخ [۴]

جدول ۱- مدول الاستیسیته لایه های روسازی مدل

چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (MPa)	لایه روسازی
		E	
۲۲۸۰	۰/۳	۲۵۵۰	بتن آسفالتی
۱۹۶۰	۰/۳۵	۳۰۷	اساس
۱۷۳۰	۰/۴	۱۵۲	بستر

با توجه به ابعاد روسازی در تست میدانی هدف، میزان عمق بستر ۳/۸۱ متر در نظر گرفته شده است تا گیرداری کف لایه بستر بر روی خروجی مدل سازی تأثیرگذار نباشد. برای مش بندی لایه ها، لایه های بالاتر به دلیل تماس با بارگذاری و فاصله نزدیک تر با سطح تماس بار، دارای مش بندی ریزتر و برای لایه های پایینی مش بندی ها درشت تر در نظر گرفته شده اند. برای بررسی تأثیر مشخصات لایه ها با استفاده از تحلیل استاتیک بر میزان پارامترهای شکست، از مدول الاستیسیته لایه ها و ضخامت لایه آسفالت، اساس و بستر مطابق جدول ۲ استفاده شده است.

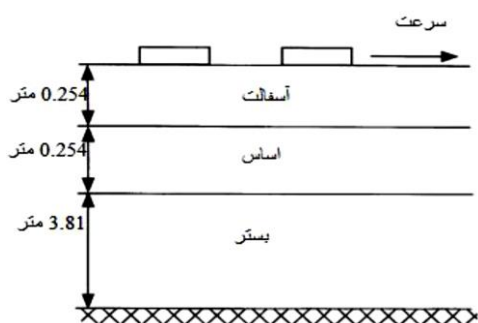
جدول ۲- مشخصات ویسکوالاستیک لایه آسفالتی

ضرایب پرونی	
$g_i$	$\tau_i$
۰/۴۴۹۰۴۳	۰/۰۰۰۶۰۶
۰/۲۴۴۵۵۳	۰/۰۰۱۵۱۴
۰/۱۲۳۹۲۲	۰/۰۷۶۷۵۹
۰/۰۹۵۵۶۹	۱/۳۳۴۰۶۱
۰/۰۴۵۹۰۷	۳۶/۳۷۵۵۲
۰/۰۰۶۲۵۷	۹۸/۰۴۷۹۲

## ۲-۲- بارگذاری و فشار باد چرخ

در این پژوهش از قابلیت کدنویسی در آباکوس استفاده شده است. ساپروتین نویسی در آباکوس قابلیت است که به کاربر اجازه می دهد تا مقادیر دلخواه خود را برای بخش های مختلف مدل سازی به کار گیرد. زبان مورد استفاده فورترن می باشد و برای بارگذاری قائم و افقی به ترتیب از ساپروتین DLOAD و UTRACLOAD استفاده شده است. با کمک ساپروتین می توان حالات مختلف را با دقت و سرعت بسیار زیاد بررسی کرد. بار قائم

قرائت قرار گرفت. در شکل ۵، مقطع روسازی ساخته شده در این تست میدانی، نشان داده شده است. مقاطع ساخته شده در این آزمایش شامل دو مقطع نازک و ضخیم بود که در ابعاد و ضخامت لایه‌ها تفاوت داشتند. در این پژوهش، مقطع ضخیم برای مدل‌سازی مد نظر قرار گرفت. وسیله طرح که با سرعت‌های گوناگون و بار متغیر از این مقاطع عبور می‌کرد شامل یک نیمه‌تریلر دو محوره بوده است که محور جلویی منفرد و محور انتهایی آن مرکب (تاندوم) بود [۲۴].



شکل ۵- ضخامت لایه‌ها در آزمایش پنسیلوانیا [۲۲]

مشخصات مصالح روسازی با FWD تخمین زده شد که در جدول ۳ آورده شده است. سرعت‌های ۳۲، ۵۶ و ۸۰ کیلومتر بر ساعت مورد مطالعه قرار گرفت.

