

M. H. Ataei

Civil Engineering Department,
Yazd University.

e-mail:
miladh.ataei@stu.yazd.ac.ir

M. M. Khabiri*

Civil Engineering Department,
Yazd University.

e-mail:
mkhabiri@yazd.ac.ir

Z. GhafariFard

Civil Engineering Department,
Yazd University.

e-mail:
ghafari@stu.yazd.ac.ir

Numerical Study of Surface Discontinuity Characteristics in the Performance of Flexible Cracked Pavement Due to Dynamic Load

The presence of cracks on asphalt is one of the most significant and common causes of failure in asphalt pavements; Therefore, modeling and studying the factors affecting it, as well as examining the effect of sealing on asphalt improvement can be as effective as possible in managing financial resources and efficiency of asphalt pavement. The purpose of this study was to numerically investigate the characteristics of surface discontinuity in the performance of cracked asphalt pavement due to dynamic load. In this research, first asphalt samples with repaired discontinuity and samples with unrepaired discontinuity were modeled in ABAQUS software and then dynamic creep and fatigue tests were simulated in this software. Then, to validate the simulation, laboratory asphalt samples were made and tested for dynamic creep and fatigue, and the results were compared with the software simulation results. The results of this study show that the simulation of dynamic creep tests has given greater results than the experiments in reality, and the simulation results of simulated unrepaired samples are more different from the test results than the repaired samples, due to the complexity of the geometry. Examples. Also, in the simulation results of the fatigue test, it is observed. The advantage of modeling is that it is possible to study the number of different scenarios of factors affecting the pavement performance without making laboratory samples and conducting experiments; Because, with the help of fashion, approximate results can be achieved. In addition, the results show that crack sealing reduces the resistance of asphalt concrete to grooving and reduces fatigue performance.

Keywords: Dynamic loading, Flexible pavement, Cracked pavement, Numerical modeling, Surface discontinuity.

* Corresponding author

Received 23 December 2021, Revised 12 February 2022, Accepted 14 February 2022.

DOI: 10.22091/cer.2022.7706.1341

شبیه‌سازی المان محدود مشخصات ناپیوستگی سطحی در عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر ترک‌خورده در اثر بارگذاری دینامیکی

وجود ترک روی آسفالت یکی از متداول‌ترین عوامل خرابی در روسازی‌های آسفالتی است. از این‌رو، مدل‌سازی عوامل مؤثر بر آن و همچنین بررسی تأثیر درزگیری بر بهبود عملکرد آسفالت می‌تواند در مدیریت منابع مالی و بهره‌وری هرچه بیشتر مؤثر باشد. این پژوهش با هدف بررسی عددی مشخصات ناپیوستگی سطحی در عملکرد روسازی آسفالتی ترک‌خورده در اثر بارگذاری دینامیکی انجام شد. در این تحقیق ابتدا نمونه‌های آسفالتی با ناپیوستگی تعمیرشده و تعمیرنشده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و سپس آزمایش خزش دینامیکی و آزمایش خستگی در این نرم‌افزار شبیه‌سازی شدند. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام‌شده، آزمایش خزش دینامیکی و خستگی بر روی نمونه‌های آسفالتی ساخته‌شده، انجام گرفت. سپس نتایج آزمایش‌ها با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار مقایسه گردید. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شبیه‌سازی آزمایش خزش دینامیکی نتایج بزرگ‌تری را به نسبت آزمایش در واقعیت به دست داده است. از طرفی، نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های تعمیرنشده تفاوت بیشتری با نتایج آزمایش، نسبت به نمونه‌های تعمیرشده، داشته است. علاوه بر این در نتایج شبیه‌سازی آزمایش خستگی مشاهده می‌شود که جواب‌های به‌دست آمده از بارگذاری مستطیلی به اندازه ۳۵٪ بیشتر از شبیه‌سازی با بارگذاری نیمه‌سینوسی است. همچنین نتایج بیانگر این است که اثر درزگیری بر رفتار شیارشدگی و خستگی بتن آسفالتی، با توجه به ابعاد ترک و ترکیب دانه‌بندی می‌تواند مطلوب یا غیرمطلوب باشد. حسن مدل‌سازی، امکان‌پذیر شدن بررسی حالات و اثر عوامل مختلف بر عملکرد روسازی، بدون نیاز به ساخت نمونه و آزمایش در شرایط آزمایشگاهی است، زیرا به کمک آن می‌توان به نتایج تقریبی دست یافت.

واژگان کلیدی: بارگذاری دینامیکی، روسازی انعطاف‌پذیر، روسازی ترک‌خورده، مدل‌سازی عددی، ناپیوستگی سطحی.

میلادحسین عطایی

پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه
یزد.

پست الکترونیک:

miladh.ataei@stu.yazd.ac.ir

محمد مهدی خبیری*

پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه
یزد.

پست الکترونیک:

mkhability@yazd.ac.ir

زهره غفوری فرد

پردیس فنی و مهندسی، دانشگاه
یزد.

پست الکترونیک:

zghafori@stu.yazd.ac.ir

۱- مقدمه

ترک‌ها در اشکال متنوعی از جمله عرضی، طولی، بلوکی، پوست‌سوسماری، ترک انعکاسی و ترک لغزشی در روسازی آسفالتی ایجاد می‌شوند. ترک‌خوردگی پوست‌سوسماری از تقاطع و به‌هم‌پیوستگی ترک‌های کوچک تشکیل شده است. این ترک‌ها، روسازی را به شکلی مشابه پوست سوسمار در می‌آورند و تنها حاصل بارگذاری و یا خستگی روسازی هستند. ترک بلوکی یکی از انواع ترک غیرمرتبط با بارگذاری است که در این نوع خرابی، روسازی هم در راستای طولی و هم در راستای عرضی دچار ترک‌خوردگی می‌شود و در نهایت با اتصال

وجود ترک روی آسفالت یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین عوامل خرابی در روسازی‌های آسفالتی است [۱ و ۲]. به طوری که اجرای یک سیستم روسازی که هرگز دچار ترک‌خوردگی نشود، امری غیرممکن است [۳].

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۰/۰۲، بازنگری ۱۴۰۰/۱۱/۲۳، پذیرش ۱۴۰۰/۱۱/۲۵.

DOI: 10.22091/cer.2022.7706.1341 شناسه دیجیتال

این ترک‌ها به یکدیگر، روسازی به شکل بلوک‌های مربعی یا مستطیلی بزرگ درمی‌آید. این نوع از ترک‌ها به دلیل تغییر حجم یا جمع‌شدگی در رویه آسفالتی یا اساس و یا خاک بستر رخ می‌دهند. ترک‌های طولی در راستای تقریبی محور طولی رویه روسازی و ترک‌های عرضی در جهت عمود بر آن، به علت اجرای نادرست درز خط عبوری، جمع‌شدگی و انقباض لایه آسفالتی و انعکاس رو به بالای ترک موجود در لایه زیرین روسازی ایجاد می‌شوند. ترک انعکاسی، تنها در روسازی‌هایی با رویه آسفالتی که بر روی دال‌های بتن سیمانی قرار دارد، رخ می‌دهد و علت ایجاد آن عمدتاً در اثر جابه‌جایی ناشی از حرارت یا رطوبت دال بتنی در زیر رویه آسفالتی است. ترک‌های لغزشی معمولاً در مسیر حرکت چرخ‌های وسایل نقلیه به علت وارد شدن نیروهای شدید افقی (ترمز کردن) در سطح رویه آسفالتی به وجود می‌آید. علت تشکیل شدن این ترک‌ها فقدان چسبندگی کافی بین لایه رویه آسفالتی و لایه زیر آن است [۴]. از آنجاکه سالانه هزینه‌های هنگفتی صرف بهسازی و مرمت روسازی‌های مضمحل‌شده در سطح کشور می‌شود؛ لذا مطالعه در خصوص پیش‌بینی ترک‌خوردگی و بررسی بهبود خصوصیات و عملکرد آسفالت بعد از درزگیری بسیار حائز اهمیت است [۵-۷]. از این‌رو، این پژوهش به بررسی عددی مشخصات ناپیوستگی سطحی تعمیرشده و تعمیرنشده، در عملکرد روسازی آسفالتی ترک‌خورده در اثر بارگذاری دینامیکی پرداخته است.

