



Evaluation of the Effect of Material Properties on the Dynamic Response of Flexible Pavement under FWD Loading

Research Article

Farzaneh Ghadyani Nezhad Razaki¹, Mohammadreza Khanmohammadi² , Mahdi Shojaei³

DOI: [10.22067/jfcej.2025.95401.1375](https://doi.org/10.22067/jfcej.2025.95401.1375)

1-Introduction

Maintaining road pavement serviceability requires accurate evaluation of its structural performance. The Falling Weight Deflectometer (FWD), as the most widely used nondestructive testing method, enables the assessment of pavement bearing capacity and remaining service life. However, the complex behavior of pavement materials under environmental and dynamic loading conditions limits the accuracy of conventional back-calculation analyses. Flexible pavements consist of layers with distinct mechanical behaviors: the asphalt layer exhibits viscoelastic properties, while unbound granular layers demonstrate nonlinear stress-dependent and transversely isotropic (or cross-anisotropic) behavior. Neglecting these characteristics in structural analysis or back-calculation procedures can lead to significant errors in estimating pavement capacity, fatigue life, and rutting depth.

A review of previous studies indicates that many investigations have considered some of these features, comprehensive modeling of realistic material behavior remains a critical need. This study aims to develop an axisymmetric 2-D finite element (FE) model in ABAQUS to simulate the dynamic response of flexible pavements under FWD loading. The proposed model emphasizes the realistic representation of boundary conditions and material complexities by incorporating viscoelastic asphalt mixtures, nonlinear and anisotropic behavior of granular materials, dynamic analysis, and the presence of bedrock. Furthermore, using the developed model, a sensitivity analysis was conducted to identify and evaluate the key parameters affecting the structural performance of the Ahvaz–Shush road pavement in Khuzestan Province, Iran.

2-Research Method (Numerical Modeling and Validation)

In this research, a FEM was developed in ABAQUS to simulate the dynamic response of a flexible pavement

under FWD loading. The required data were extracted from the Ahvaz-Shush road in Khuzestan province. Some parameters were determined using valid scientific sources, a trial-and-error approach, and a calibration process to ensure the model results matched the field data.

The asphalt layer was modeled as a viscoelastic material. First, the dynamic modulus was calculated using the Witczak model and then adjusted based on FWD test results. This modulus was converted to the corresponding creep compliance and used as input for the viscoelastic analysis in ABAQUS. Figure 1 illustrates a sample creep compliance curve obtained from the asphalt layer of the flexible pavement along the Ahvaz–Shush road at a temperature of 30 °C. For the unbound layers (base and subgrade), stress-dependent nonlinear behavior was implemented using a UMAT subroutine based on the ARA model. Additionally, the transverse isotropy of granular materials was considered by defining the ratio of vertical to horizontal modulus.

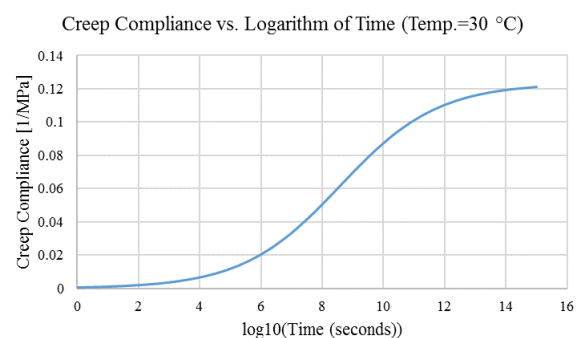


Fig 1. Creep compliance vs. logarithm of time

The finite element model was built as axisymmetric to maintain the accuracy while reducing computational cost. The model dimensions (a radius of 2.5 m and a depth of 8 m) were selected based on sensitivity analysis. The mesh refined in the loading area and coarser in regions farther

* Manuscript received September 13, 2025, Revised October 06, 2025, Accepted November 29, 2025.

¹ M.Sc., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

² Corresponding author: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. Email: mkhanmohammadi@iut.ac.ir.

³ M.Sc., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

away (Figures 2 & 3). Boundary conditions were defined to prevent the reflection of stress waves and avoid dynamic resonance. For the dynamic analysis, the implicit algorithm was employed due to its unconditional numerical stability. To validate the model, the calculated deflection basin were compared with field FWD data at four loading levels (566, 890, 1300, and 1970 kPa) and five different temperatures (35 to 55 °C). The differences between the numerical and field results were evaluated using the Root Mean Square Error (RMSE) and the Percentage Root Mean Square Error (PRMSE) indices, as defined in Equations (1) and (2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x'_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$PRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - x'_i}{x'_i} \right)^2}{N}} \times 100 \quad (2)$$

The results showed that the difference between the numerical and field data was less than 0.1 mm in all cases, falling within an acceptable standard range. This confirms the accuracy and reliability of the proposed model in simulating the dynamic response of the pavement. Figure 4 presents a sample comparison between the deflection basin from the FEM and the FWD test data from the Ahvaz–Shush road.

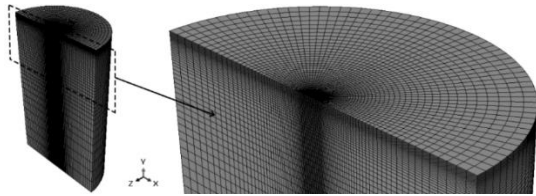


Fig 2. 3-D structure of the axisymmetric FEM of pavement

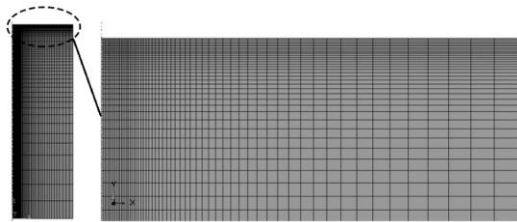


Fig 3. 2-D structure of the axisymmetric EEM of pavement

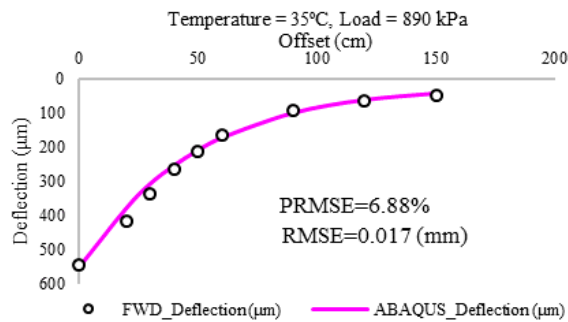


Fig 4. Sample validation of the deflection basin FEM vs. FWD

3- Sensitivity Analysis Results

The sensitivity analysis evaluated the following parameters affecting pavement structural performance:

- **Dynamic Analysis:** Increased the maximum deflection (D_0) by up to 27.5% and the deflection at 900 mm (D_{900}) by up to 44% compared to static analysis, with more pronounced effects at higher temperatures. A noticeable time lag between peak load and peak deflection was observed, highlighting the significance of inertial and wave propagation effects.
- **Viscoelasticity:** Modeling the asphalt layer as viscoelastic (as opposed to linear elastic) increased D_0 by 21–27%, as it better accounted for energy dissipation within the asphalt, reducing stress transfer and subsequent hardening in the base layer.
- **Cross-Anisotropy:** Transverse isotropy in unbound layers led to a 15% increase in surface deflection and significant increases in critical responses: horizontal tensile strain (at the bottom of the asphalt layer) increased by 52–59%, and vertical compressive strain (on top of the subgrade) increased by 74–77%. This directly implies a shorter predicted fatigue life and greater rutting depth.
- **Nonlinear Resilient Modulus:** Implementing a nonlinear model for the base layer resulted in a 33–37% decrease in surface deflection and a 32–52% decrease in horizontal tensile strain, but a substantial 80–94% increase in vertical compressive strain on the subgrade.
- **Bedrock depth:** The presence of bedrock at depths less than 4 meters significantly influenced the dynamic response, particularly at points far from the load center (D_{900}). Ignoring shallow bedrock can lead to substantial errors in back-calculated layer moduli.

4- Conclusions

This research successfully developed and validated an advanced FEM that provides a realistic simulation of flexible pavement behavior under FWD loading. The results demonstrated the critical importance of incorporating dynamic analysis, viscoelastic properties, nonlinear behavior, and transverse isotropy for accurate pavement evaluation. Excessive simplification in material modeling can lead to inaccurate estimation of critical pavement responses, which directly affects the predicted service life and maintenance planning decisions.



ارزیابی اثر ویژگی‌های مصالح بر پاسخ دینامیکی روسازی انعطاف‌پذیر تحت بار FWD*

مقاله پژوهشی

مهدی شجاعی^(۳)

محمد رضا خانمحمادی^(۲)

فرزانه قدیانی نژاد رزکی^(۱)

DOI: 10.22067/jfpei.2025.95401.1375

چکیده ارزیابی دقیق عملکرد سازه‌های روسازی تحت بارگذاری دینامیکی آزمون افت‌وخیزسنج ضربه‌ای (FWD)، مستلزم در نظر گرفتن همزمان ویژگی‌های پیچیده مصالح و شرایط بارگذاری است؛ موضوعی که در بسیاری از مطالعات پیشین به صورت محدود یا جداگانه بررسی شده است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از آزمون افت‌وخیزسنج ضربه‌ای یک مدل اجزای محدود برای شبیه‌سازی دینامیکی پاسخ روسازی انعطاف‌پذیر توسعه داده شد. این مدل در قالب یک مورد عملی از یک روسازی در استان خوزستان به کار گرفته شد و پس از اعتبارسنجی، تأثیر عواملی نظیر تحلیل دینامیکی، ویژگی ویسکوالاستیسیته لایه آسفالتی، ویژگی ناهمسانگردی و غیر خطی بودن مصالح غیر آسفالتی و حضور سنگ بستر بررسی شد. جهت لحاظ کردن خواص غیر خطی و ناهمسانگردی مصالح، یک کد نوشته شده با فرترن به مدل افزوده شد. نتایج نشان داد که اثر تحلیل دینامیکی می‌تواند خصوصاً در دماهای بالا مقدار خیز روسازی را تا ۴۴ درصد افزایش دهد. همچنین اثر ویژگی ویسکوالاستیک منجر به افزایش مقادیر خیز تا ۲۷ درصد نسبت به حالت الاستیک شد. همسانگردی عرضی نیز تا ۱۵ درصد افزایش در پاسخ خیز روسازی ایجاد کرد و با افزایش بیش از ۵۰ درصدی پاسخ‌های بحرانی، منجر به پیش‌بینی عمر خستگی کوتاه‌تر و عمق شیارشدگی بیشتر شد. از سوی دیگر نتایج نشان داد در نظر گرفتن مدول غیر خطی به ویژه در لایه اساس منجر به تغییرات چشم‌گیر پاسخ‌های بحرانی می‌شود. حضور سنگ بستر نیز در عمق کمتر از ۴ متر بر پاسخ دینامیکی سازه به ویژه در نقاط دور از مرکز بارگذاری مؤثر است. این مدل‌سازی می‌تواند مبنایی برای بهبود تحلیل پاسخ روسازی تحت بارگذاری FWD فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی افت‌وخیزسنج ضربه‌ای، تحلیل دینامیکی روسازی آسفالتی، ویسکوالاستیسیته، تحلیل غیر خطی، همسانگردی عرضی.