#### ۲-۴- مقایسه نتایج میدانی و مدل سه‌بعدی

جهت صحت‌سنجی از مدل‌سازی آزمایش پنسیلوانیا و مطابقت کرنش‌های برداشت شده از گیج‌های مخصوص (کیوآ) استفاده شده است. در این مدل‌سازی پس از عبور بار از روی مدل سه‌بعدی ساخته شده، مقادیر کرنش‌ها برداشت شده است. کرنش‌های برداشت شده حاصل از حسگرهای آزمایش پنسیلوانیا و همچنین نتایج متناظر برداشت شده از مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس با سرعت‌ها و تحت شرایط یکسان از نظر فشار باد معادل و خصوصیات مصالح در جدول ۴ ارائه شده است. شایان ذکر است با توجه به اینکه مقادیر کرنش‌های برداشت شده در طی آزمایش پنسیلوانیا متعلق به زیرلایه رویه می‌باشند، بنابراین در این پژوهش نیز مقادیر کرنش به‌وجود آمده برای لایه رویه در موقعیت زیر این لایه برداشت می‌شود.

مشخصات وسیله نمونه در آزمایش میدانی مرجع (آزمایشات پنسیلوانیا) از یک محور منفرد و یک محور تاندوم نیمه تریلر تشکیل شده است. لاستیک‌های مورد استفاده به ترتیب 11R24/5 و 11R22/5 از نوع جفت‌چرخ بوده‌اند، که در مدل‌سازی اثر یکی از لاستیک‌های 11R22/5 شبیه‌سازی شده است.

فشار باد اکثر کامیون‌ها (۷۴٪ کامیون‌ها) در محدوده بین ۱۲۰ psi (۸۲۸ کیلوپاسکال) تا ۱۴۰ psi (۹۶۶ کیلوپاسکال) قرار دارد. لازم به ذکر است که معمولاً فشار تماسی برابر با ۹۰٪ فشار باد چرخ در نظر گرفته می‌شود [۲۴].

با توجه به ابعاد لاستیک فوق و همچنین فشار باد چرخ مورد استفاده در آزمایش میدانی پنسیلوانیا، فشار وارده بر چرخ تک برابر با ۱۲۵ پوند بر اینچ‌مربع (۸۶۱/۸ کیلوپاسکال) می‌باشد و در نتیجه، میزان فشار تماسی وارده بر آسفالت برابر با ۱۱۲/۵ psi می‌باشد. همچنین مطابق با شرایط آزمایش پنسیلوانیا نیروی هر محور برابر با ۲۰ kips می‌باشد، از آنجا که در آزمایش میدانی محور دارای زوج چرخ در هر سمت بوده است، نیروی وارده بر هر لاستیک برابر با ۵ kips (۲۲۲۵۰ نیوتن) می‌باشد.

با توجه به فشار باد چرخ‌های آزمایش پنسیلوانیا و همچنین نیروی اعمالی بر هر محور، مساحت مورد انتظار جهت اعمال بار برابر ۰/۰۲۵ مترمربع که از این رو مقدار L برابر ۰/۲۱۸ متر می‌باشد.

#### ۲-۳- صحت‌سنجی

در سال ۱۹۹۳ در ایالت پنسیلوانیا در آمریکا، آزمایش میدانی وسیعی توسط سبالی و طباطبایی<sup>۲۴</sup> صورت گرفت. این پروژه تحت حمایت و اسپانسرینگ اداره بزرگراه‌های فدرال آمریکا (FHWA<sup>۲۵</sup>) صورت گرفت و در آن گیج‌ها و کرنش‌سنج‌هایی در نقاط مختلف روسازی نصب شد و با عبور وسیله نقلیه طرح، نتایج آن‌ها مورد