۲- پیشینه تحقیق

همان‌گونه که اشاره شده خرابی و ترک‌خوردگی در آسفالت امری گریزناپذیر است؛ لذا مدل‌سازی و بررسی عوامل مؤثر بر آن و همچنین بررسی به‌کار بردن روش‌های عددی متعدد در طراحی روسازی و نیز تأثیر درزگیری بر بهبود آسفالت می‌تواند در بهبود تعیین ضخامت روسازی و مدیریت منابع مالی و بهره‌وری هرچه بیشتر از روسازی انعطاف‌پذیر مؤثر باشد [۷]. در زمینه بررسی

ترک‌خوردگی آسفالت پژوهش‌های متعددی انجام شده است. در این خصوص، فخری و کریمی ابیانه در پژوهشی به بررسی نحوه گسترش ترک‌های خستگی در روسازی آسفالتی با نرم‌افزار آباکوس پرداختند. آنها نحوه گسترش ترک‌های رو به بالا و پارامترهای مؤثر در آن را با استفاده از روش مکانیک شکست و پدیده ترک و نحوه پیشروی آن در روسازی در سه دمای کم، متوسط و زیاد مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار ضریب شدت تنش ارتباط مستقیمی با فاصله مرکز بارگذاری از ترک دارد. همچنین، در حالت اساس دانه‌ای مقدار ضریب شدت تنش در حالتی که بار در نزدیکی ترک قرار دارد افزایش بیشتری را نسبت به حالت اساس سیمانی نشان می‌دهد. این مسئله، تأثیر زیاد نوع اساس، بخصوص اساس دانه‌ای، را بر تغییرات ضریب شدت تنش نشان می‌دهد [۸]. اوزر^۱ و همکاران با بیان اینکه ترک‌خوردگی در لایه‌های بتن آسفالتی یکی از حالت‌های محرک تخریب روسازی انعطاف‌پذیر است که خواص مواد تشکیل‌دهنده آسفالت و عوامل خارجی مانند بارگذاری وسیله نقلیه و شرایط محیطی، مکانیسم‌های ترک‌خوردگی در روسازی‌های انعطاف‌پذیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد و روش‌های فعلی طراحی سازه روسازی، مشخصه مستقیم تأثیر در شروع و انتشار آسیب ترک را در نظر نمی‌گیرد؛ به پیش‌بینی ترک‌خوردگی ناشی از خستگی روسازی پرداختند. در این مطالعه آزمایش‌های عملکردی رایج مورد استفاده که برای مشخص کردن مقاومت به شکست و ترک‌خوردگی است و یک دستورالعمل ارزیابی چندمرحله‌ای با استفاده از تکنیک‌های آماری مختلف ارائه شد و برای تعیین توانایی مدل ارائه‌شده، نتیجه روش آزمون آماری و همچنین ضریب همبستگی با عملکرد میدانی مورد بررسی قرار گرفت. برای همبستگی با نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های عملکرد آزمایشگاهی مختلف استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که شاخص

^۱- Ozer

آزمایشگاهی و شبیه‌سازی ریزساختار سه‌بعدی ترک‌خوردگی را کاهش دهد [۱۱].

در پژوهشی دیگر، وانگ^۴ و همکاران یک سری مدل‌های گسسته مبتنی بر ویسکوالاستیک دوبعدی و ناهمگن میکرومکانیکی برای بررسی ترک‌خوردگی بلوکی روسازی‌های آسفالتی ارائه کرد. آن‌ها چندین الگوی مختلف ترک‌خوردگی بلوک با تغییر خواص مواد و شرایط حرارتی مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که وقتی ریزترک‌ها در یک بخش روسازی بزرگ منتشر می‌شوند، تمایل دارند در جهت‌های دلخواه توسعه پیدا کنند تا یک الگوی اتصال Y را تشکیل دهند. هنگامی که ترک‌های در حال رشد تلاقی می‌کنند، تمایل دارند در زوایای قائم به هم بپیوندند. به‌طور کلی، ترک‌خوردگی بلوکی را می‌توان براساس الگوی هندسی تکراری آن دسته‌بندی کرد. این ترک‌ها به هم می‌پیوندند و ترک‌های مستطیلی و شش‌ضلعی را تشکیل می‌دهند. همچنین نتایج شبیه‌سازی المان گسسته نشان داد که ترک‌خوردگی بلوکی در درجه اول در یک تا دو سانتی‌متر بالایی لایه رخ می‌دهد که با مشاهدات میدانی مطابقت دارد [۱۲]. همچنین فریور و قاسم‌زاده طهرانی در پژوهشی به مدل پیش‌بینی شاخص ترک‌خوردگی ترک‌های برودتی آسفالت پرداختند و با در نظر گرفتن عمر روسازی، اندازه‌گیری دمای محیط در روز و شب و تعداد روزهای یخبندان در سال، شاخص ترک‌خوردگی محاسبه کردند. سپس با استفاده از نرم‌افزار SPSS شاخص ترک‌خوردگی و عمر روسازی را تجزیه و تحلیل نمودند. طبق نتایج به‌دست‌آمده، محورهای مورد بررسی از لحاظ شرایط آب و هوایی به دو خانواده با آب‌وهوای نیمه سرد و سرد تقسیم شدند. در این پژوهش، آب‌وهوا به‌عنوان عامل ایجاد دو خانواده روسازی است. برای هر دو خانواده روسازی، متغیرهای عمر روسازی و شاخص ترک‌خوردگی با یکدیگر رابطه مستقیم داشته و با

انعطاف‌پذیری به‌دست آمده از آزمون خمش نیمه‌دایره‌ای که به آن آزمون شاخص انعطاف‌پذیری ایلینوی نیز گفته می‌شود، بالاترین قدرت همبستگی را با عملکرد میدانی و ترک‌خوردگی داشتند [۹].

همچنین لینگ^۲ و همکاران یک مدل مکانیکی-تجربی کالیبره شده برای تجزیه و تحلیل عملکرد ترک از بالا به پایین (TDC^۳) با بار ترافیکی واقعی و تنش حرارتی ارائه دادند که براساس آن تعداد روزهایی برای ترک TDC آغاز شده برای رسیدن به سطح شدت متوسط محاسبه می‌شود. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد زمانی که TDC به طول بحرانی رسید، طول TDC کاهش یافت و ناحیه ترک خستگی افزایش یافت [۱۰]. همچنین زارع‌رام و همکاران با تأکید بر اینکه بتن آسفالتی مخلوطی بسیار ناهمگن با ریزساختارهای پیچیده است و این ناهمگونی به‌شدت بر رفتار مکانیکی کلی سه‌بعدی و عملکرد مرتبط با خرابی مخلوط‌های آسفالتی تأثیر می‌گذارد، یک مدل ریزساختار محاسباتی را با استفاده از ریزساختارهای المان محدود دوبعدی به‌عنوان یک رویکرد جایگزین و کارآمد برای پیش‌بینی پاسخ واقعی ترک‌خوردگی سه‌بعدی مخلوط‌های آسفالتی ارائه کردند. در واقع در این پژوهش برای شبیه‌سازی شروع و انتشار ترک، یک الگوریتم مستقل برای تولید کارآمد ریزساختارهای دوبعدی متعدد با استفاده از پردازش تصویر ریزساختارهای اسکن شده، یک ماژول تقسیم‌بندی مبتنی بر فاز برای جداسازی ذرات، فاز ماتریس و یک ماژول مش‌بندی المان محدود که امکان ایجاد منطقه منسجم را فراهم می‌کند، توسعه داده شد. این مطالعه نشان می‌دهد که ریزساختارهای دوبعدی متعدد می‌توانند به‌طور مناسب رفتار ویسکوالاستیک-شکستگی پیچیده مخلوط آسفالتی را نشان دهند که می‌تواند به ترتیب هزینه‌های تجربی و محاسباتی برای آزمایش‌های مخلوط

^۲- Ling

^۳- Top-down Cracking

^۴- Wang

به ترتیب در نشست سطح و بستر روسازی مشاهده کردند. محققان به‌طور کلی نتیجه گرفتند که از لحاظ آماری، تأثیر ترک بر تغییر شکل سطح و بستر، به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع بستر و مقاومت آن است [۱۵]. همچنین پژوهشگران یک مدل عنصر گسسته سه‌بعدی از یک مخلوط آسفالتی براساس نرم‌افزار روش المان گسسته (DEM^۶) برای بررسی مکانیسم ترک‌خوردگی مخلوط آسفالتی ارائه دادند و بیان کردند فرآیند شکست به سه مرحله رشد الاستیک تنش کششی، توسعه سریع ترک‌ها و به‌هم آمیختگی ترک‌ها تقسیم می‌شود. آن‌ها نتایج به‌دست آمده را با انجام آزمایش کشش غیرمستقیم اعتبارسنجی کردند. همچنین با بررسی اثر سرعت بارگذاری، نتیجه گرفتند انتشار موج ترک‌ها واکنشی شبه-دینامیکی با سرعت بارگذاری از خود نشان می‌دهد که با افزایش آن، دچار کاهش می‌گردد [۱۶].

همانگونه که اشاره شد در زمینه گسترش ترک آسفالت مطالعات گوناگون عددی انجام شده است؛ اما تاکنون پژوهشی عددی در خصوص تأثیر ترک تعمیر شده و تعمیر نشده به عملکرد و خصوصیات روسازی آسفالتی انجام نشده؛ از این‌رو این پژوهش به بررسی عددی مشخصات ناپیوستگی سطحی تعمیر شده و تعمیر نشده، در عملکرد روسازی آسفالتی ترک‌خورده در اثر بارگذاری دینامیکی پرداخته است.