Evaluation of the Effect of Material Properties on the Dynamic Response of Flexible Pavement under FWD Loading

Farzaneh Ghadyani Nezhad Razaki

Mohammadreza Khanmohammadi

Mahdi Shojaei

Abstract A precise evaluation of pavement structural performance under the dynamic loading of the Falling Weight Deflectometer (FWD) requires simultaneous consideration of complex material properties and loading conditions—an issue often treated only partially in previous studies. In this research, a finite element model was developed to dynamically simulate the response of flexible pavement subjected to FWD loading. The model was applied in a case study of a pavement in Khuzestan Province, and after validation, the effects of dynamic analysis, viscoelastic asphalt properties, anisotropic and nonlinear behavior of unbound materials, and the presence of bedrock were investigated. To include nonlinear and anisotropic characteristics, a FORTRAN subroutine was coded and integrated into the model. Results showed that dynamic analysis could increase pavement deflection by up to 44%, especially at high temperatures. Considering viscoelastic properties increased deflection values by up to 27% compared to the elastic condition. Transverse isotropy caused up to a 15% rise in pavement deflection and more than a 50% increase in critical responses, leading to shorter fatigue life and greater rutting depth. Moreover, the nonlinear modulus, particularly in the base layer, significantly affected critical responses. The presence of bedrock at depths shallower than 4 meters also influenced the dynamic response, mainly at points distant from the load center. This modeling framework can serve as a basis for improving the analysis and interpretation of pavement behavior under FWD loading.

Key words Falling Weight Deflectometer (FWD), Dynamic analysis of flexible pavement, Viscoelasticity, Non-linear analysis, Transversely isotropic

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۶/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۹/۸ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

(۲) نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

(۳) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

مقدمه

نگهداری روسازی راه‌ها در جهت تضمین سطح سرویس‌دهی مطلوب، امری ضروری است که این مهم مستلزم پایش منظم، انجام به موقع تعمیرات و اجرای اقدامات پیشگیرانه به منظور جلوگیری از توسعه خرابی روسازی است. در این میان، ارزیابی سازه‌ای روسازی یکی از مهم‌ترین اقدامات لازم شمرده می‌شود که به سنجش کیفیت ساختاری لایه‌های روسازی از طریق تحلیل پاسخ‌های ناشی از بارگذاری می‌پردازد. این امر اطلاعات ارزشمندی در خصوص ظرفیت باربری، عمر باقی‌مانده بهره‌برداری و وضعیت فیزیکی لایه‌های روسازی ارائه می‌دهد و فرایند تصمیم‌گیری را برای انتخاب راهکار بهینه نگهداری روسازی تسهیل می‌کند. علاوه بر این، تشخیص زود هنگام خرابی‌های سازه‌ای از طریق این ارزیابی، می‌تواند از تحمیل هزینه‌های هنگفت ناشی از بازسازی‌های گسترده جلوگیری کند [1-5].

شناسایی شرایط واقعی لایه‌های مختلف روسازی یکی از مهم‌ترین بخش‌های این ارزیابی است که عموماً با استفاده از آزمایش‌های غیر مخرب و استفاده از مکانیزم اندازه‌گیری خیز روسازی صورت می‌گیرد. امروزه، تجهیزات آزمون غیر مخرب مختلفی برای اندازه‌گیری خیز (Deflection) روسازی معرفی شده است که در میان آن‌ها، آزمایش افت‌وخیزسنج ضربه‌ای (Falling Weight Deflectometer (FWD)) رایج‌ترین وسیله ارزیابی روسازی است که با اعمال بار، میزان تغییر شکل سطح روسازی را در فواصل مختلف از مرکز بارگذاری اندازه می‌گیرد. رایج‌ترین روش تحلیل داده‌های FWD، محاسبه معکوس مبتنی بر فرضیات اولیه مدول‌های لایه‌ای و فرایندهای تکراری است که در آن پاسخ‌های تئوریک با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه و همگرا می‌شوند [6-8]. با این وجود، رفتار پیچیده لایه‌های روسازی آسفالتی تحت تأثیر شرایط محیطی و بارگذاری دینامیکی، دقت این محاسبات را محدود ساخته است. در واقع، روسازی انعطاف‌پذیر از سه رده لایه سازه‌ای با رفتار مکانیکی متمایز تشکیل می‌شود. لایه آسفالت، ماهیت ویسکوالاستیک دارد و مدول آن در برابر تغییرات زمان یا فرکانس بارگذاری و دما متغیر است. در پایین دست، لایه‌های اساس و زیراساس رفتارشان

غیر خطی (Nonlinear) و وابسته به تنش است. علاوه بر آن، به دلیل جهت‌گیری دانه‌ها و عملیات تراکم، سختی آن‌ها در راستای قائم با راستای افقی متفاوت است و ناهمسانگرد متقاطع (یا همسانگرد عرضی) (Cross-anisotropic (or transversely isotropic)) محسوب می‌شوند. چشم‌پوشی از هر کدام از این ویژگی‌ها و یا شرایط مرزی واقعی در تحلیل سازه‌ای یا در فرایند محاسبه معکوس بر پایه داده‌های FWD خطاهای چشم‌گیری در برآورد ظرفیت سازه، عمر خستگی و شیارشدگی به دنبال دارد [9-12].

در همین راستا، السیفی و همکاران (Elseifi et al.) [13] با بهره‌گیری از یک مدل سه‌بعدی شبه‌استاتیک، رفتار بار متحرک را در شرایط دمایی و سرعت‌های مختلف و لحاظ نمودن ویژگی ویسکوالاستیک لایه آسفالتی، شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که مدل ویسکوالاستیک پاسخ‌های روسازی را با میانگین خطای کمتر از ۱۵ درصد نسبت به اندازه‌گیری‌های میدانی پیش‌بینی می‌کند. در مطالعه دیگر، محققان نشان دادند که اعمال مشخصات ویسکوالاستیک در تحلیل روسازی کافی نیست، بلکه باید لایه اساس دانه‌ای هم به طور صحیح مدل شود. نتایج نشان داد که استفاده از مدل غیر خطی ناهمسانگرد در مقایسه با مدل خطی همسانگرد موجب تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌های بحرانی روسازی می‌شود. به طور مشخص، استفاده از مدل غیر خطی ناهمسانگرد باعث افزایش ۲۴ تا ۴۲ درصد در کرنش‌های کششی زیر لایه آسفالتی، افزایش ۱۰ تا ۲۳ درصد در تنش و کرنش‌های برشی در آسفالت، افزایش ۱۶ تا ۳۸ درصد در تنش‌های انحرافی روی بستر، و افزایش ۱۷ تا ۳۶ درصد در کرنش‌های فشاری روی بستر شد. آن‌ها همچنین نشان دادند که در دماهای بالاتر (۴۷°C) و بارگذاری‌های سنگین‌تر، تأثیر مدل‌سازی غیر خطی و ناهمسانگرد بر افزایش مقادیر پاسخ‌ها برجسته‌تر می‌شود [14]. در مطالعه‌ای مشابه، پژوهشگران، ضمن در نظر گرفتن لایه آسفالت به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک و لایه اساس به صورت غیر خطی، فرض همسانگردی عرضی را برای تمام لایه‌های زیرین در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که همسانگردی عرضی در تمام لایه‌های غیرآسفالتی بیشترین تأثیر را بر کرنش‌های افقی در زیر لایه آسفالت دارد. این اثر در دماهای

بالاتر نسبت به دماهای پایین‌تر برجسته‌تر است. علاوه بر این، کرنش‌های عمودی در لایه‌های خاکی، به ویژه در لایه اساس و زیراساس، به طور قابل توجهی تحت تأثیر همسانگردی عرضی قرار دارند، در حالی که کرنش‌های عمودی در لایه آسفالت تغییرات کمتری نشان می‌دهند [15].

از طرفی بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد، برخی از ویژگی‌های مهم رفتاری مصالح هنوز در بسیاری از پژوهش‌ها نادیده گرفته شده‌اند. موضوعی که نیاز به دستیابی به یک مدل عددی با در نظر گرفتن رفتار واقعی مصالح و شرایط محیطی را آشکار می‌سازد. در مطالعه‌ای از نگا و همکاران (Nega et al.) [16]، تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی روسازی انعطاف‌پذیر تحت بارگذاری دینامیکی همراه با مدل‌سازی ویسکوالاستیک غیر خطی به کار گرفته شده و پاسخ‌های تنش و کرنش مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ با این حال، رفتار ناهمسانگردی متقاطع در لایه‌های غیر آسفالتی لحاظ نشده است. در پژوهشی دیگر، مدل‌سازی روسازی آسفالتی با لایه اساس نیمه‌صلب تحت بارگذاری ناشی از دستگاه FWD و با استفاده از روش المان طیفی انجام شده است. در این مطالعه نیز رفتار ویسکوالاستیک، ویژگی‌های غیر خطی و ناهمسانگردی عرضی در هیچ یک از لایه‌ها مد نظر قرار نگرفته‌اند [17]. همچنین در مقاله‌ای از دنگ و همکاران (Deng et al.) [18]، مدل‌سازی روسازی انعطاف‌پذیر با استفاده از تحلیل اجزای محدود دوبعدی و بارگذاری دینامیکی ایستا، معادل با بار متحرک وسایل نقلیه انجام شده است. در این مدل، تنها لایه آسفالت به صورت ویسکوالاستیک تعریف شده و لایه‌های زیرین شامل اساس، زیراساس و بستر به صورت مصالح خطی و همسانگرد در نظر گرفته شده‌اند. در این مطالعه نیز ناهمسانگردی عرضی، رفتار غیر خطی در لایه‌های غیرآسفالتی و حضور سنگ بستر (Bedrock) نادیده گرفته شده‌اند. در پژوهشی دیگر، مدل‌سازی سه‌بعدی روسازی آسفالتی با استفاده از تحلیل اجزای محدود و اعمال فشار تماس واقعی بین تایر و سطح روسازی صورت گرفته است. در این مدل نیز تنها لایه آسفالت دارای رفتار ویسکوالاستیک است و سایر لایه‌ها به صورت مصالح خطی و همسانگرد مدل شده‌اند [19].