<sup>24</sup>- Sebaaly and Tabatabaee

<sup>25</sup>- Federal Highway Administration

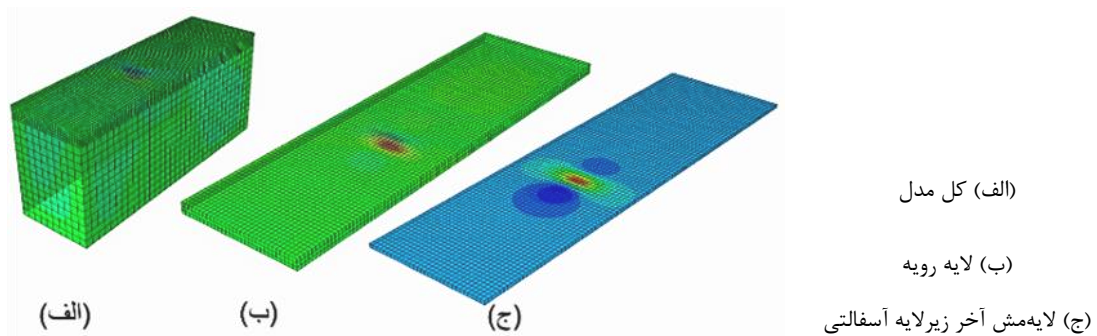
کانتورهای تنش کششی لایه‌ها و مدل در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است.

جدول ۳- خصوصیات لایه‌ها [۲۴]

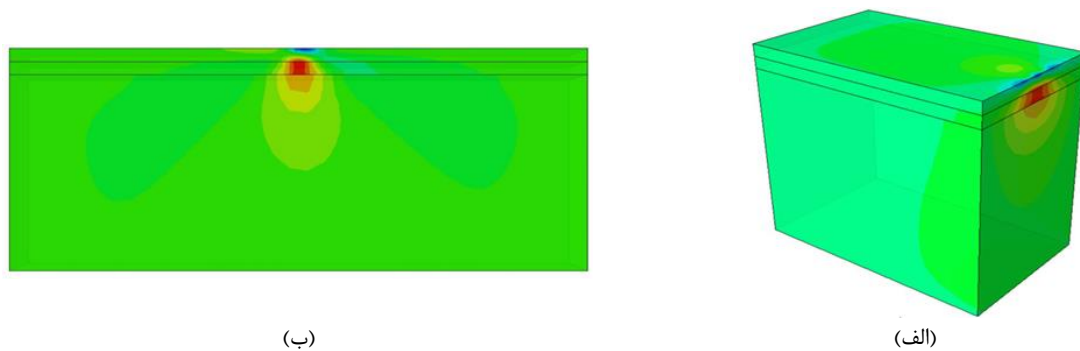
ضخامت (m)	مدول الاستیسیته (MPa)	چگالی ( $kg/m^3$ )	ضریب پواسون	لایه‌های روسازی
۰/۲۵۴	۲۵۵۰	۲۲/۸	۰/۳	آسفالت
۰/۲۵۴	۲۰۷	۱۹/۶	۰/۳۵	اساس
۳/۸۱	۱۵۲	۱۷/۳	۰/۴	بستر

جدول ۴- مقایسه مابین نتایج مدل‌سازی آباکوس و تست میدانی (پنسیلوانیا)

سرعت ( $km/hr$ )	کرنش ( $\mu m/m$ )	۳۲	۵۶	۸۰
مقادیر کرنش برداشت شده از آزمایش پنسیلوانیا	۱۷۲	۹۵	۸۳	
مقادیر کرنش حاصل از مدل‌سازی در آباکوس	۱۴۵	۹۷	۸۴	



شکل ۶- برداشت کرنش‌های کششی طولی از مدل‌سازی صحت‌سنجی مطابق با آزمایش میدانی پنسیلوانیا



شکل ۷- کانتورهای کرنش کششی طولی در نماهای مختلف

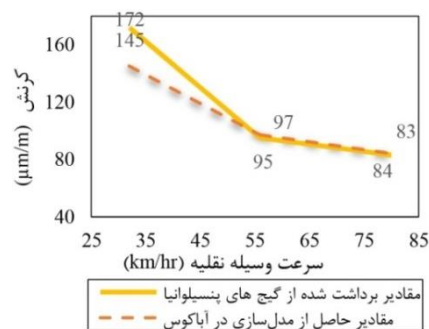
### ۳-۱- بررسی تأثیر پارامتر سرعت بر عمر خستگی روسازی

با توجه به مطالبی که در خصوص عمر خستگی روسازی و مدل‌های مرتبط با آن بیان گردید، می‌توان براساس میزان کرنش به وجود آمده در زیرلایه آسفالتی از رابطه مدل نهایی کالیبره شده مکانیستیک- تجربی (آشتو) جهت تخمین عمر خستگی روسازی استفاده نمود.