۳- روش تحقیق

۳-۱- شبیه‌سازی به روش اجزای محدود با نرم‌افزار آباکوس

روش اجزای محدود یک روش عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی است و کاربرد عملی این روش در حل مسائل مختلف مهندسی، تحلیل اجزای محدود نامیده می‌شود. روش اجزای محدود امروزه کاربرد

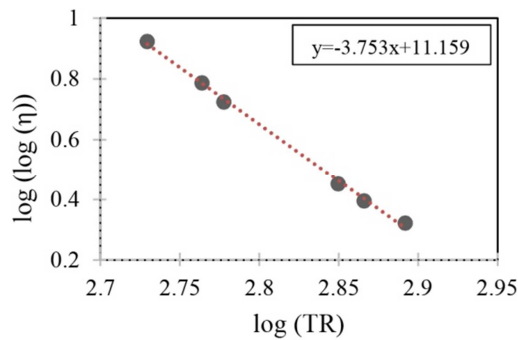
افزایش عمر روسازی، شاخص ترک‌خوردگی نیز افزایش می‌یابد. طبق مدل‌سازی‌های انجام‌شده، مدل لگاریتمی به علت داشتن ضریب همبستگی برابر ۰/۸۲۹ برای خانواده اول و ۰/۸۳ برای خانواده دوم از دقت خوبی برخوردار بوده و این مدل برای هر دو خانواده انتخاب شده است [۱۳].

سرنج^۵ و همکاران نیز در پژوهشی به مدل‌سازی رفتار ترک‌های حرارتی در روسازی‌های آسفالتی پرداختند. آن‌ها رفتار ترک‌های حرارتی در روسازی‌های آسفالتی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مورد بررسی قرار دادند تا تأثیر عوامل گوناگونی چون مدول الاستیسیته آسفالت، مدول الاستیسیته اساس، ضخامت لایه آسفالت، ضریب انبساط حرارتی آسفالت و مدت‌زمان بارگذاری را مورد ارزیابی قرار دهند. نتایج مدل‌سازی بیانگر این است که افزایش میزان مدول الاستیسیته آسفالت تا حد معینی باعث کاهش شکست حرارتی در آسفالت می‌شود و تنش حرارتی افزایش می‌یابد؛ همچنین افزایش مدول الاستیسیته اساس نیز باعث افزایش تنش حرارتی می‌شود ولیکن افزایش مدول الاستیسیته آسفالت و افزایش ضخامت آن تأثیر چشمگیرتری بر کاهش ترک دارد [۱۴]. خبیری و همکاران، پژوهشی در خصوص نشست روسازی به‌عنوان خرابی ثانویه، با در نظر گرفتن عواملی چون هندسه ترک اولیه، مقاومت خاک بستر و لایه‌های روسازی انجام دادند. آن‌ها با مدل‌سازی چند ترکیب مختلف از سازه‌های روسازی با لایه‌هایی با ضخامت‌های مختلف و چند نوع خاک بستر در محیط سه‌بعدی، که ترک‌هایی با ابعاد گوناگون بر روی آن تعبیه شده بود، به شبیه‌سازی ۵۱ حالت مختلف با روش اجزای محدود پرداختند. سپس، با مشاهده میدانی نتایج را اعتبارسنجی کرده و دریافتند نشست سطح و بستر روسازی به عرض و عمق ترک بستگی دارد؛ اما این ارتباط در مورد عرض ترک بیشتر است، به‌گونه‌ای که با افزایش ۲۵ درصدی عرض ترک، افزایشی به‌اندازه ۴۹ و ۳۸ درصد

^۶- Discrete Element Method

^۵- Saranj

داده‌های موجود از آزمایش‌های انجام شده بر روی قیر، مانند نقطه نرمی (ASTM D36)، درجه نفوذ (ASTM D5) و گرانیروی در دماهای ۱۲۰، ۱۳۵ و ۱۶۰ سانتی‌گراد (ASTM D2170) و به ترتیب برابر با ۱۱/۱۵۹ و ۳/۷۵۳- به دست آمد. نمای این نمودار در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار A-VTS قیر ۶۰-۷۰

مدول مختلط^۸ خصوصیتی از مواد ویسکوالاستیک خطی است که با نسبت تنش حداکثر به کرنش حداکثر ایجاد شده در شرایط بارگذاری متناوب سینوسی تعریف می‌شود. بارگذاری متناوب می‌تواند به صورت کشش، فشار و یا برش انجام گیرد. در این حالت تنش و کرنش متناوب با روابط (۲) و (۳) نشان داده می‌شود. به دلیل رفتار ویسکوالاستیک ماده، منحنی کرنش ترسیم شده تأخیری برابر با φ/ω نسبت به منحنی تنش خواهد داشت.

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

در این روابط، ω فرکانس زاویه‌ای و φ زاویه فازی^۹ است. در شکل ۲ شمای کلی نمودارهای تنش و کرنش و مفهوم زاویه فازی نمایش داده شده است.

مدول مختلط دارای دو بخش حقیقی و موهومی است که بخش حقیقی آن به نام مدول ذخیره^{۱۰} خصوصیت الاستیک و بخش موهومی آن به نام مدول

وسعی در حل مسائلی از جمله تحلیل سازه، انتقال جرم و انتقال گرما دارد. در این روش برای حل یک مسئله، یک سیستم پیچیده به قطعاتی ساده‌تر به نام جز یا المان تقسیم می‌شود. به این ترتیب، محیط مسئله به شبکه‌ای به نام مش^۷، متشکل از اجزا با تعداد محدودی نقاط انتگرال‌گیری تبدیل می‌گردد. سپس معادلاتی تقریبی برای هر یک از اجزا تخمین زده شده و سپس در قالب سیستم بزرگ‌تری از معادلات که دربرگیرنده تمام محیط مسئله باشد، گردآورده می‌شوند. در نهایت جواب تقریبی مسئله با حداقل کردن تابع خطا محاسبه می‌شود [۱۷].

۲-۳- تعیین پارامترهای ویسکوالاستیک به کار رفته در مدل

برای دستیابی به نتایج هرچه نزدیک‌تر به شرایط واقعی، تلاش شد بتن آسفالتی در فرآیند شبیه‌سازی به‌عنوان یک ماده ویسکوالاستیک و نه الاستیک، مدل‌سازی شود. با توجه به در دسترس نبودن داده‌های آزمایشگاهی برای انجام این امر، پارامترهای ویسکوالاستیک بتن آسفالتی توسط یک سری روش‌های نظری و به صورت تقریبی، مشابه آنچه طاهرخانی در مقاله‌ای تحت عنوان تعیین خصوصیات ویسکوالاستیک مخلوط‌های آسفالتی جهت مدل‌سازی به روش المان محدود در نرم‌افزار آباکوس منتشر کرده است، محاسبه و تعیین گردید [۱۸].

رابطه گرانیروی- دما پیشنهاد شده توسط برنامه تحقیقاتی بزرگراه تعاونی ملی امریکا (NCHRP) به صورت رابطه (۱) و از نوع رگرسیون خطی هست [۱۹]:

$$\log(\log(\eta)) = A + VTS \log(T_R) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، η گرانیروی قیر برحسب سانتی‌پواز و T_R دما برحسب رانکین است. همچنین A و VTS عرض از مبدأ و شیب رگرسیونی هستند که مقادیر آن‌ها با توجه به

⁸- Complex Modulus

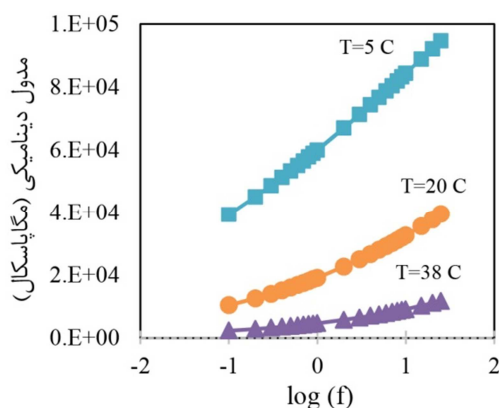
⁹- Phase Angle

¹⁰- Storage Modulus

⁷- Mesh

$|E^*|$ مدول دینامیکی بتن آسفالتی برحسب 10^5 psi است.