مشخصات محور مطالعه

در این پژوهش روسازی انعطاف‌پذیر محور اهواز - شوش در استان خوزستان مبنای شبیه‌سازی قرار گرفته است. انتخاب این محور به دلیل قرارگیری در یکی از مناطق گرمسیری ایران و دسترسی به داده‌های قابل اعتماد از پژوهش‌های پیشین می‌باشد که امکان بررسی دقیق‌تر عملکرد روسازی را فراهم ساخت. برای مدل‌سازی این روسازی در شرایط آزمایش FWD، از نتایج مطالعات صولتی‌فر و همکاران [20] استفاده شد. جدول (۱) مشخصات کلی این روسازی و شکل (۱) موقعیت جغرافیایی این محور حمل‌ونقل را نشان می‌دهد. همچنین خواص حجمی مخلوط آسفالتی و پارامترهای ویسکوزیته قیر به همراه نتایج آزمایش FWD شامل میانگین مدول الاستیسیته لایه‌های آسفالت، اساس و بستر در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱ مشخصات کلی موقعیت روسازی محور اهواز - شوش [20]

موقعیت	نام جاده	مشخصه روسازی	عمر روسازی	ضخامت کلی لایه‌های آسفالتی (mm)	ضخامت کلی لایه‌های اساس و زیراساس (mm)	نوع قیر	نوع مصالح اساس و زیراساس
خوزستان	اهواز - شوش	جدید	۴ سال	۹۵	۳۴۵	۶۰/۷۰	Granular



شکل ۱ موقعیت مکانی سایت محور اهواز - شوش در استان خوزستان

جدول ۲ خواص حجمی مخلوط آسفالتی و پارامترهای ویسکوزیته قیر [20]

شناسه نمونه	خواص حجمی مخلوط							پارامترهای ویسکوزیته قیر
	ρ_{200}	ρ_4	ρ_{38}	ρ_{34}	V_a	V_{beff}	A	VTs
S02L1	۷/۹	۳۳/۰	۱۱/۰	۱/۰	۵/۷	۷/۱	۷/۰۸۱۶	-۲/۲۴۱۸

جدول ۳ مدول الاستیسیته محاسبه شده لایه‌ها از طریق آزمایش FWD [20]

مدول محاسبه معکوس شده (MPa)			
آسفالت		اساس	
		بستر	
۱۲۰	۳۰ °C	۲۲۵	۱۲۰
	۶۹۹۸		
	۳۵ °C		
	۶۱۱۲		
	۴۰ °C		
	۵۲۲۵		
	۴۵ °C		
	۴۳۳۸		
	۵۰ °C		
	۳۴۵۱		
	۵۵ °C		
	۲۵۶۴		

مدل سازی روسازی محور مطالعه

مدل سازی عددی به عنوان ابزاری توانمند در شبیه سازی رفتار روسازی تحت سناریوهای متنوع بارگذاری شناخته می شود. پس از انجام مراحل کالیبراسیون و اعتبارسنجی، این مدل قادر است ترکیب های گوناگونی از ویژگی های مصالح، ساختار هندسی، شرایط بارگذاری و عوامل محیطی را در فضای محاسباتی لحاظ کند [21]. مدل سازی اجزای محدود روسازی تحت بارگذاری آزمایش FWD نیازمند فراهم سازی تمامی پارامترهای ورودی مورد نیاز است. در موقعیت مورد مطالعه، بخشی از پارامترهای مورد نیاز مدل سازی در دسترس است و سایر پارامترها با استناد به منابع علمی معتبر، بهره گیری از روش آزمون و خطا، و انطباق مشخصات مکانیکی مصالح و ساختار لایه ها تعیین گردید. این فرایند به گونه ای انجام شد که پاسخ های محاسبه شده از مدل، تطابق مناسبی با نتایج حاصل از آزمایش FWD در شرایط واقعی بهره برداری داشته باشد. در این خصوص، میزان اختلاف میان نتایج، با استفاده از شاخص های خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) (Root Mean Square Error) و درصد خطای جذر میانگین مربعات (PRMSE) (Percentage of Root Mean Square Error) که در روابط (۱) و (۲) ارائه شده اند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. گفتنی است RMSE با واحد کمیت بررسی شده بیان می شود؛ PRMSE به صورت درصدی گزارش می گردد. در این بخش پس از بیان خواص مصالح روسازی به عنوان یکی از اجزای اصلی مدل سازی، به جزئیات ساخت مدل پرداخته می شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - x'_i)^2}{N}} \quad (1)$$

$$PRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - x'_i}{x'_i}\right)^2}{N}} \times 100 \quad (2)$$

x_i : مقدار اندازه گیری شده

x'_i : مقدار پیش بینی

N : تعداد داده های لحاظ شده در محاسبه خطا

خواص مصالح لایه آسفالتی

آسفالت به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک شناخته می شود و

رفتار آن به شدت به زمان (یا فرکانس) بارگذاری و دما وابسته است [22]. برای در نظر گرفتن ویژگی ویسکوالاستیک لایه آسفالتی، ابتدا با استفاده از مدل ویتزاک (Witczak Model) مدول دینامیکی اولیه لایه آسفالتی در فرکانس بارگذاری و دمای آزمون FWD محاسبه می شود. در معادله (۳)، پیش بینی مقادیر مدول دینامیکی توسط مدل ویتزاک، در دماهای مختلف و بر پایه دانه بندی سنگدانه ها، درصد حجمی قیر مؤثر، مقدار فضای خالی مخلوط، ویسکوزیته قیر و فرکانس اعمال بار انجام می گیرد. سپس منحنی مدول دینامیکی اولیه لایه آسفالتی به نحوی تعدیل می شود که با مقدار مدول حاصل از آزمایش FWD در شرایط محیطی متناظر تطابق داشته باشد. اطلاعات بیشتر در این خصوص توسط نسیمی فر و همکاران [1] شرح داده شده است. برای استفاده از مدول نهایی تعدیل شده در تحلیل های ویسکوالاستیک، لازم است این مدول به نرمی خزشی (Creep compliance) متناظر تبدیل شود. این تبدیل از طریق روش عددی ارائه شده توسط پارک و شیپری (Park & Schapery) انجام پذیرفته و نتیجه نهایی آن، نرمی خزشی در دمای آزمون است که مبنایی برای پارامترهای ورودی در نرم افزار آباکوس در این مطالعه است [23]. شکل (۲) نمونه ای از نمودار نرمی خزشی به دست آمده از لایه آسفالتی روسازی انعطاف پذیر محور اهواز - شوش در دمای $30^\circ C$ را نشان می دهد.

$$\log|E^*| = 3.750063 + 0.02932\rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841\rho_4 - 0.058097V_a - 0.802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a}\right) + \frac{3.871977 - 0.0021\rho_4 + 0.003958\rho_{38} - 0.000017(\rho_{38})^2 + 0.00547\rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351\log(f) - 0.393532\log(\eta))}} \quad (3)$$

$|E^*|$: مدول دینامیکی آسفالت (psi)

η : ویسکوزیته قیر (Mpoise)

f : فرکانس بارگذاری (Hz)

ρ_{200} : درصد مصالح عبوری از الک ۲۰۰

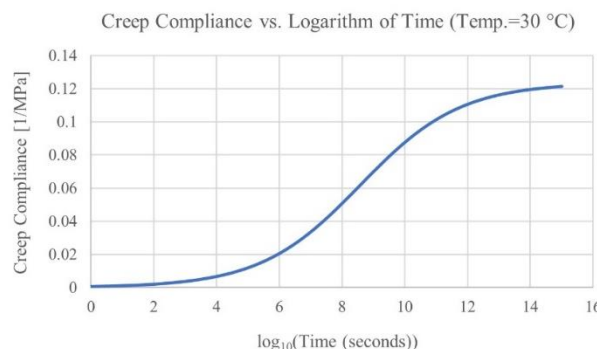
ρ_4 : درصد تجمعی مصالح باقی مانده بر روی الک ۴