از مقایسه نتایج رفتار روسازی در نرم‌افزار آباکوس و نتایج حاصل از آزمایشات پنسیلوانیا در شکل ۸، مشاهده می‌شود که مدل به کار برده شده مقادیر کرنش قابل قبولی را به خصوص در سرعت‌های پایین‌تر ارائه می‌دهد و بنابراین می‌توان از این مدل جهت بررسی تأثیر پارامترهای مورد نظر در پژوهش استفاده نمود.

### ۳- تحلیل و ارائه نتایج

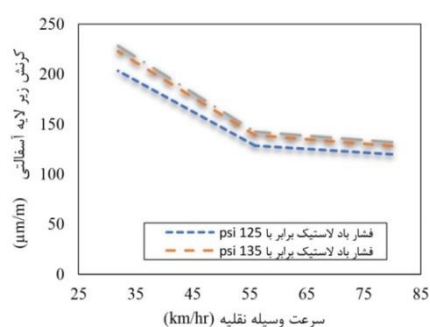
روی سطح آسفالت، بنابر جدول ۵ مشاهده می‌گردد که از میزان کرنش کاسته می‌شود. مهم‌ترین عامل در این زمینه، تأثیر عامل اصطکاک می‌باشد که وابسته به سرعت، کاهش می‌یابد. به‌طور کلی، تأثیر سرعت بر کرنش کششی طولی انتهای لایه آسفالتی در سرعت‌های پایین و دماهای بالا چشم‌گیرتر است، سرعت‌های پایین را می‌توان به دلیل نزدیک شدن به حالت استاتیک و تفاوت در روش حل تفسیر نمود و در دماهای بالا نیز به دلیل نزدیک شدن به رفتار ویسکوالاستیک و رفتار ویسکوالاستوپلاستیک تغییراتی به‌وجود می‌آید.



شکل ۸- نمودار مقایسه مابین نتایج مدل‌سازی انجام شده در آباکوس و آزمایش میدانی پنسیلوانیا (صحت‌سنجی) [۲۴] لازم به یادآوری است که مدول الاستیسیته در این پژوهش به دلیل استفاده از رابطه مذکور، ثابت در نظر گرفته شده است. با افزایش سرعت حرکت لاستیک بر

جدول ۵- مقادیر تعداد تکرار مجاز براساس کرنش‌های برداشت شده از مدل‌سازی

سرعت (km/hr)	۳۲	۵۶	۸۰
فشار باد ۱۲۵ psi			
مقادیر کرنش زیر آسفالت (µm/m)	۲۰۳	۱۲۸/۳۳	۱۱۹/۶۷
$N_f \times 10^6$	۶/۸۰	۴۱/۵۹	۵۴/۸۲
فشار باد ۱۳۵ psi			
مقادیر کرنش زیر آسفالت (µm/m)	۲۲۲/۳۳	۱۳۸/۶۷	۱۲۸
$N_f \times 10^6$	۴/۷۵	۳/۶۳	۴۲/۰۲
فشار باد ۱۴۵ psi			
مقادیر کرنش زیر آسفالت (µm/m)	۲۲۸	۱۴۲	۱۶۱/۶۷
$N_f \times 10^6$	۴/۳۰	۲۷/۸۹	۳۷/۵۹



شکل ۹- میزان کرنش به‌وجود آمده در زیر لایه آسفالتی با تغییر فشار باد لاستیک در یک سرعت ثابت

یکی از دلایل این وضعیت، کاهش سطح تماس آسفالت موردنظر با لاستیک می‌باشد، آنچنان که با افزایش فشار لاستیک میزان خوابیدگی لاستیک بر روی آسفالت کاهش یافته و سبب کاهش سطح تماس و پیرو