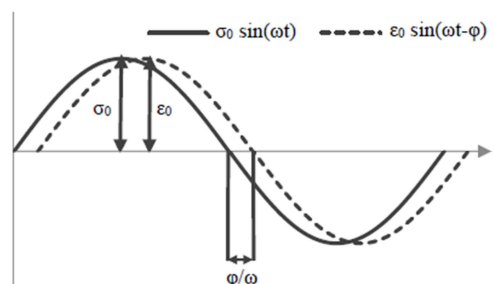
سه دما (۵، ۲۰ و ۳۸ درجه سانتی‌گراد) و ۲۲ فرکانس مختلف (۰/۱ تا ۲۵ هرتز) برای محاسبه مدول دینامیکی از این روش به کار گرفته شد. با استفاده از رابطه ویتزاک برای دو دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش، نتایج بسیار مشابه به دست آمد که با توجه به نزدیک بودن پارامترهای حجمی دو دانه‌بندی و تقریبی بودن این رابطه، قابل پیش‌بینی بود. این موضوع باعث شد که به ناچار فقط خصوصیات یک نوع بتن آسفالتی در شبیه‌سازی به کار رود. با توجه به نمودار شکل ۳ می‌توان مدول الاستیسیته لحظه‌ای را در فرکانس بالا و دمای موردنظر مشخص نمود که در اینجا در دمای مرجع ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۳۹۵۰۰ مگاپاسکال تعیین گردید.



شکل ۳- نمودار مدول دینامیکی در سه دمای مختلف

سپس با استفاده از اصل برهم‌نهی زمان-دما^{۱۴}، نمودارهای به دست آمده در دماهای مختلف، در دمای مرجع تشکیل یک منحنی واحد به نام منحنی مرجع^{۱۵} را دادند که از آن برای پیش‌بینی مدول دینامیکی یک مخلوط آسفالتی در فرکانس‌های مختلف می‌توان استفاده کرد. به این منظور، یک فاکتور انتقال به‌عنوان تابعی از دما و به شکل چندجمله‌ای درجه دوم مورد استفاده قرار گرفت (روابط (۶) و (۷)) [۲۰]:

اتلاف^{۱۱} خصوصیت ویسکوز ماده ویسکوالاستیک را تعریف می‌کند.



شکل ۲- منحنی‌های تنش و کرنش در ماده ویسکوالاستیک خطی

به‌قدر مطلق مدول مختلط، مدول دینامیکی^{۱۲} گفته می‌شود (رابطه (۴)):

$$E^* = E' + iE'' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \varphi + i \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \varphi \quad (4)$$

در رابطه (۴)، E^* مدول دینامیکی، E' مدول ذخیره، E'' مدول اتلاف و φ زاویه فازی می‌باشند.

تخمین مدول دینامیکی بتن آسفالتی با داشتن پارامترهای حجمی مخلوط و خصوصیات قیر از رابطه (۵)، پیشنهاد شده توسط ویتزاک^{۱۳} انجام گردید [۲۰]:

$$\log |E^*| = -1/249927 + 0.2923p_f \dots - 0.01767(p_{r..})^2 - 0.0284p_f - 0.058097V_a - 0.1802208VFA + \frac{3/871977 - 0.021p_f + 0.03958(p_{r..})}{1 + \exp(-0.603313 - 0.313351(\log f) - 0.293532(\log \eta))} + \frac{-0.00017(p_{r..})^2 + 0.0547p_{r..}}{1 + \exp(-0.603313 - 0.313351(\log f) - 0.293532(\log \eta))} \quad (5)$$

در این رابطه، p_{24} ، p_{38} ، p_{44} به ترتیب درصد تجمعی مصالح مانده روی الک ۱۹، ۹/۵ و ۴/۷۵ میلی‌متر و p_{200} درصد مصالح عبوری از الک ۲۰۰ هستند. همچنین η گرانیوی قیر برحسب 10^6 سانتی‌پواز، f فرکانس بارگذاری برحسب هرتز، V_a درصد فضای خالی بتن آسفالتی، VFA درصد فضای خالی مصالح سنگی پر شده با قیر و

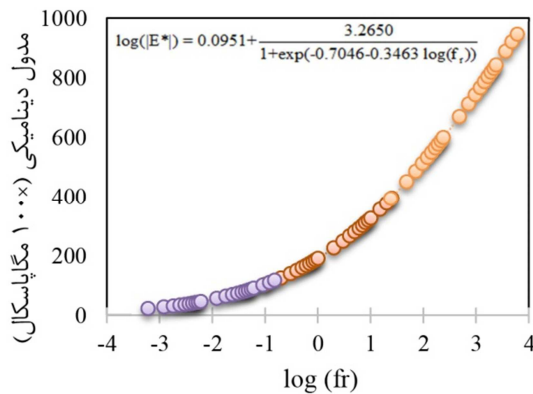
¹⁴- Time-Temperature Superposition

¹⁵- Master Curve

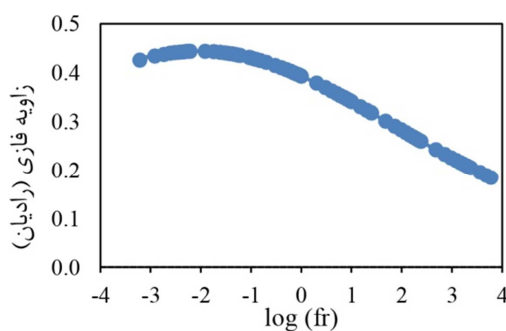
¹¹- Loss Modulus

¹²- Dynamic Modulus

¹³- Witzak



شکل ۴- منحنی مرجع مدول دینامیکی در دمای مرجع ۲۰ درجه سانتی گراد



شکل ۵- منحنی زاویه فازی

مدول استراحت^{۱۷} دیگر ویژگی مواد ویسکوالاستیک است که استراحت (کاهش) تنش ماده را در رابطه با زمان تحت یک کرنش ثابت نشان می‌دهد. تبدیل مدول دینامیکی به مدول استراحت، با استفاده از روش تقریبی پیشنهادشده توسط اسکاپری و پارک^{۱۸} مطابق با مراحل ذیل انجام گردید [۲۲]:

۱- محاسبه مدول ذخیره، $E'(f)$ ، با استفاده از

مدول دینامیکی، $|E^*|$ و زاویه فازی، φ .

۲- برآزش مدول ذخیره به شکل یک تابع سیگموئیدی

و محاسبه شیب نمودار لگاریتمی- لگاریتمی، \ln

در تمامی فرکانس‌های (کاهش‌یافته) به کار رفته

از رابطه (۱۰) (شکل ۶):

$$n = \frac{d \log(E'(f))}{d \log(f)} \quad (10)$$

$$\log(f_r) = \log(f) + \log[a(T)] \quad (6)$$

$$\log[a(T)] = a(T_r - T) + b(T_r - T)^2 \quad (7)$$

در روابط بالا، f_r فرکانس کاهش‌یافته، T_r دمای مرجع، $a(T)$ فاکتور انتقال و a و b ضرایب مجهول چندجمله‌ای درجه دوم هستند. منحنی مرجع، شکل تابع سیگموئید^{۱۶} را دارد که در آن مدول دینامیکی تنها وابسته به یک متغیر (فرکانس کاهش‌یافته) است. شکل کلی این معادله در رابطه (۸) آمده است:

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \log(f_r))} \quad (8)$$

پارامترهای δ ، α ، β و γ در رابطه (۸) ضرایب مجهول می‌باشند.

سپس، از روش بهینه‌سازی غیرخطی در نرم‌افزار اکسل برای حل هم‌زمان چهار ضریب مجهول معادله سیگموئیدی و دو ضریب مجهول چندجمله‌ای درجه دوم استفاده گردید که نتایج آن در جدول ۱ آمده است. بدین ترتیب منحنی مرجع مدول دینامیکی مطابق شکل ۴ ترسیم گردید.

جدول ۱- ضرایب معادله منحنی مرجع و فاکتور انتقال درجه

دوم	
۰/۱۴۲۵	a
۰/۰۰۱۱	b
۰/۰۹۵۱	δ
۳/۲۶۵۰	α
-۰/۷۰۴۶	β
۰/۳۴۶۳	γ

زاویه فازی بتن آسفالتی از رابطه (۹) پیشنهادشده

توسط یانگ [۲۱] تخمین زده شد (شکل ۵).

$$\varphi(f_r) = \frac{\pi}{2} \frac{\alpha \gamma \exp(\beta - \gamma \log(f_r))}{(1 + \exp(\beta - \gamma \log(f_r)))^2} \quad (9)$$

که در آن، φ زاویه فازی برحسب رادیان است.