ρ_{34} : درصد تجمعی مصالح باقی مانده بر روی الک ۱۹

ρ_{38} : درصد تجمعی مصالح باقی مانده بر روی الک ۹/۵

V_a : درصد فضای خالی و V_{beff} : درصد حجمی مقدار قیر مؤثر

در مطالعه‌ای از رائو و همکاران (Rao et al.) [28]، روابطی جهت پیش‌بینی ضرایب رگرسیون معادله (۴) ارائه شده است. همچنین مشخصات فیزیکی مصالح که به عنوان متغیرهای ورودی در روابط محاسبه ضرایب رگرسیون مورد نیاز است، توسط یائو و کویتوس (Yau & Quintus) [29] گزارش شده‌اند. از سویی دیگر ژیانو و توتوملوئر (Xiao and Tutumluer) ضرایب رگرسیون M_r را برای سه سطح مختلف از کیفیت مصالح (بالا، متوسط و پایین) ارائه کرده‌اند. در صورت انتخاب مدل مدول برجهندگی M_r ، بر اساس مدل ارائه شده در MEPDG پارامترهای مدل می‌توانند بنا بر مطالعه ژیانو و توتوملوئر متناسب با کیفیت مصالح اختصاص داده شوند [30,31]. رویکرد مطالعاتی این پژوهش در تخمین مقادیر ضرایب رگرسیون مدول برجهندگی، بهره‌گیری از پژوهش‌های معرفی شده در این بخش است. در همین راستا شکل (۳) میزان خطای حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش را نشان می‌دهد که در آن، ضرایب رگرسیون لایه اساس بر مبنای دسته‌بندی کیفی مصالح از مطالعه ژیانو و توتوملوئر و ضرایب رگرسیون لایه بستر با استناد به روابط مطرح شده برای انواع مصالح در مطالعه رائو و همکاران تعیین شده‌اند. برای سهولت در نمایش، ترکیب‌های مختلف مصالح، با نمادهای دوحرفی نشان داده شده است. مصالح بستر شامل چهار نوع Gravel(G), Sand(S), Silt(I) و Clay(C) و مصالح اساس در سه کیفیت High(H), Medium(M) و Low(L) در نظر گرفته شده‌اند. گفتنی است این تحلیل‌ها با در نظر گرفتن عمق قرارگیری لایه سخت (سنگ بستر) (Stiff layer) (Bedrock)) در سه تراز مختلف صورت گرفته است. انتخاب این ترازها با هدف پوشش بازه‌ای از شرایط محتمل در پروژه‌های روسازی انجام شده است؛ به طوری که عمق ۳ متر نمایانگر حالت سنگ بستر کم عمق، ۴.۵ متر به عنوان وضعیت میانی، و ۶ متر به عنوان آستانه‌ای در نظر گرفته شده که در برخی منابع، تأثیر سنگ بستر در آن آستانه به طور قابل توجهی در تحلیل روسازی کاهش می‌یابد [32]. سرانجام لایه اساس با درجه کیفی پایین (Low) و بستر روسازی در حالت ماسه‌ای (Sand) به عنوان مصالح غیر آسفالتی با ویژگی مدول غیر خطی مبنای مدل‌سازی قرار گرفت. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت SL و عمق ۳ متری قرارگیری سنگ بستر کمترین میزان خطا (۰/۰۱۷ میلی-متر) به دست آمده است. بیان می‌شود در مطالعه‌ای از لی و ونگ (Li & Wang) [33] نیز پارامترهای مصالح برای اساس و بستر از معادلات تجربی - آزمایشگاهی توسعه یافته که خواص فیزیکی



شکل ۲. نمودار نرمی خزشی بر حسب لگاریتم زمان

خواص مصالح لایه‌های غیر آسفالتی

برای درک رفتار مصالح غیر آسفالتی ابتدا باید به ویژگی غیر خطی بودن آن‌ها توجه کرد. خاک بستر و لایه‌های اساس یا زیراساس تحت بارهای تکراری رفتار غیر خطی نشان می‌دهند، به این معنا که پاسخ مکانیکی آن‌ها با مدول برجهندگی (Resilient modulus) وابسته به تنش توصیف می‌شود. لذا برای تحلیل دقیق‌تر روسازی بهتر است اثر مدول غیر خطی مصالح در نظر گرفته شود. در این مطالعه با استفاده از زیرروال UMAT مدول غیر خطی وابسته به تنش بر اساس مدل ARA (Applied Research Associates Mechanistic-) برنامه‌نویسی شد؛ مدلی که به عنوان راهنمای طراحی مکانیکی - تجربی روسازی (Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) [24] نیز شناخته می‌شود و رابطه (۴) مبنای پیاده‌سازی آن است [25,26]. مدل ساختاری ARA از قابلیت بالایی در شبیه‌سازی رفتارهای مصالح روسازی برخوردار است؛ به گونه‌ای که هم توانایی بازتاب فرایند سخت‌شوندگی مصالح سنگدانه‌ای لایه‌های اساس را دارد و هم قادر است نرم‌شوندگی خاک‌های ریزدانه در بستر را به دقت مدل‌سازی کند [27]. نقطه قوت این معادله توانایی آن در اعمال کردن وابستگی مدول برجهندگی به وضعیت تنش و نوع ماده است [28].

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (4)$$

M_r : مدول برجهندگی

θ : نامتغیر اول تانسور تنش

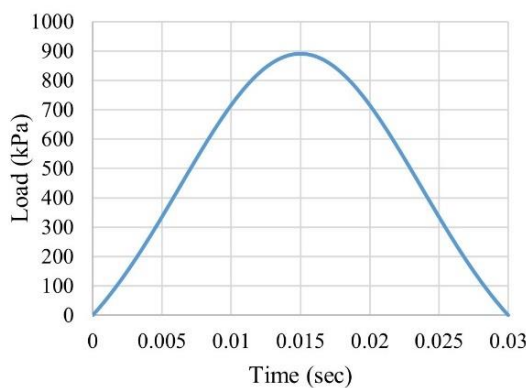
P_a : فشار اتمسفر معادل ۱۰۱/۳۲۵ کیلوپاسکال

τ_{oct} : تنش برشی هشت وجهی

k_1, k_2 و k_3 : ثابت‌های رگرسیون

ساختار مدل اجزای محدود

در این پژوهش روسازی محور مورد مطالعه تحت بار دستگاه FWD به صورت دوبعدی و تقارن محور شبیه سازی شد. مدل تقارن محور دوبعدی در مدل سازی آزمون FWD نتایجی مشابه مدل سه بعدی را با کارایی بالاتر ارائه می دهد [18]. شکل (۴) نمونه ای از الگوی بارگذاری FWD در این مدل سازی برای بار ۸۹۰ کیلو پاسکال است. فرکانس مؤثر بارگذاری با توجه به دوره تناوب ۰/۳ ثانیه ای، برابر با حدود ۳۳/۳ هرتز است.

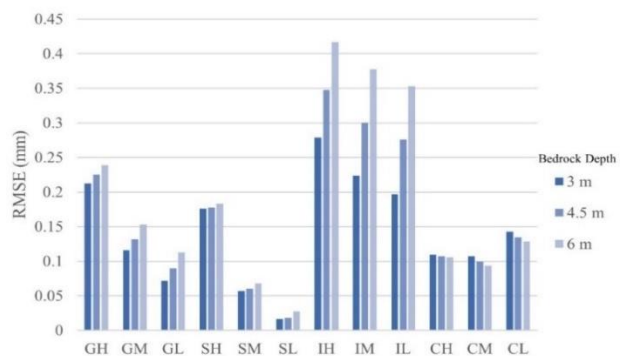


شکل ۴ الگوی دامنه نوسان بار ضربه ای آزمون FWD

همچنین، تحلیل حساسیت نسبت به بیشینه خیز مرکزی و کناری برای تعیین شعاع و عمق مدل صورت گرفت. خیز بیشینه مرکزی بیانگر خیز در مرکز بارگذاری و خیز بیشینه کناری معادل با خیز در انتهای صفحه بارگذاری است. بنابر نمودارهای (۵) و (۷) طول شعاعی مدل از مقدار ۲ تا ۲/۵ متر تغییر کرده و مقادیر خیز بیشینه مرکزی و کناری ثبت شده است. معیار انتخاب ابعاد رسیدن به تغییرات خیز کمتر از ۵ درصد است و بنابراین بعد ۲/۵ متر برای طول شعاعی مدل انتخاب شده است. به همین ترتیب در نمودارهای (۶) و (۸) عمق مدل از مقدار ۴/۵ تا ۱۰ متر تغییر کرده و در نهایت عمق ۸ متر برای مدل در نظر گرفته شده است. گفتنی است انعکاس موج تنش از مرزهای مدل عددی یکی از دغدغه های اصلی در تحلیل دینامیکی است. تشدید (Amplification) دینامیکی ممکن است در اثر انعکاس موج تنش، که ناشی از فاصله ناکافی تا این مرزهاست، رخ دهد [15]. دانکن و همکاران (Duncan et al.) [38] عمق مدل را ۵۰ برابر شعاع بارگذاری، و طول شعاعی آن را ۱۲ برابر شعاع بارگذاری

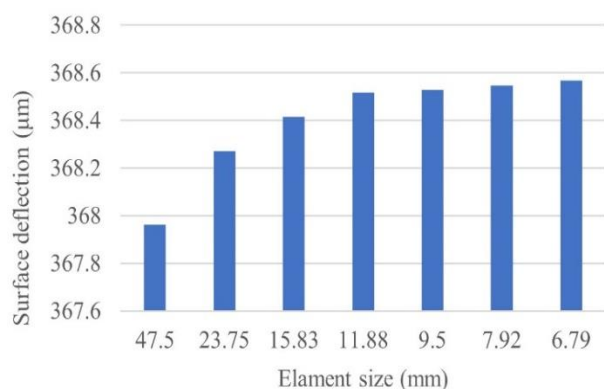
مصلح غیر آسفالتی را به پارامترهای مدل غیر خطی مرتبط می کنند، به دست آمده اند. گفتنی است، مقدار خطای RMSE در شکل (۳) بر اساس مقایسه میان داده های افت وخیز روسازی تحت بار FWD معادل ۵۶۶ کیلو پاسکال و در دمای ۳۵ °C با نتایج مدل عددی است.

یکی دیگر از ویژگی های قابل توجه در مصالح غیر آسفالتی، همسانگردی عرضی آن هاست. بر اساس مطالعات انجام شده، سختی لایه های روسازی در راستای عمودی بیشتر از سختی آن ها در راستای افقی است [34]. زیرا فرایند روسازی راه ها شامل تراکم مصالح در راستای عمود است و همین امر منجر به خواص مکانیکی متفاوت در راستای عمودی و افقی می شود. این ویژگی با عنوان همسانگردی عرضی در لایه های روسازی شناخته می شود. به طور معمول، شاخص همسانگردی عرضی با نسبت مدل افقی به قائم (n) مشخص می شود. با توجه به نبود داده های آزمایشگاهی صریح برای تعیین پارامتر همسانگردی عرضی n در مصالح روسازی، انتخاب این پارامتر در مطالعات عددی معمولاً بر اساس ویژگی های فیزیکی مصالح، کیفیت ساخت، و انطباق با رفتار واقعی صورت می گیرد. در مدل های عددی معتبر نظیر مطالعه یو و همکاران (You et al.) [35]، مقدار n برای مصالح دانه ای برابر با ۰/۷۵ به کار گرفته شد. در این پژوهش نیز، با توجه به نوع مصالح به ترتیب مقادیر ۰/۵ و ۰/۷ برای مصالح اساس و بستر انتخاب گردید. این مقادیر ضمن همخوانی با رفتار مکانیکی مورد انتظار، در محدوده ای قرار دارد که در مطالعات عددی مرتبط با مصالح دانه ای رایج است و منجر به پاسخ عددی پایدار در مدل سازی است [36,37].