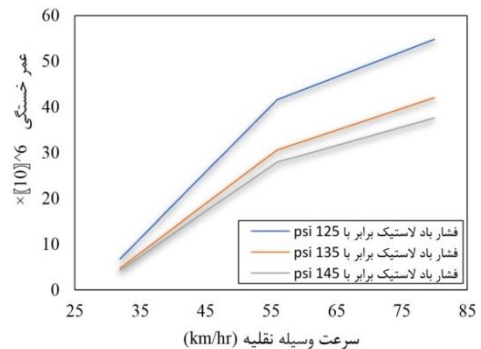
همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت از نرخ کاهش شیب کرنش کاسته می‌شود. با افزایش سرعت از ۳۲ کیلومتر بر ساعت به ۵۶، تقریباً ۳۷٪ و تا سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت حدود ۴۲٪ کاهش کرنش مشاهده می‌گردد. در حالی که از سرعت ۵۶ تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت این تغییرات برابر ۷/۲٪ می‌باشد. این نتایج نشان دهنده تأثیر شدید کاهش سرعت بر کاهش عمر خستگی لایه آسفالتی با فرض فشار باد ثابت برای لاستیک عبوری می‌باشد. با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود که همگام با افزایش فشار باد چرخ‌ها، میزان کرنش‌های به‌وجود آمده در لایه آسفالتی افزایش می‌یابد.

### ۲-۳- بررسی تأثیر فشار باد لاستیک بر عمر خستگی روسازی

به طور مشابه در این مرحله می توان تأثیر تغییرات کرنش به وجود آمده در زیر لایه آسفالتی را با تغییر فشار لاستیک عبوری بررسی نمود. در جدول ۶، میزان کرنش و تکرار مجاز بار برای سرعت ثابت با تغییرات فشار باد لاستیک نمایش داده شده است.

پیرو افزایش کرنش های زیر لایه آسفالت با افزایش فشار باد لاستیک ها، عمر خستگی نیز کاهش می یابد. هر چند در هر صورت در فشار بادهای بالا عمر خستگی به شدت کاهش می یابد ولی در سرعت های پایین تغییر فشار لاستیک تأثیر بارزتری دارد.

آن اعمال بار بر سطح کوچک تر می گردد، که خود متعاقباً موجب ایجاد کرنش های بیشتری می شود. با افزایش کرنش وارده بر سطح آسفالت میزان تعداد تکرار مجاز عبور نیز کاهش خواهد یافت. این مورد در شکل ۱۰ قابل مشاهده می باشد.

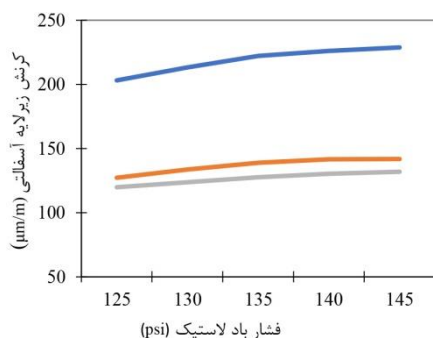


شکل ۱۰- عمر خستگی لایه روسازی نسبت به تغییر فشار لاستیک در سرعت ثابت

جدول ۶- میزان کرنش و تکرار مجاز بار برای سرعت ثابت با تغییرات فشار باد لاستیک

فشار باد چرخ (psi)	۱۲۵	۱۳۵	۱۴۵
فشار باد لاستیک ۳۲ km/hr			
مقادیر کرنش زیر آسفالت ( $\mu\text{m/m}$ )	۲۰۳	۱۴۲	۱۳۱/۶۷
$N_f \times 10^6$	۶/۸۰	۲۷/۸۹	۳۷/۵۹
فشار باد لاستیک ۵۶ km/hr			
مقادیر کرنش زیر آسفالت ( $\mu\text{m/m}$ )	۱۲۸/۳۳	۱۳۸/۶۷	۱۴۲
$N_f \times 10^6$	۴۱/۵۹	۳۰/۶۳	۲۷/۸۹
فشار باد لاستیک ۸۰ km/hr			
مقادیر کرنش زیر آسفالت ( $\mu\text{m/m}$ )	۱۱۹/۶۷	۱۲۸	۱۳۱/۶۷
$N_f \times 10^6$	۵۴/۸۲	۴۲/۰۲	۳۷/۵۹

درصد و تا فشار ۱۴۵ پوند بر اینچ مربع به میزان ۱۰٪ افزایش می یابد.