¹⁷- Relaxation Modulus

¹⁸- Schapery and Park

¹⁶- Sigmoid

پرونی^{۱۹} به خود می‌گیرند. برای تعیین ثابت‌های سری پرونی، تاریخچه بارگذاری و تغییرشکل، نرخ بارگذاری و زمان بارگذاری موردنیاز خواهند بود. شکل کلی معادله سری پرونی مورد استفاده در آباکوس که در چارچوب مدول برشی تعریف می‌شود، در رابطه (۱۴) نشان داده شده است [۲۳]:

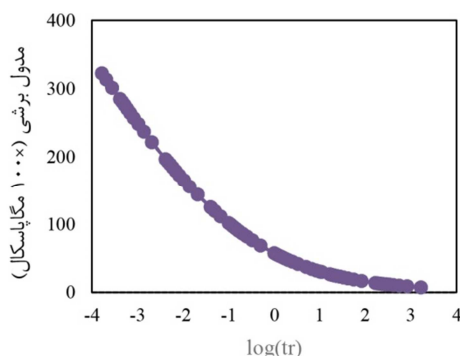
$$g(t) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_i})) \quad (14)$$

در رابطه فوق، $g(t)$ نسبت مدول برشی τ_i و g_i ثابت‌های سری پرونی، N تعداد جملات سری پرونی و t زمان می‌باشند. تعداد جملات سری پرونی به‌طور معمول ۴ تا ۶ انتخاب می‌گردد که در این تحقیق برابر با ۵ تعیین شده است.

مدول برشی را می‌توان با داشتن مدول استراحت و نسبت پواسون بتن آسفالتی، از رابطه (۱۵) به دست آورد. سپس با برازش یک تابع سیگموییدی منحنی مدول برشی را رسم کرده مقدار مدول برشی لحظه‌ای در زمان $t=0$ مشخص می‌شود (شکل ۸).

$$G(t) = \frac{E(t)}{2(1+\nu)} \quad (15)$$

در این رابطه، ν نسبت پواسون بتن آسفالتی است که برابر با ۰/۳۵ تعیین گردید.



شکل ۸- منحنی مدول برشی در دامنه زمان

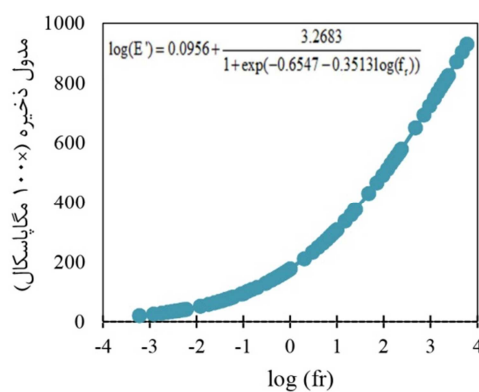
۳- محاسبه تابع تنظیم، λ' ، از رابطه (۱۱) که در آن $\Gamma(1-n)$ تابع گاما است:

$$\lambda' = \Gamma(1-n) \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \quad (11)$$

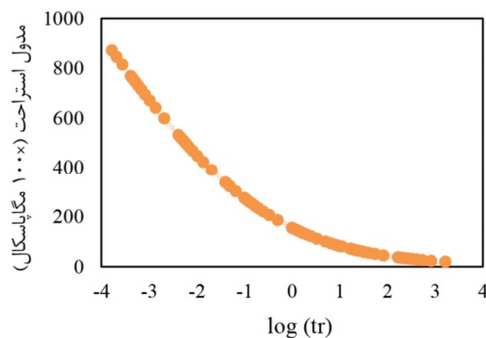
۴- محاسبه مدول استراحت، $E(t)$ ، با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳) (شکل ۷):

$$E(t) = \frac{E'(f)}{\lambda'} \quad (12)$$

$$t = \frac{1}{f} \quad (13)$$



شکل ۶- منحنی مدول ذخیره در دامنه فرکانس



شکل ۷- منحنی مدول استراحت در دامنه زمان

برای تعیین نمودن حالت تنش- کرنش وابسته به زمان در مواد ویسکوالاستیک خطی، تحت بارگذاری تصادفی، تاریخچه تغییرشکل باید در نظر گرفته شود. معادلات مشخصه وابسته به زمان یک ماده ویسکوالاستیک جامد این تاریخچه را در بردارد. این معادلات مشخصه معمولاً شکل یک سری پرونی ثابت‌های

¹⁹- Prony Coefficients

²⁰- Shear Modulus Ratio

نرم افزار اکسل، ثابت‌های پرونی در رابطه (۱۴) محاسبه گردیدند که نتایج آن در جدول ۲ نمایش داده شده است. همچنین، قیر درزگیری به‌عنوان یک ماده الاستیک تعریف شد که با توجه به یافته‌های واسیلیویچ، مدول الاستیسیته آن در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، برابر با ۲۲/۴ مگاپاسکال تعیین گردید [۲۴].

نسبت مدول برشی از رابطه (۱۶) قابل محاسبه است:

$$g(t) = \frac{G(t)}{G(t=0)} \quad (16)$$

در این تحقیق مدول برشی لحظه‌ای در زمان t برابر 10^{-10} ثانیه برابر با $70/9$ گیگاپاسکال به‌دست آمد. سپس با بهینه‌سازی به روش حداقل مربعات با استفاده از

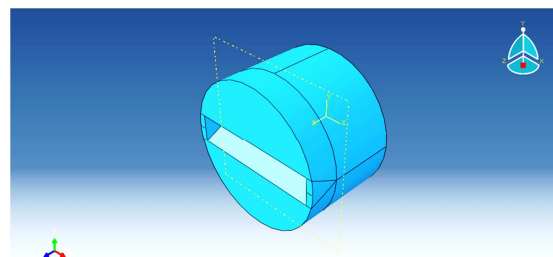
جدول ۲- مشخصات بتن آسفالتی در دمای مرجع ۲۰ درجه سانتی‌گراد

نسبت پواسون	مدول الاستیسیته لحظه‌ای (MPa)	ضرایب پرونی		
		τ_i	g_i	i
۰/۳۵	۳۹۵۰۰	$1/0 \times 10^{-6}$	۰/۵۱۸۰	۱
		$7/11 \times 10^{-4}$	۰/۱۵۹۸	۲
		۰/۰۱۱۲۱۵	۰/۱۳۴۷	۳
		۰/۲۳۴۹۲	۰/۱۰۶۸	۴
		۱۲/۴۳۴	۰/۰۵۸۳	۵

نوع ضمنی^{۲۱} انتخاب گردید. تحلیل دینامیکی از این جهت اتخاذ شد که رفتار وابسته به زمان ماده ویسکوالاستیک در نظر گرفته شود. همچنین با توجه به ماهیت شبه استاتیکی مسئله روش‌های تحلیل ضمنی و صریح هر دو در حل آن کارایی دارند که روش ضمنی رایج‌تر از دیگری است. در ماژول Interaction، اندرکنش سطوح قیر درزگیر و بتن آسفالتی تعریف شد. با توجه به در دست نبودن داده‌های آزمایشگاهی در این مورد، ضریب اصطکاک دو سطح، با توجه به چسبندگی بالای بین دو لایه در واقعیت، برابر با مقدار فرضی ۰/۴۰ تعیین و در سایر پارامترها مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار قبول گردید. در ماژول Loading، دو شکل بار، یکی یکسان با آزمایش‌های قبلاً انجام شده و دیگری با شکلی متفاوت، تعریف گردیدند تا اثر شکل بارگذاری نیز بر روی نتایج شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گیرند (شکل ۱۰) [۲۵].

۳-۳- مراحل شبیه‌سازی کامپیوتری با نرم‌افزار آباکوس

در شروع، قطعاتی ساده از مدل در ماژول Part ایجاد گردید. سپس در ماژول Property خصوصیات مواد به قطعات اختصاص داده شده و در ماژول Assembly، قطعات ساده با یکدیگر ترکیب شده تا مدل نهایی مورد نظر ساخته شود (شکل ۹).

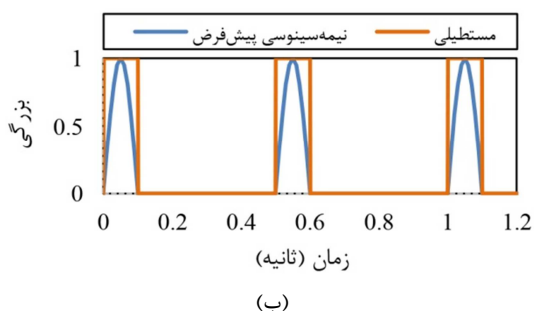


شکل ۹- محیط ماژول Assembly

در ماژول Step، نوع تحلیل، زمان تحلیل، مشخصات گام‌های زمانی و پارامترهای قابل محاسبه در تحلیل را تعیین نمود. در این تحقیق، تحلیل دینامیکی از

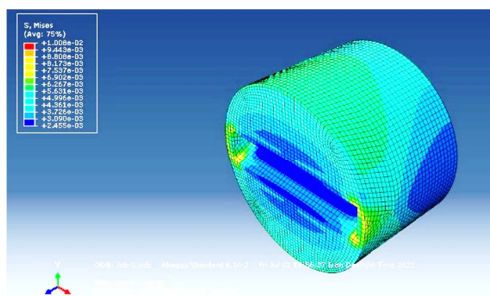
²¹- Dynamic, Implicit

می‌گردد (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- شکل بارهای تعریف‌شده در شبیه‌سازی، (الف) خزش دینامیکی و (ب) خستگی

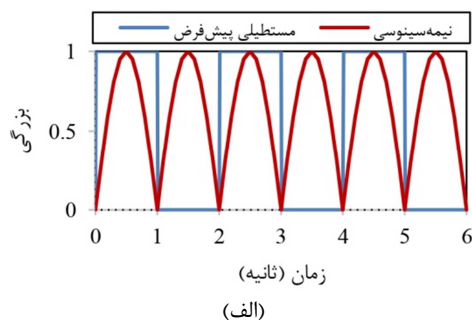
تمرکز تنش در محیط نوک ناپیوستگی شدت افزایش یافته و با افزایش فاصله از این نقطه کاهش شدت تنش مشهود است.