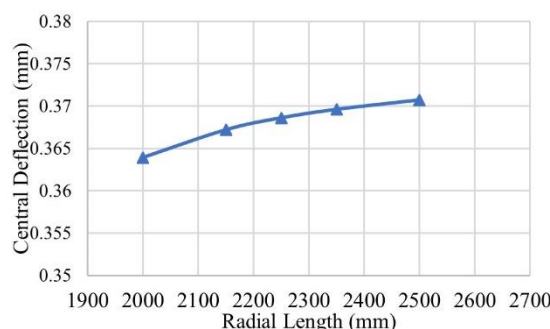
شکل ۳ RMSE در مقادیر مختلف از ضرایب رگرسیون اختصاص داده شده به بستر و اساس

برای انتخاب سائز مش‌بندی نیز مطابق با شکل (۹)، تغییرات خیز سطح روسازی در مقابل تغییر سائز مش مورد بررسی قرار گرفت و سائز مش ۹/۵ میلی‌متر انتخاب شد. زیرا مقادیر کوچک‌تر از آن عملاً تأثیری در خیز به دست آمده نداشته‌اند. بنابر شکل (۱۰) و (۱۱) مش‌بندی اجزای محدود در ناحیه بارگذاری دایره‌ای ریزتر و در نواحی دورتر از آن نسبتاً درشت‌تر اعمال شده تا با حفظ دقت تحلیل، حجم محاسبات و مدت زمان حل کاسته شود. در این تحقیق، برای مدل‌سازی ناحیه‌ای که مصالح رفتار غیر خطی از خود نشان می‌دهند، از المان‌های 4-node bilinear, reduced integration with) CAX4R (hourglass control استفاده شده است در حالی که در نواحی با مصالح خطی، المان‌های CAX4 (4-node bilinear) مورد استفاده بوده است. در شبیه‌سازی روسازی، تماس کامل میان لایه‌ها با فرض عدم لغزش نسبی با توجه به بزرگ بودن سطح تماس لایه‌ها، نیروی گرانش و بار ترافیکی مد نظر قرار گرفت. این موضوعی است که با ماهیت بارگذاری فشاری نیز سازگار است [39]. بنابرین مدل اجزای محدود از اتصال گرهی (Tie-contact) بهره می‌برد؛ روشی که اتصال کامل میان **سطوح** را بدون لغزش یا جداشدگی فراهم می‌سازد و برای شبیه‌سازی تعامل میان لایه‌های روسازی به کار گرفته می‌شود [40]. با توجه به شکل (۱۲) در مدل تقارن محور شرایط مرزی به گونه‌ای تعریف شد که جابه‌جایی افقی در محور تقارن و لبه‌های جانبی، و جابه‌جایی افقی و قائم در بخش تحتانی محدود گردد.

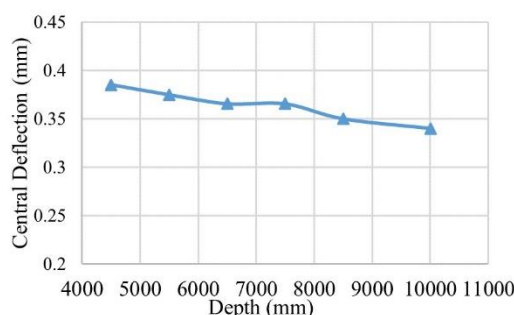


شکل ۹ تحلیل حساسیت مش

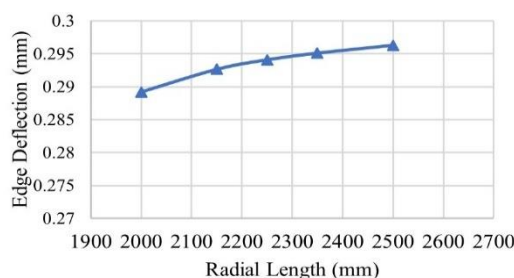
در نظر گرفت. در اینجا ابعاد مدل تقارن محور با شعاع ۲/۵ متر و عمق ۸ متر در جهت اطمینان تعیین شد.



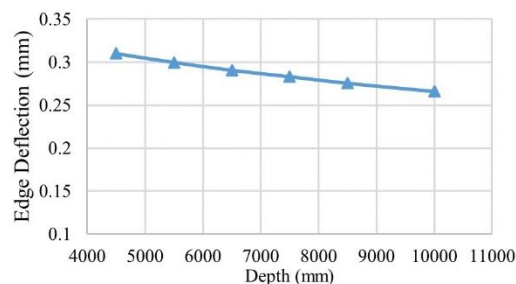
شکل ۵ مقدار خیز بیشینه مرکزی با تغییر در طول شعاعی مدل



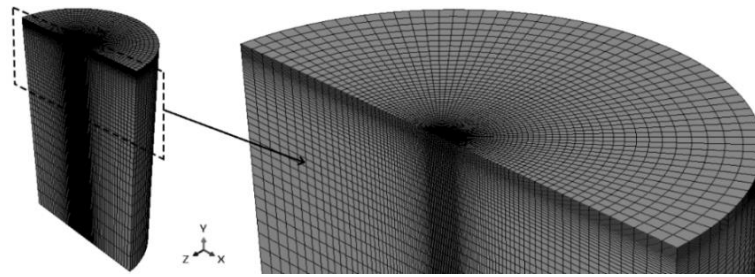
شکل ۶ مقدار خیز بیشینه مرکزی با تغییر در عمق مدل



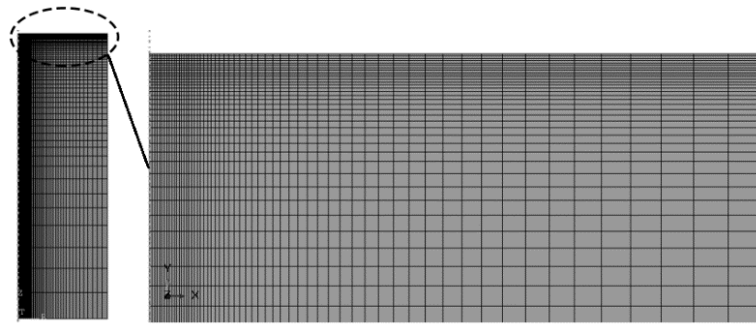
شکل ۷ مقدار خیز بیشینه کناری با تغییر در طول شعاعی مدل



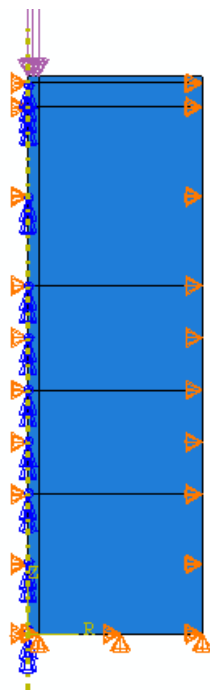
شکل ۸ مقدار خیز بیشینه کناری با تغییر در عمق مدل



شکل ۱۰ ساختار سه بعدی مدل تقارن محور اجزای محدود روسازی



شکل ۱۱ ساختار دوبعدی مدل تقارن محور اجزای محدود روسازی



شکل ۱۲ شرایط مرزی و محل بارگذاری در مدل تقارن محور روسازی

ضمنی (Implicit) و صریح (Explicit) برای حل معادله دیفرانسیل حاکم بر این سیستم وجود دارد. الگوریتم صریح، وضعیت سیستم را در زمان آینده بر اساس شرایط فعلی محاسبه می کند و معمولاً به زمان تحلیل کوتاهی نیاز دارد. با این حال

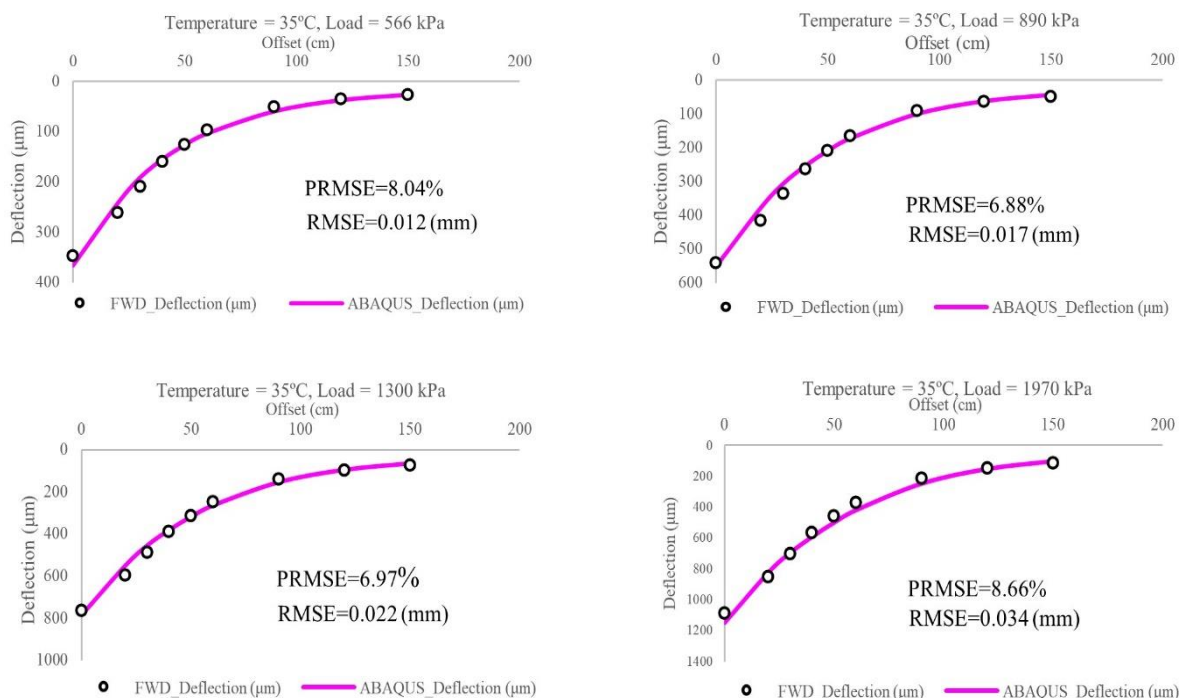
گفتنی است یک مقطع روسازی تحت بار FWD باید به عنوان یک سیستم دینامیکی چندلایه در نظر گرفته شود؛ زیرا مقدار بار، تابع زمان تغییر می کند. این بارگذاری باعث ایجاد موج های دینامیکی در لایه های روسازی می شود. دو الگوریتم