شکل ۱۱- میزان کرنش ( $\mu\text{m/m}$ ) به وجود آمده در زیر لایه آسفالتی با تغییر فشار باد لاستیک در یک سرعت ثابت

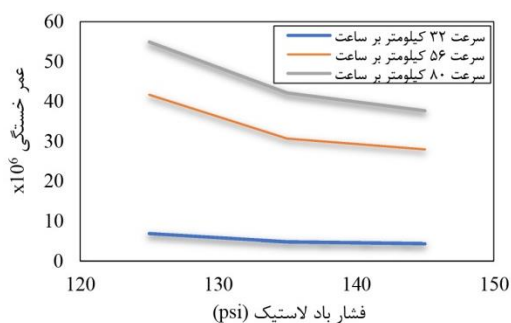
همانگونه که در جدول ۶ و شکل های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می شود با افزایش میزان فشار باد لاستیک، مقدار کرنش های به وجود آمده در روسازی آسفالتی نیز افزایش می یابد؛ ولی میزان کاهش مقادیر کرنش ها در سرعت های پایین بیشتر از سرعت های بالا می باشد، به گونه ای که با افزایش فشار لاستیک در سرعت ۳۲ کیلومتر بر ساعت، میزان کرنش ها از فشار ۱۲۵ تا ۱۳۵ پوند بر اینچ مربع، ۹/۵ درصد و تا فشار ۱۴۵ پوند بر اینچ مربع به میزان ۱۲/۵٪ ولی در سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت میزان کرنش ها از فشار ۱۲۵ تا ۱۳۵ پوند بر اینچ مربع، ۶/۹

مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش سرعت شاهد کاهش مقادیر تنش، کرنش و جابه‌جایی هستیم. با افزایش سرعت از ۳۲ به ۵۶ کیلومتر بر ساعت، تقریباً ۳۷٪ و تا سرعت ۸۰ کیلومتر بر ساعت حدود ۴۲٪ کاهش کرنش مشاهده می‌گردد. در حالی که از سرعت ۵۶ تا ۸۰ کیلومتر بر ساعت این تغییرات برابر ۷/۲ درصد می‌باشد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر شدید سرعت بر کاهش عمر خستگی لایه آسفالتی با فرض فشار باد ثابت برای لاستیک عبوری می‌باشد.

تأثیر سرعت بر کرنش کششی طولی انتهای لایه آسفالتی در سرعت‌های پایین چشم‌گیرتر است و با افزایش سرعت از شیب نمودار (تغییرات) کاسته می‌شود. به طور کلی، سرعت‌های پایین را می‌توان به دلیل نزدیک شدن به حالت استاتیک و تفاوت در مدت حل تفسیر کرد. دلیل کاهش کرنش با افزایش سرعت بارگذاری در شرایط بارگذاری سریع این است که مواد به طور معمول توانایی کمتری برای تغییرشکل دارند و رفتار الاستیک غالب است. این به آن معناست که با افزایش سرعت بارگذاری، زمان برای پاسخ‌دهی به تنش‌ها کاهش یافته و در نتیجه، تغییرشکل (کرنش) کمتر می‌شود. در شرایط بارگذاری سریع، مواد نمی‌توانند به طور کامل و به سرعت به تغییرات بار پاسخ دهند.

در صورت مشخص بودن دوره بهره‌برداری هدف، ترافیک عبوری مسیر ( $N_T$ ) و همچنین سرعت طراحی مسیر می‌توان با توجه به نمودارهای به‌دست آمده از مدل‌سازی بررسی تأثیر فشار باد چرخ‌ها در سرعت‌های متفاوت به میزان مناسب فشار باد طراحی برای لاستیک‌ها دست یافت. این استدلال را می‌توان به شیوه‌ای دیگر در خصوص سرعت طراحی مناسب مسیر در صورت مشخص بودن فشار غالب لاستیک‌های عبوری، لحاظ نمود اما کلیه محاسبات ذکر شده تنها در صورت رعایت میزان بار استاندارد عبوری برقرار خواهد بود.

به عبارتی، هرچند با افزایش فشار در هر صورت به میزان کرنش به‌وجود آمده افزوده می‌شود ولی تأثیر این افزایش فشار در سرعت‌های پایین محسوس‌تر خواهد بود.