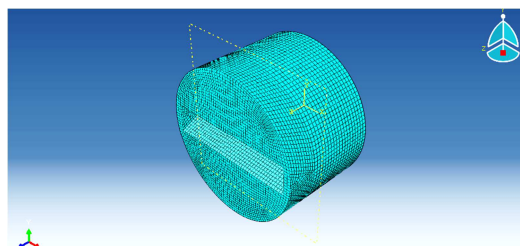
شکل ۱۲- تنش‌ها در ماژول Visualization

فرآیند تحلیل در شبیه‌سازی، فرآیندی زمان‌بر است که اندازه و تعداد المان‌ها، در آن نقشی اساسی ایفا می‌کند. از طرفی، المان‌ها باید به قدر کافی کوچک باشند تا طی فرآیند تحلیل جواب‌ها به همگرایی برسند و به اصطلاح مسئله جواب داشته باشد. از طرفی هرچه المان‌ها کوچک‌تر باشند مش بزرگ‌تر و نقاط انتگرال‌گیری بیشتر می‌شوند و این می‌تواند موجب افزایش چشمگیر زمان حل گردد. برای حل این مشکل، یک مسئله به صورت تکراری با انتخاب اندازه مختلفی از المان‌ها حل شده و نتایج مقایسه می‌گردند تا اینکه تعدادی بهینه برای المان‌ها مشخص شود که با انتخاب آن‌ها، مسئله در کوتاه‌ترین زمان ممکن حل و جواب‌ها به دست آمده مستقل از تعداد المان‌ها و به عبارت دیگر، همگرا باشد. این فرآیند، آنالیز حساسیت نامیده می‌شود. نتایج آنالیز حساسیت مش انجام‌شده در این مطالعه در شکل ۱۳۰ نشان داده شده

در ماژول Mesh، خانواده، درجه هندسی و ابعاد المان‌ها انتخاب شده و مدل به شبکه‌ای از المان‌ها تقسیم



در این پژوهش از المان‌های C3D8R استفاده شد. این نوع المان از خانواده ۳D Stress، درجه هندسی خطی، انتگرال کاهش‌یافته و دارای ۸ نقطه انتگرال‌گیری می‌باشند. این نوع المان به دلیل کمتر بودن نقاط انتگرال‌گیری و معادلات طرح‌شده برای مدل، کاهش زمان حل را در پی خواهد داشت.

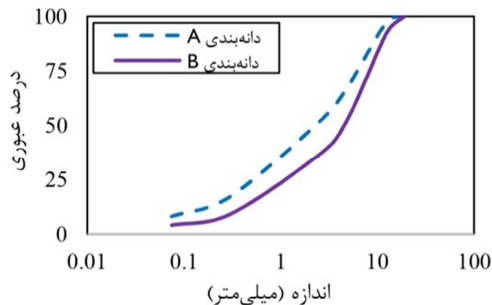


شکل ۱۱- مش‌بندی در ماژول Mesh

در مجموع از ۹ حالت با ابعاد مختلف برای ایجاد ناپیوستگی در نمونه‌ها استفاده گردید. تنوع در عرض و عمق ناپیوستگی‌های در نظر گرفته شده، برای بررسی تاثیر ابعاد ناپیوستگی بر روی عملکرد روسازی در این مطالعه مساله‌ای حائز اهمیت به شمار می‌رود، حالات ۱، ۴ و ۶ دارای عرض و عمق برابر، حالت‌های ۷، ۸ و ۹ دارای عرض بزرگتر از عمق، و نیز حالت‌های ۲، ۳ و ۵ دارای عمقی بزرگتر از عرض‌شان هستند.

پس از مش‌بندی مدل، فرآیند تحلیل در ماژول Job، به نرم‌افزار ارجاع شده و با اتمام آن، نتایج تحلیل از ماژول Visualization قابل‌دسترسی است. شکل ۱۲، نتایج تنش حاصل از شبیه‌سازی آزمایش خزش دینامیکی یک نمونه تعمیرنشده را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود

در این پژوهش نمونه‌های آزمایشگاهی با دانه‌بندی‌های A و B ارائه شده در شکل ۱۴ با درصد قیر بهینه (برای دانه‌بندی A، ۴/۳ درصد قیر و برای دانه‌بندی B، ۴ درصد قیر) ساخته شد.



شکل ۱۴- دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش

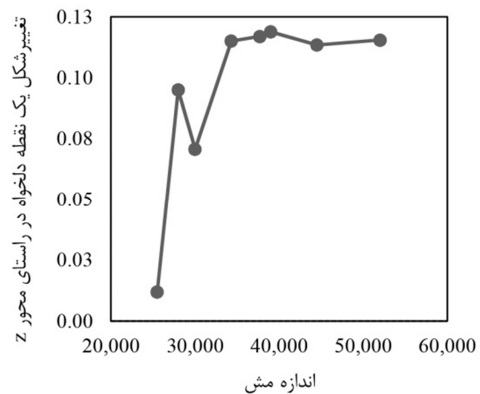
لازم به ذکر است که ساخت دو نمونه در دو مرحله انجام شد، مرحله اول ساخت نمونه‌ها بدون ترک و ناپیوستگی و مرحله دوم ساخت نمونه‌های آسفالتی دارای پیوستگی. روند ساخت نمونه‌های دارای ناپیوستگی همان روند ساخت نمونه‌های استوانه‌ای مارشال بود، با این تفاوت که می‌بایست با استفاده از تیغه‌های فولادی در حین ساخت نمونه‌ها در آن‌ها ناپیوستگی ایجاد می‌گردید (شکل ۱۵).

پس از ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی آزمایش‌ها خزش دینامیکی و خستگی به‌عنوان دو پارامتر مهم مؤثر بر ترک‌خوردگی و عملکرد آسفالت ترک‌خورده درزگیری شده مورد انجام شد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، منظور از نمونه با پیوستگی تعمیر شده نمونه‌ای آسفالتی است که ترک آن درزگیری شده است.



(ب)

است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییر شکل در یک نقطه دلخواه در یک مدل شبیه‌سازی خزش دینامیکی، وابسته به اندازه مش است؛ اما با افزایش اندازه مش، جواب‌ها از مش حدوداً ۳۵۰۰۰ تا بی‌نهایت به بعد وابستگی خود را به اندازه مش از دست داده و همگرا شده‌اند.



شکل ۱۳- آنالیز حساسیت مش

۳-۴- انجام آزمایش‌ها جهت اعتبارسنجی مدل

رایج است در پژوهش‌هایی با موضوعیت شبیه‌سازی عددی صرف، مدل ساخته شده مورد اعتبارسنجی قرار گیرد تا معین شود نتایج به دست آمده تا چه حد معتبر و قابل استناد است. اعتبارسنجی در شبیه‌سازی معمولاً به دو صورت انجام می‌پذیرد. اگر داده‌های آزمایشگاهی مشابهی موجود باشد، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیده و سنجیده می‌شوند. در صورت در دسترس نبودن داده‌های آزمایشگاهی مشابه، یک فرآیند شبیه‌سازی مشابه برگرفته از پژوهش‌های معتبر، تکرار شده و نتایج آن پس از تکرار، با نتایج اصلی مقایسه می‌گردد که در این پژوهش از روش اول استفاده شد.