و مدول الاستیسیته لحظه‌ای (Instantaneous elastic modulus) لایه آسفالتی در مدل بنا بر مطالعات گذشته، معادل مقدار مدول الاستیسیته محاسبه معکوس شده آن تحت آزمایش FWD در شرایط مختلف دمایی و بارگذاری مطابق با جدول (۳) که پیشتر ارائه شد، لحاظ شده است [15]. در شکل (۱۳) حوضچه خیز مدل در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد در تمامی سطوح بارگذاری ترسیم شده است. مقادیر خطای محاسبه شده شامل RMSE و PRMSE بر روی نمودارها درج شده و برای سایر حالت‌ها، به منظور اختصار، به ارائه شکل‌های (۱۴) و (۱۵) بسنده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دما و بالا رفتن مقادیر بارگذاری، مقادیر خطا نیز افزایش می‌یابد؛ اما همچنان مقادیر RMSE در تمامی موارد کمتر از ۰/۱ میلی‌متر است و در اکثر موارد به طور قابل توجهی کمتر از این مقدار است. بیان می‌شود که مقادیر RMSE کوچک‌تر از ۰/۱ میلی‌متر در محدوده استاندارد قرار گرفته و مورد تأیید است [41]. با توجه به انطباق نتایج حاضر با معیارهای پذیرفته شده در ادبیات، می‌توان عملکرد مدل پیشنهادی را از نظر دقت عددی، معتبر و قابل اتکا ارزیابی کرد.

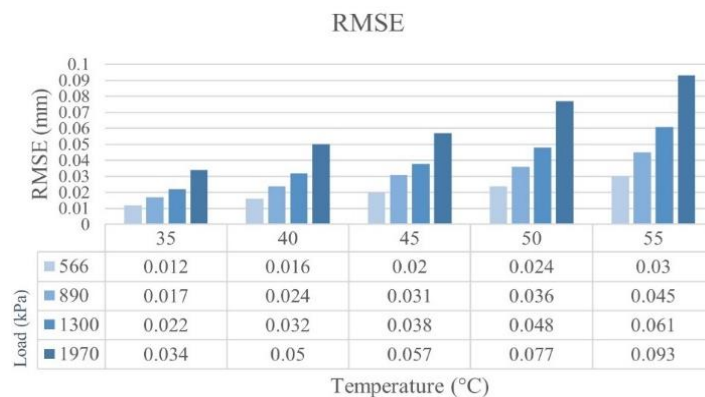
پایداری عددی این روش مشروط است. در مقابل الگوریتم ضمنی از پایداری عددی بی‌قید و شرط برخوردار است. این الگوریتم برای حل معادله از اطلاعات مربوط به وضعیت فعلی و آینده سیستم به طور همزمان بهره می‌برد [15]. استفاده از تحلیل دینامیکی ضمنی، به دلیل پایداری عددی بهتر و کارآمدی در مسائل دینامیک سازه رویکرد این مطالعه است. در بخش بعدی نتایج حاصل از مدل‌سازی ارائه شده و با مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمون FWD مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

مقایسه نتایج مدل‌سازی و FWD

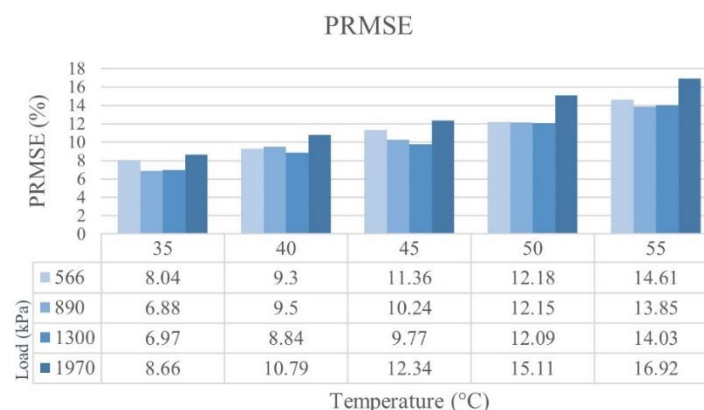
به منظور ارزیابی دقت شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی روسازی، نتایج مربوط به حوضچه خیز (Deflection bowl/basin) محاسبه شده با داده‌های میدانی حاصل از آزمایش FWD از مطالعه صوتی‌فر و همکاران مقایسه شد. این مقایسه در چهار سطح بارگذاری شامل بارهای ۵۶۶، ۸۹۰، ۱۳۰۰ و ۱۹۷۰ کیلوپاسکال و در پنج دمای مختلف ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی‌گراد (در مجموع ۲۰ حالت) صورت گرفت. گفتنی است دمای عمق میانی لایه آسفالتی به عنوان نماینده دمای کل لایه در نظر گرفته شده [39]



شکل ۱۳ اعتبارسنجی حوضچه خیز مدل FE با مقادیر FWD در دمای ۳۵ °C



شکل ۱۴ مقادیر RMSE در مقایسه داده‌های FWD و مدل عددی



شکل ۱۵ مقادیر PRMSE در مقایسه داده‌های FWD و مدل عددی

دهنده خیز در مرکز بارگذاری و بیانگر رفتار کلی سازه روسازی است و D900 خیز در فاصله ۹۰۰ میلی‌متری از مرکز را نشان می‌دهد و بیشتر معرف عملکرد بستر روسازی است [39]. عوامل بررسی شده شامل تحلیل دینامیکی، ویژگی ویسکوالاستیک لایه آسفالتی، خاصیت غیر خطی و همسانگرد عرضی در لایه‌های غیر آسفالتی و عمق قرارگیری سنگ بستر است. به منظور ارزیابی اثر هر عامل، مدلی با تمامی شرایط تحلیل به عنوان معیار سنجش تحت بارگذاری FWD قرار گرفته است. در تحلیل پارامتریک، هر عامل جداگانه با فرضیات ساده‌تر مانند تحلیل استاتیکی و ویژگی‌های الاستیک خطی و همسانگرد بررسی می‌گردد تا اثر آن در تحلیل مشخص شود.

تأثیر تحلیل دینامیکی

بارگذاری FWD به عنوان یک بارگذاری کوتاه مدت و ضربه‌ای، ماهیتی وابسته به زمان دارد که منجر به انتشار امواج تنش در لایه‌های روسازی می‌شود [42]. در این مطالعه، پاسخ سازه

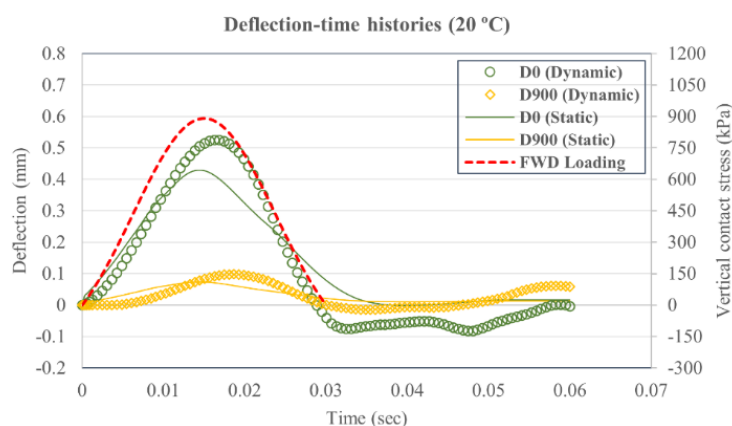
با توجه به شکل‌های (۱۴) و (۱۵) و مقادیر خطای محاسبه شده، مشاهده می‌شود که دمای بالا و افزایش نیروی بارگذاری می‌تواند به بروز رفتار فیزیکی پیچیده‌تر در مصالح منجر شود و موجب افزایش حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی گردد. گفتنی است از آنجا که مقادیر RMSE برای داده‌های مورد بررسی مورد تأیید است و مقادیر PRMSE صرفاً نسخه نرمال شده RMSE نسبت به میانگین یا دامنه داده‌هاست، می‌توان انتظار داشت که مقادیر PRMSE نیز در محدوده قابل قبول قرار گرفته است.