شکل ۱۲- عمر خستگی لایه روسازی نسبت به تغییر فشار لاستیک در سرعت ثابت

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا به اهمیت بررسی و تحلیل عملکرد رویه آسفالتی و همچنین تحلیل ترک به‌عنوان مُد عمده خرابی و نیاز به پژوهش‌های بیشتر در این خصوص پرداخته شده است. هدف این پژوهش، بررسی عمر خستگی روسازی بتن آسفالتی به کمک مکانیک شکست و پارامترهای آن در ترک بالا به پایین در نظر گرفته شد. سپس با ارائه فرضیات و معرفی نحوه مدل‌سازی با نرم‌افزار آباکوس، روش پژوهش معرفی و مدل ساخته شده ارائه گردید. پس از اعتبارسنجی مدل ساخته شده با استفاده از داده‌های آزمایش میدانی پنسیلوانیا، اثر سرعت و فشار باد لاستیک بر روی روسازی بتن آسفالتی در نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، رفتار مصالح رویه آسفالتی به صورت ویسکوالاستیک خطی و رفتار مصالح اساس و بستر به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شد. برای تعریف رفتار ویسکوالاستیک خطی از داده‌های سری پرونی حاصل از آزمایش خزش استفاده گردید. در خاتمه نیز نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی با توجه به هدف پژوهش ارائه و بررسی گردید.

## References

- [1] Vice department of Highways. Road and building Maintenance department. The Status of Arterial Roads in the Country in 1393. 2014. [In Persian]
- [2] Keymanesh M. Pavement Engineering. Iran: Noavar Publishing. 2016. [In Persian]
- [3] Rezaei A. Studying the Stress Intensity Factor in Asphalt Pavement's Cracks by Finite Element. MSc Thesis, Babol Noshirvani University of Technology. 2013. [In Persian]
- [4] Huang Y. Pavement Analysis and Design. 2nd ed. USA: University of Kentucky: Pearson Publishing Inc; 2004.
- [5] Wang L. Mechanics of Asphalt: Microstructure and Micromechanics. USA: McGraw-Hill Publishing; 2010.
- [6] Ameri M, Mansourian A, Heidary Khavas M, Aliha M, Ayatollahi MR. Cracked Asphalt Pavement Under Traffic Loading- A 3D finite element analysis. Engineering Fracture Mechanics. 2011; 78(8): 1817-1826. doi: 10.1016/j.engfracmech.2010.12.013 [In Persian]
- [7] Zhao J, Wang H. Mechanistic-Empirical Analysis of Asphalt Pavement Fatigue Cracking Under Vehicular Dynamic Loads. Construction and Building Materials. 2021; 284: 122877. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122877
- [8] Sun L, Duan Y. Dynamic Response of Top-Down Cracked Asphalt Concrete Pavement Under a Half-Sinusoidal Impact Load. Acta Mechanica. 2013; 224(8): 1865-1877. doi: 10.1007/s00707-013-0849-7
- [9] Zhao Y, Ni F, Zhou L. Viscoelastic Response of Reflective Cracking under Dynamic Vehicle Loading in Asphalt Concrete Pavements. ICCTP. 2011; 3278-3297. doi: 10.1061/41186(421)326
- [10] Keymanesh M, Mirshekarian M, Shafipoor A. Analytical Evaluation of the Effect of Axle Weight of Different Vehicles on Asphalt Pavement Damage Using the Finite Element Method. The 10th Congress of Civil Engineering; Faculty of Civil Engineering, Tabriz. 2015. [In Persian]
- [11] Taherkhani H, Jalali M. Determination of the Visco-Elastic Properties of Asphaltic Mixtures for Finite Element Modeling In ABAQUS. Road Magazine. 2016: 219-236. [In Persian]
- [12] Shafabakhsh Gh, TalebSafa M. Analytical Evaluation of the Impact of Non-Uniform Stress Distribution and Wheel Wind Pressure on Asphalt Pavement Analysis. 8th National Congress of Civil Engineering; Babol Noshirvani University of Technology. 2014. [In Persian]
- [13] Fakhri M, KarimiAbiyaneh P. Investigating the Propagation of Fatigue Cracks in Asphalt Pavement Due to Temperature Change, Using the Hypothesis of Fracture Mechanics. Journal of Transportation Infrastructure Engineering. 2014; 55-62. doi: 10.22075/jtie.2014.164 [In Persian]
- [14] Keymanesh M, PirhadiTavandashti A, Mirshekarian M, Jafarian A. Sensitivity Analysis of The Effect of Vehicle Speed on The Failures of Flexible Pavements Using Abaqus Finite Element Software. International Conference on New Research Achievements in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning; Nikan Institute of Higher Education. Tehran. 2015. [In Persian]
- [15] Casey DB, Airey GD, Grenfell JR. A Comparison of Uniform and 3D Tyre Contact Pressure Representations Using a Finite Element Method. Transportation Research Procedia. 2016; 14: 2402-2410. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.280
- [16] Beskou ND, Tsinopoulos SV, Hatzigeorgiou GD. Fatigue Cracking Failure Criterion for Flexible Pavements under Moving Vehicles. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2016; 90: 476-479. doi: 10.1016/j.soildyn.2016.09.019
- [17] Najafi F, Malakouti Olouunabadi M, Soroush M, Fazeli A. Investigation on Influence of Temperature and Moving Load Speed on Flexible Pavement Response with Viscoelastic Behavior using 3D Finite Element Model. Quarterly Journal of Transportation Engineering. 2020 Jun 21; 11(4): 971-987. doi: 10.22119/jte.2020.88168
- [18] Canestrari F, Ingrassia LP. A Review of Top-Down Cracking In Asphalt Pavements: Causes, Models, Experimental Tools and Future Challenges. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2020; 7(5): 541-572. doi: 10.1016/j.jtte.2020.08.002
- [19] Sivaprakash G, Karna A, Rayudu Y, Jillella B. Fatigue Life Analysis of Bituminous Pavement for Different Material Properties and Axle Configurations. Materials Today: Proceedings. 2022; 68: 2355-2361. doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.102
- [20] Sudarsanan N, Kim YR. A Critical Review of the Fatigue Life Prediction of Asphalt Mixtures and Pavements. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition). 2022; 9(5): 808-835. doi: 10.1016/j.jtte.2022.05.003
- [21] Ataee M, Khabiri MM, GhafaiFard Z. Numerical Study of Surface Discontinuity Characteristics in the Performance of Flexible Cracked Pavement Due to Dynamic Load. Quarterly Journal of Transportation Engineering. 2022 Aug 21; 8(1): 115-130. doi: 10.22091/cer.2022.7706.1341
- [22] Xia X, Han D, Zhao Y, Xie Y, Zhou Z, Wang J. Investigation of Asphalt Pavement Crack Propagation Based on Micromechanical Finite Element: A Case Study .Case Studies in Construction Materials. 2023; 19: e02247. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02247