(الف)

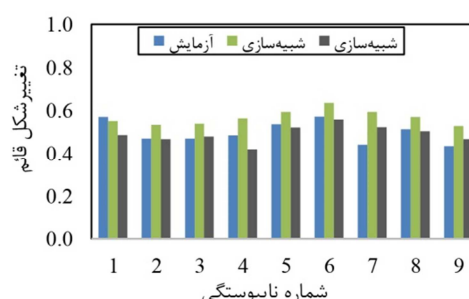
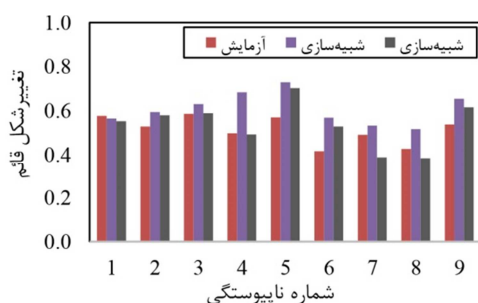
شکل ۱۵- (الف) ساخت نمونه آسفالتی دارای ناپیوستگی و (ب) نمونه‌های تعمیر شده و تعمیر نشده

۴- نتایج و بحث در خروجی مدل‌ها

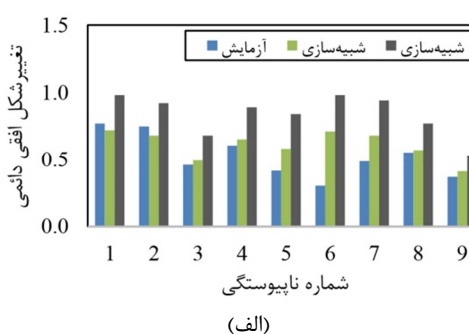
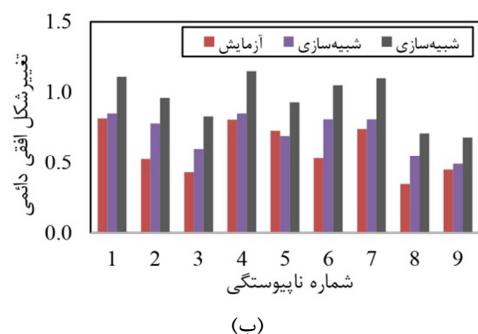
۴-۱- نتایج شبیه‌سازی خزش دینامیکی و خستگی

شکل‌های هندسی متفاوت ناپیوستگی را بر مقاومت نمونه‌های مدل به ازای تغییر در شکل بارگذاری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود شکل بارگذاری سینوسی شدت خرابی بیشتری را شامل می‌شود. به علاوه، همین‌طور شکل بارگذاری مستطیلی در میزان ترک‌خوردگی و کاهش مقاومت خستگی نمونه‌ها قابل مشاهده است. این حالات توصیف شده برای نمونه‌های درزگیری شده و درزگیری نشده تفاوتی نمی‌کند. اینگونه برداشت می‌شود با افزایش حجم ناپیوستگی (عرض و ارتفاع آن) میزان کرنش‌های اتفاق افتاده در بارگذاری‌های مختلف دینامیکی خزشی و یا خستگی نیز افزایش می‌یابد.

نتایج شبیه‌سازی آزمایش خزش دینامیکی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. تغییرشکل قائم (کرنش قائم به دست آمده) گزارش شده، مقدار نهایی آن پس از مدت ۲۰۰ ثانیه بارگذاری است. همچنین نتایج شبیه‌سازی آزمایش خستگی در ادامه آمده است. در شکل ۱۷ تغییرشکل افقی (کرنش افقی) نشان داده شده، پس از ۴۰۰ ثانیه بارگذاری محاسبه گردیده است. تغییرات میزان تغییرشکل و کرنش‌های قائم، در اثر



شکل ۱۶- نتایج شبیه‌سازی آزمایش خزش دینامیکی، (الف) نمونه با ناپیوستگی تعمیر شده و (ب) نمونه با ناپیوستگی تعمیر نشده



شکل ۱۷- نتایج شبیه‌سازی آزمایش خستگی، (الف) نمونه با ناپیوستگی تعمیر شده و (ب) نمونه با ناپیوستگی تعمیر نشده

موضوع می‌تواند به دلیل استفاده از روش‌های تقریبی در تعریف مواد در فرآیند شبیه‌سازی، به کارگیری المان‌هایی ساده‌تر و دارای نقاط انتگرال‌گیری کمتر در این فرآیند، بروز خطا در روند آزمایش در واقعیت و یا برآیندی از همگی این موارد، رخ داده باشد. همچنین دیده می‌شود که نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های تعمیر نشده تفاوت بیشتری با نتایج آزمایش، نسبت به نمونه‌های تعمیر شده،

۴-۲- اعتبارسنجی مدل

تفاوت نتایج شبیه‌سازی آزمایش خزش دینامیکی در جدول ۳ و تفاوت نتایج شبیه‌سازی آزمایش خستگی در ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، شبیه‌سازی آزمایش خزش دینامیکی نتایج بزرگ‌تری را به نسبت آزمایش در واقعیت به دست داده است. این

بارگذاری نیمه سینوسی است. این افزایش تغییرشکل با توجه به گوشه‌های شکل مستطیلی بار و در نتیجه مدت و شدت بارگذاری بیشتر نسبت به بار سینوسی قابل توجه است. لازم به ذکر است که ستون دوم در جداول ۳ و ۴، به مقایسه داده‌های به‌دست آمده از آزمایش موردنظر در دو شرایط «شبیه‌سازی‌شده» و «آزمایشگاهی»، با هدف اعتبارسنجی فرآیند شبیه‌سازی می‌پردازد؛ اما ستون سوم، اثر شکل بار بر داده‌های «صرفاً حاصل از شبیه‌سازی» را مورد بررسی قرار می‌دهد.

داشته که به دلیل داشتن هندسه پیچیده‌تر آن‌ها دور از انتظار نیست. از طرفی، تغییرشکل‌های به وجود آمده با بارگذاری نیمه سینوسی (بدون زمان استراحت) در شبیه‌سازی، به نسبت بارگذاری مستطیلی، به مقدار ۱۳٪ کوچک‌تر است.

در جدول ۴ تفاوت قابل‌توجهی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایش در واقعیت دیده می‌شود که می‌تواند به دلایلی که در بخش قبل ذکر گردید، رخ داده باشد. همچنین، مشاهده می‌شود که جواب‌های به‌دست آمده از بارگذاری مستطیلی به‌اندازه ۳۵٪ بیشتر از

جدول ۳- تفاوت نتایج شبیه‌سازی آزمایش خزش دینامیکی

تفاوت نتایج شبیه‌سازی با بار مستطیلی و نیمه سینوسی		تفاوت نتایج شبیه‌سازی و آزمایش		وضعیت ناپیوستگی
انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	
٪۴	-٪۱۳	٪۱۰	٪۱۴	تعمیر شده
٪۱۱	-٪۱۲	٪۱۴	٪۱۹	تعمیر نشده
٪۸	-٪۱۳	٪۱۲	٪۱۷	هر دو

جدول ۴- تفاوت نتایج شبیه‌سازی آزمایش خستگی

تفاوت نتایج شبیه‌سازی با بار نیمه سینوسی و مستطیلی		تفاوت نتایج شبیه‌سازی و آزمایش		وضعیت ناپیوستگی
انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	
٪۴	٪۳۷	٪۴۵	٪۲۵	تعمیر شده
٪۵	٪۳۳	٪۲۵	٪۲۵	تعمیر نشده
٪۵	٪۳۵	٪۳۵	٪۲۵	هر دو

مدل‌ها به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود. به‌طور کلی، حسن مدل‌سازی امکان‌پذیر شدن بررسی تعداد حالات مختلف مؤثر بر عملکرد روسازی از جمله حالات مختلف بارگذاری، بدون ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی و انجام آزمایش‌های پرهزینه و وقت‌گیر است؛ چراکه به کمک مدل‌سازی می‌توان به نتایج تقریبی دست یافت. داده‌های خروجی مدل‌های نرم‌افزاری نشان می‌دهد، در حالات بارگذاری مختلف و برای گسیختگی‌های گوناگون، میزان کرنش‌های کششی و خزشی در اثر بارهای دینامیکی در

همان‌طور که اشاره شد با مدل‌سازی می‌توان مقادیر تقریبی آزمایش‌های خزش و خستگی نمونه آسفالتی را برآورد کرد. به هر حال، اختلاف بین خروجی مدل و نمونه‌های آزمایشگاهی به نظر قابل توجه می‌رسد، اما از دیدگاه اثرگذاری ابعاد ناپیوستگی و نحوه بارگذاری روند تغییرات در پاسخ روسازی در مدل‌های ساخته شده نرم‌افزاری و نیز آزمایشگاهی یک روند همسویی را طی می‌کنند، اگر در آزمون آماری انتخاب شده، سطح معناداری افزایش یابد، اختلاف بین نتایج آزمایش‌ها و

با نتایج آزمایش، نسبت به نمونه‌های تعمیر شده، داشته که دلیل آن پیچیدگی هندسه نمونه‌هاست.

۳- همچنین در نتایج شبیه‌سازی آزمایش خستگی مشاهده می‌شود که جواب‌های به‌دست آمده از بارگذاری مستطیلی به‌اندازه ۳۵٪ بیشتر از بارگذاری نیمه سینوسی است. این افزایش تغییرشکل با توجه به گوشه‌های شکل مستطیلی بار و در نتیجه مدت و شدت بارگذاری بیشتر نسبت به بار سینوسی قابل توجیه است.