ارزیابی پارامترهای مؤثر بر عملکرد سازه‌ای روسازی

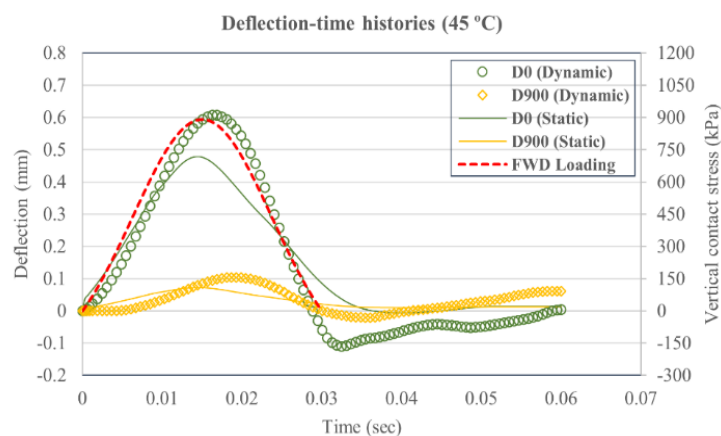
این بخش به بررسی عوامل کلیدی در شبیه‌سازی مدل اجزای محدود روسازی محور مورد مطالعه تحت بارگذاری دینامیکی FWD می‌پردازد. در ارزیابی عملکرد روسازی، خیز روسازی تحت بارگذاری به عنوان معیاری مهم بر مبنای دو شاخص D0 و D900 مورد بررسی قرار می‌گیرد که در این بین، نشان

مقدار بار، بلکه به سرعت و مدت زمان اعمال آن وابسته باشد، و در نتیجه، پاسخ با تأخیر زمانی ظاهر شود. عامل دوم، فرایند انتشار موج تنش در مصالح است که با سرعت مشخصی در محیط حرکت می‌کند. از این‌رو عامل سوم یعنی میرایی مصالح باعث جذب بخشی از انرژی موج در حین انتشار می‌شود و در نتیجه، سرعت مؤثر حرکت موج کاهش می‌یابد. این کاهش سرعت منجر به تأخیر در رسیدن موج به نقاط پاسخ و در نهایت افزایش وقفه زمانی می‌شود. گفتنی است نقش غالب فرایند انتشار موج تنش در ناحیه D900، که معرف رفتار بستر روسازی است، موجب افزایش مشهود وقفه زمانی در آن نسبت به D0 تلقی می‌شود. پرداختن به وقفه زمانی در تحلیل خیز دینامیکی، به منظور درک بهتر رفتار گذرای مصالح و ارزیابی ظرفیت جذب انرژی آن‌ها، نقش کلیدی در تفسیر دقیق عملکرد روسازی ایفا می‌کند.

روسازی تحت دو نوع تحلیل دینامیکی و استاتیکی بررسی شد تا اثرات وابستگی زمانی بارگذاری و مصالح آشکار گردد. شکل-های (۱۶) و (۱۷) افت‌وخیز سطح روسازی را بر مبنای دو شاخص D0 و D900 نمایش می‌دهد. مقایسه نمودارهای بار - زمان و افت‌وخیز - زمان نشان می‌دهد که در تحلیل دینامیکی وقفه زمانی (Time lag) مشخصی بین رسیدن بار به مقدار بیشینه و وقوع حداکثر خیز در نقاط D0 و D900 وجود دارد؛ موضوعی که در مطالعات پیشین نیز مطرح بوده است [43]. این تأخیر را می‌توان به سه عامل مکانیکی نسبت داد؛ یکی از این عوامل، رفتار ویسکوالاستیک مصالح روسازی است که منجر به تأخیر در پاسخ به بارگذاری می‌شود. مصالح ویسکوالاستیک تحت تأثیر همزمان نیروهای کشسان (الاستیک)، نیروهای ویسکوز (وابسته به نرخ تغییر شکل)، و نیروهای اینرسی (وابسته به جرم و شتاب) قرار دارند [44]. این ترکیب باعث می‌شود که پاسخ مصالح نه تنها به



شکل ۱۶ مقایسه تحلیل دینامیکی و استاتیکی با استفاده از منحنی‌های افت‌وخیز - زمان در دمای ۲۰ °C



شکل ۱۷ مقایسه تحلیل دینامیکی و استاتیکی با استفاده از منحنی‌های افت‌وخیز - زمان در دمای ۴۵ °C

جدول ۴ تأثیر تحلیل دینامیکی بر افت و خیز سطح روسازی

۴۵°C		۲۰°C		دما (°C)
تحلیل دینامیکی	تحلیل استاتیکی	تحلیل دینامیکی	تحلیل استاتیکی	شاخص افت و خیز
۰/۶۰۷ (+۲۷/۵٪)	۰/۴۷۶	۰/۵۲۵ (+۲۳٪)	۰/۴۲۷	(mm) D0
۰/۱۰۴ (+۴۴٪)	۰/۰۷۲	۰/۰۹۷ (+۳۳٪)	۰/۰۷۳	(mm) D900
*درصد های درج شده در جدول بیانگر میزان تغییرات هر شاخص نسبت به حالت تحلیل استاتیکی می باشد.				

همان گونه که در جدول (۴) مشاهده می شود، در آزمایش FWD، به دلیل ماهیت ضربه ای و گذرای بارگذاری، خیز ثبت شده در حالت تحلیل دینامیکی معمولاً بیشتر از استاتیکی است. این تفاوت در دمای بالاتر تشدید می شود، زیرا رفتار ویسکوالاستیک در لایه آسفالتی غالب است. بنابراین شاخص D0 در تحلیل دینامیکی در دماهای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی گراد به ترتیب ۲۳ و ۲۷/۵ درصد نسبت به تحلیل استاتیکی افزایش داشته است. این مقادیر برای شاخص D900 برابر با ۳۳ و ۴۴ درصد بوده است. تأثیر تحلیل دینامیکی بر خیز D900 به مراتب بیشتر از D0 است، چرا که D900 در فاصله دورتری از مرکز بارگذاری قرار دارد. در این نقطه، اثرات اینرسی و بازتاب موج به صورت برجسته تری ظاهر می شود. در مقابل، تحلیل استاتیکی به دلیل عدم لحاظ کردن وابستگی زمانی، قادر به بازنمایی این پدیده ها نیست. بنابراین، تحلیل دینامیکی نقش کلیدی در ارزیابی دقیق عملکرد گذرای روسازی ایفا می کند. وجود خیز منفی در نمودارهای دینامیکی نیز ناشی از ماهیت گذرای بارگذاری ضربه ای، رفتار ویسکوالاستیک مصالح، و اثر نیروهای اینرسی است. این پدیده در تحلیل دینامیکی روسازی اهمیت بالایی دارد، زیرا نشان دهنده توانایی مصالح در بازیابی تغییر شکل و میزان اتلاف انرژی در سیستم است.

تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک لایه آسفالتی

به منظور بررسی اثر خاصیت ویسکوالاستیک در تحلیل پاسخ روسازی، دو حالت ساده شده با مدل معیار سنجش مقایسه شده- اند؛ مدل معیار سنجش، به عنوان حالت پایه و نزدیک ترین مدل به واقعیت، شامل رفتار ویسکوالاستیک در لایه آسفالتی و رفتار الاستیک غیر خطی و ناهمسانگرد در لایه های غیر آسفالتی است.

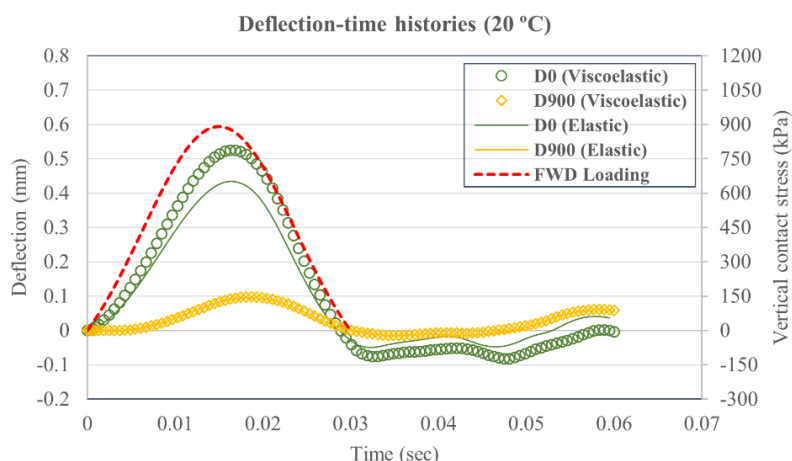
در حالت اول، برای بررسی تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک، رفتار آسفالت به صورت الاستیک خطی فرض شده و سایر ویژگی های مدل معیار حفظ شده اند. در حالت دوم، علاوه بر فرض رفتار الاستیک خطی برای آسفالت، رفتار لایه های غیر آسفالتی نیز به صورت خطی و همسانگرد در نظر گرفته شده اند. جزئیات این حالات در جدول (۵) ارائه شده است. بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل حالت اول، مطابق با شکل های (۱۸) و (۱۹)، نشان می دهد که D0، در حالتی که رفتار ویسکوالاستیک برای لایه آسفالتی لحاظ شده، بیشتر از حالتی است که این لایه به صورت الاستیک مدل سازی شده است. بر مبنای اطلاعات جدول (۶) نیز مقادیر بیشینه آن در دماهای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی گراد به ترتیب ۲۱ و ۲۷ درصد افزایش داشته است. در مقابل، D900، در هر دو مدل رفتاری و در هر دو دمای مورد بررسی تفاوت چندانی نداشتند و تقریباً برابر بوده اند. این تفاوت در مقدار D0 را می توان به تفاوت در نحوه انتقال و جذب انرژی ناشی از بارگذاری نسبت داد. در تحلیل با فرض رفتار الاستیک برای لایه آسفالتی، این لایه توانایی میرا کردن انرژی ورودی را ندارد و بخش عمده ای از تنش به لایه های زیرین، به ویژه لایه اساس، منتقل می شود. در نتیجه، تنش های اعمال شده در لایه اساس افزایش می یابند و این مصالح دانه ای، که رفتار غیر خطی دارند، به صورت موضعی وارد فاز سخت شوندگی می شوند. این پدیده موجب افزایش سختی موضعی و در نهایت کاهش خیز کل سیستم روسازی می شود. از سوی دیگر، در تحلیلی که رفتار ویسکوالاستیک برای لایه آسفالتی در نظر گرفته شده، بخشی از انرژی وارد شده توسط خود این لایه جذب و مستهلک می گردد و در نتیجه، میزان تنش منتقل شده به لایه های زیرین کمتر خواهد بود. به همین دلیل، فرایند سخت شوندگی در لایه اساس به میزان کمتری رخ می دهد

D0 در حالتی که همه لایه‌ها به صورت الاستیک فرض شده‌اند در دماهای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۷ و ۹ درصد کمتر از مقادیر آن در حالت مدل معیار سنجش است. این در حالی است که مقادیر D900 در حالت مشابه با ۳۰ و ۲۶ درصد کاهش روبه‌رو بوده است. شایان ذکر است در مدل‌های حالت دوم که تمامی لایه‌های روسازی به صورت الاستیک خطی فرض شده‌اند، پاسخ دینامیکی سیستم پس از بارگذاری ضربه‌ای به صورت نوسانی ظاهر می‌شود. این رفتار ناشی از نبود مکانیزم جذب انرژی و رفتار فنرگونه آن‌هاست که انرژی وارد شده را ذخیره و سپس آزاد می‌کنند. هر چند در تحلیل عددی، میرایی عددی موجب کاهش تدریجی دامنه نوسان‌ها می‌شود، اما نبود ویژگی‌هایی مانند ویسکوالاستیسیته یا وابستگی به تنش، باعث می‌شود پاسخ مدل از رفتار واقعی روسازی فاصله بگیرد.