- [23] Ye Y, Li G, Zhuang C, Zhao S, Guo H. Study on Fatigue Damage Evolution and Model Prediction of Asphalt Pavement in The End-Stage of Service. *Case Studies in Construction Materials*. 2023; 19: e02377. **doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02377**
- [24] Al-Qadi I, Wang H, Tutumluer E. Dynamic Analysis of Thin Asphalt Pavements by Using Cross-Anisotropic Stress-Dependent Properties for Granular Layer. *Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board*. 2023; 2154: 156-163. **doi: 10.3141/2154-16**
- [25] de Araújo PC, Soares JB, de Holanda ÁS, Parente E, Evangelista F. Dynamic viscoelastic analysis of asphalt pavements using a finite element formulation. *Road Materials and Pavement Design*. 2010 Jan 1; 11(2): 409-433. **doi: 10.1080/14680629.2010.9690282**
- [26] Luo H, Zhu H-p, Miao Y, Chen C-y. Simulation of Top-Down Crack Propagation in Asphalt Pavements. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 2010; 11(3): 223-230. **doi: 10.1631/jzus.A0900248**
- [27] Sebaaly PE, Tabatabaee N, Kulakowski BT, Scullion T. *Instrumentation for Flexible Pavements—Field Performance of Selected Sensors: Volume I*. United States. Federal Highway Administration. Office of Engineering and Highway Operations R&D; 1992 Jun 1.