۴- اختلاف مشاهده شده در مرحله اعتبارسنجی، به‌خصوص در داده‌های آزمایش خستگی، ممکن است به دلیل استفاده از روش‌های تقریبی در تعریف مواد در فرآیند شبیه‌سازی، به‌کارگیری المان‌هایی ساده‌تر و دارای نقاط انتگرال‌گیری کمتر در این فرآیند، بروز خطا در روند آزمایش در واقعیت و یا برآیندی از همگی این موارد، رخ داده باشد. با شناسایی و به حداقل رساندن خطاهای رخ داده، می‌توان به دستیابی به نتایج قابل‌اتکا به روش عددی و قابلیت جایگزینی آن نسبت به روش آزمایشگاهی امید داشت که برای رسیدن به این مهم، نیاز به تحقیقات بیشتر احساس می‌گردد.

۵- حسن مدل‌سازی، امکان‌پذیر شدن بررسی حالات و اثر عوامل مختلف بر عملکرد روسازی، بدون نیاز به ساخت نمونه و آزمایش در شرایط آزمایشگاهی است، زیرا به کمک آن می‌توان به نتایج تقریبی دست یافت.

هنگام پرشدن ناپیوستگی کاهش می‌یابد، که بررسی اثر درزگیری ترک‌ها در نتایج تحقیقات میدانی نیز این موضوع را تأیید می‌کند [۲۶ و ۲۷]. البته توجه به این نکته که وقتی دو ناپیوستگی در نمونه آسفالتی به یکدیگر می‌چسبند یا مانند خودترمیمی ترک این ناپیوستگی کاهش می‌یابد، میزان کرنش‌ها نیز کاهش یافته و نرخ رشد ترک خوردگی و خزش مخلوط آسفالتی نیز کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده دینامیکی نیز ارتباط معکوس تعداد تکرار مجاز تا وقوع یک خرابی مشخص با کرنش‌های به‌وجود آمده در روسازی است.

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی عددی مشخصات ناپیوستگی سطحی در عملکرد روسازی آسفالتی ترک‌خورده در اثر بارگذاری دینامیکی انجام شد. در این تحقیق، ابتدا نمونه‌های آسفالتی با ناپیوستگی تعمیر شده و نمونه با ناپیوستگی تعمیر نشده در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد و سپس آزمایش‌های خزش دینامیکی و خستگی در این نرم‌افزار شبیه‌سازی شدند. در ادامه برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده، نمونه‌های آسفالتی آزمایشگاهی ساخته شد و تحت آزمایش خزش دینامیکی و خستگی قرار گرفت و نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

- ۱- اثر درزگیری بر رفتار شیارشدگی و خستگی بتن آسفالتی، با توجه به ابعاد ترک و ترکیب دانه‌بندی می‌تواند مطلوب یا غیرمطلوب باشد.
- ۲- در شبیه‌سازی آزمایش خزش دینامیکی، نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های تعمیر نشده تفاوت بیشتری

مراجع

[1] Damyar, B., Dehnad, M. H., & Zanjirani Farahani, H. (2021). "Performance Investigation of Modified Bitumen With Ethylene-Vinyl Acetate Polymer and Rubber Powder by Performing Classical and Superpave Tests", *Civil Infrastructure Researches*, 6(2), 39-48.

- [2] Canestrari, F., & Ingrassia, L. P. (2020). "A review of top-down cracking in asphalt pavements: Causes, models, experimental tools and future challenges", *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7(5), 541-572.
- [3] Kimanesh, M. K., Karimi, M. M., & Taghinejad Imran, A. (2021). "Evaluation of the effect of aging on the long-term performance of asphalt-hot mixtures containing large amounts of asphalt chips based on the results of semicircular bending (SCB) test at medium temperature", *Journal of Civil Infrastructure Research*, 8(1), 1-20.
- [4] Shahrin, M. Y. (1994). *Pavement management for airports, roads, and parking lots*. Chapman & Hall, Length, 450.
- [5] Zhou, F., Im, S., Sun, L., & Scullion, T. (2017). "Development of an IDEAL cracking test for asphalt mix design and QC/QA", *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup4), 405-427.
- [6] Baghanipour, H., Hosseini, S.A., Aghayan, I. (2020). Experimental evaluation of the effects of crack relief interlayer on the fracture properties of asphalt mixtures. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 6(4), 57-81.
- [7] Ghanizadeh, A.R., Dalaram, A. (2021). 'Development of a model for predicting the modulus of soil bed soil modulus based on the results of cone infiltration experiments using evolutionary polynomial regression method', *Civil Infrastructure Research*, 7 (1), pp. 93-109. doi: 10.22091 / cer.2021.7122.1267. In Persian)
- [8] Fakhri, M., Karimi Abyaneh, P. (2014). Investigation of how fatigue cracks spread in asphalt pavement due to temperature change, using the failure mechanics hypothesis. *Transportation Infrastructure Engineering*, 1 (2), 55-62
- [9] Ozer, H., Al-Qadi, I. L., Singhvi, P., Bausano, J., Carvalho, R., Li, X., & Gibson, N. (2018). Prediction of pavement fatigue cracking at an accelerated testing section using asphalt mixture performance tests. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(3), 264-278.
- [10] Ling, M., Luo, X., Chen, Y., Hu, S., & Lytton, R. L. (2019). A calibrated mechanics-based model for top-down cracking of asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 208, 102-112.
- [11] Rami, K. Z., Amelian, S., Kim, Y. R., You, T., & Little, D. N. (2017). Modeling the 3D fracture-associated behavior of viscoelastic asphalt mixtures using 2D microstructures. *Engineering Fracture Mechanics*, 182, 86-99.
- [12] Wang, H., Behnia, B., Buttlar, W. G., & Reis, H. (2020). Development of two-dimensional micromechanical, viscoelastic, and heterogeneous-based models for the study of block cracking in asphalt pavements. *Construction and Building Materials*, 244, 118146.
- [13] Freer, M., Qasemzadeh Tehrani, H. (2018). Prediction model of crack cracking index of asphalt (Case study: Firoozkooh and Haraz roads). 9th Conference on Asphalt and Asphalt Mixes.
- [14] Saranj, S., Moqaddas Nejad, F., Fahimifar, A. (2010). Modeling the behavior of thermal cracks in asphalt pavements. Sixth National Congress of Civil Engineering.
- [15] Khabiri, M. M., & Saberian, M. (2016). Interaction of subgrade resistance and dimensions of asphalt pavement surface cracks on propagation of secondary distresses. *International Journal of Integrated Engineering*, 8(3).
- [16] Dan, H. C., Zhang, Z., Chen, J. Q., & Wang, H. (2018). Numerical simulation of an indirect tensile test for asphalt mixtures using discrete element method software. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(5), 04018067.
- [17] Logan, D. L. (2016). *A first course in the finite element method*. Cengage Learning.
- [18] Taherkhani, H., Jalali Jirandehi, M. (2018). Determining the viscoelastic properties of asphalt mixtures for finite element modeling in ABAQUS software. *Road*, 24 (89), 219-236.
- [19] Olidid, C., & Hein, D. (2004). Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures. In 2004 Annual conference and exhibition of the Transportation Association of Canada-Transportation Innovation-accelerating the pace.
- [20] Witczak, M. W., & Bari, J. (2004). Development of a master curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures. Arizona State University Research Report, Tempe, AZ.
- [21] Yang, X., & You, Z. (2015). New predictive equations for dynamic modulus and phase angle using a nonlinear least-squares regression model. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(3), 04014131.
- [22] Liao, Y. (2007). Viscoelastic FE modeling of asphalt pavements and its application to US 30 perpetual pavement (Doctoral dissertation, Ohio University).
- [23] Chen, T. (2000). Determining a Prony series for a viscoelastic material from time varying strain data.
- [24] Vasiljevic-Shikaleska, A., Popovska-Pavlovska, F., Cimmino, S., Duraccio, D., & Silvestre, C. (2010). Viscoelastic properties and morphological characteristics of polymer-modified bitumen blends. *Journal of applied polymer science*, 118(3), 1320-1330.
- [25] Khabiri, M.M, Moradi, M.. (2016). Evaluation of Different Contaminants' Effect on Adhesion Performance of Asphalt Layers, *Transportation Infrastructure Engineering*, 2 (2), 15-35. Doi:10.22075/JTIE.2016.460.

[26] Sawalha, M., Ozer, H., Al-Qadi, I.L. and Xue, H. (2017). Development of a modified adhesion test for hot-poured asphalt crack sealants. *Transportation Research Record*, 2612(1), pp.85-95.

[27] Yang, Z., Zhang, X., Tsai, Y. and Wang, Z. (2021). Quantitative Assessments of Crack Sealing Benefits by 3D Laser Technology. *Transportation Research Record*, 2675(12), pp.103-116.