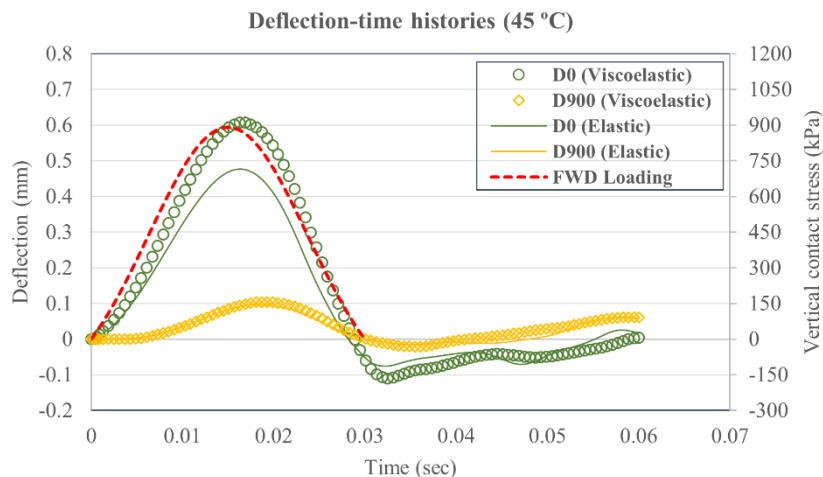
و خیز در مرکز بارگذاری افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که استفاده از مدل ARA این امکان را فراهم می‌سازد تا وابستگی مدول برجهندگی به تنش و جنس مصالح در تحلیل لحاظ گردد. این ویژگی، توانایی مدل را در شبیه‌سازی واقع‌گرایانه رفتار سخت‌شوندگی در مصالح سنگدانه‌ای (مانند لایه اساس) و رفتار نرم‌شوندگی در مصالح ریزدانه (مانند خاک بستر) افزایش می‌دهد و نقش کلیدی در دقت تحلیل ایفا می‌کند. در ادامه، تحلیل حالت دوم که در آن نه رفتار ویسکوالاستیک برای لایه آسفالتی و نه رفتار غیر خطی برای مصالح دانه‌ای لحاظ شده، نشان می‌دهد که به دلیل نبود این ویژگی‌ها، ظرفیت جذب انرژی در سیستم روسازی به شدت کاهش یافته و انتقال مستقیم تنش‌ها به لایه‌های زیرین منجر به افزایش محسوس خیز کل روسازی شده است. این موضوع در مقادیر درج شده در جدول (۷) و شکل‌های (۲۰) و (۲۱) به وضوح قابل مشاهده است. به طوری که مقادیر بیشینه

جدول ۵ فرضیات مدل‌های مورد مقایسه در بررسی اثر خاصیت ویسکوالاستیک

شرایط و ویژگی‌ها	مدل معیار سنجش	حالت ۱	حالت ۲
بارگذاری	دینامیکی (FWD)	دینامیکی (FWD)	دینامیکی (FWD)
تحلیل	دینامیکی	دینامیکی	دینامیکی
لایه آسفالتی	ویسکوالاستیک خطی	الاستیک خطی	الاستیک خطی
لایه‌های غیرآسفالتی	الاستیک غیر خطی و ناهمسانگرد	الاستیک غیر خطی و ناهمسانگرد	الاستیک خطی و همسانگرد



شکل ۱۸ مقایسه فرض ویژگی ویسکوالاستیک و الاستیک در لایه آسفالتی با منحنی‌های افت‌وخیز - زمان در دمای ۲۰ °C (حالت ۱)



شکل ۱۹ مقایسه فرض ویسکوالاستیک و الاستیک در لایه آسفالتی با منحنی‌های افت‌وخیز - زمان در دمای ۴۵ °C (حالت ۱)

جدول ۶ بررسی اثر خاصیت ویسکوالاستیک (حالت ۱)

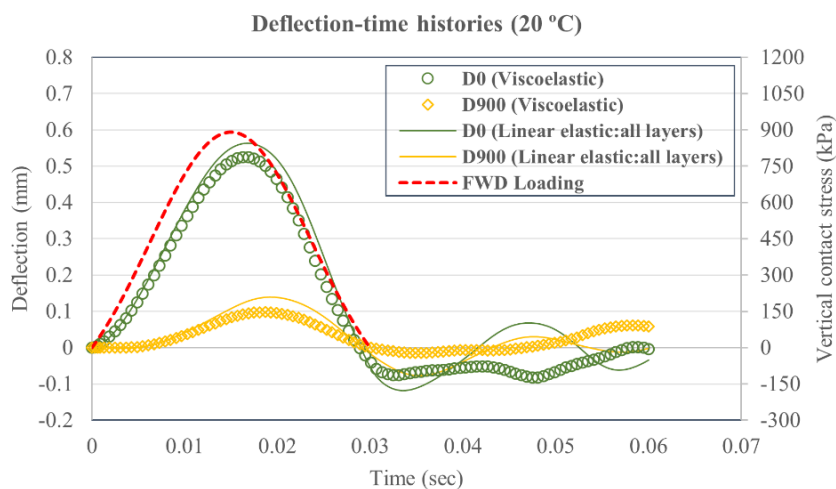
۴۵°C		۲۰°C		دما (°C)
آسفالت ویسکوالاستیک	آسفالت الاستیک	آسفالت ویسکوالاستیک	آسفالت الاستیک	شاخص افت‌وخیز
۰/۶۰۷ (+۲۷٪)	۰/۴۷۷	۰/۵۲۵ (+۲۱٪)	۰/۴۳۵	D0 (mm)
۰/۱۰۴ (+۸/۳٪)	۰/۰۹۶	۰/۰۹۷ (+۲٪)	۰/۰۹۵	D900 (mm)

* درصد‌های درج شده در جدول بیانگر میزان تغییرات هر شاخص نسبت به حالت ۱ (آسفالت الاستیک) است.

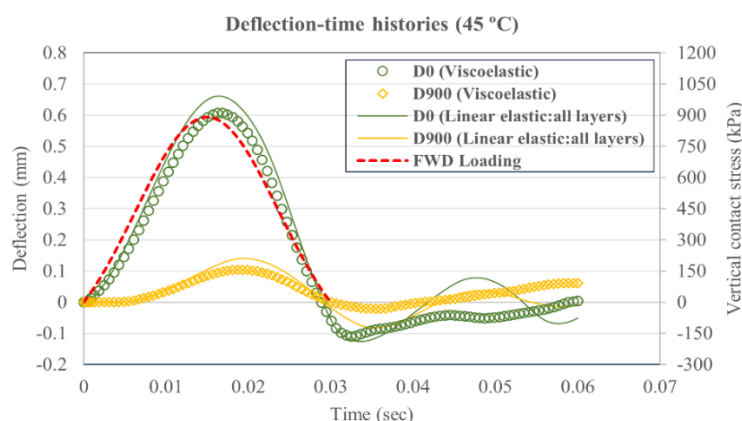
جدول ۷ بررسی اثر خاصیت ویسکوالاستیک (حالت ۲)

۴۵°C		۲۰°C		دما (°C)
آسفالت ویسکوالاستیک	آسفالت الاستیک	آسفالت ویسکوالاستیک	آسفالت الاستیک	شاخص افت‌وخیز
۰/۶۰۷ (-۹٪)	۰/۶۶۱	۰/۵۲۵ (-۷٪)	۰/۵۶۳	D0 (mm)
۰/۱۰۴ (-۲۶٪)	۰/۱۴	۰/۰۹۷ (-۳۰٪)	۰/۱۳۹	D900 (mm)

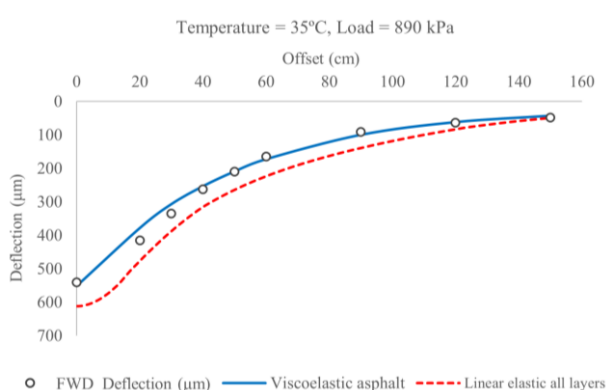
* درصد‌های درج شده در جدول بیانگر میزان تغییرات هر شاخص نسبت به حالت ۲ (تمامی لایه‌ها الاستیک) است.



شکل ۲۰ مقایسه فرض ویسکوالاستیک و الاستیک در لایه آسفالتی با منحنی‌های افت‌وخیز - زمان در دمای ۲۰ °C (حالت ۲)



شکل ۲۱ مقایسه فرض ویژگی ویسکوالاستیک و الاستیک در لایه آسفالتی با منحنی های افت و خیز - زمان در دمای ۴۵ °C (حالت ۲)

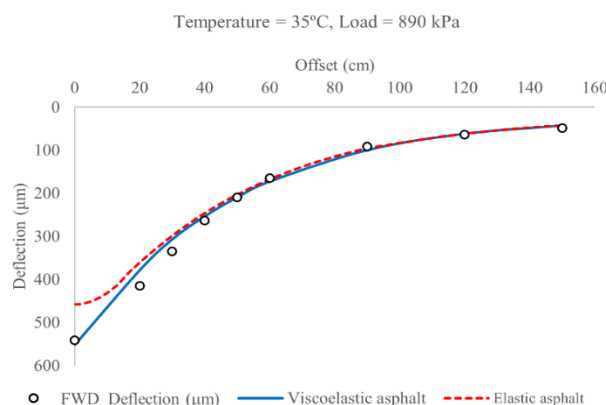


شکل ۲۳ مقایسه حوضچه افت و خیز روسازی با فرض آسفالت الاستیک و ویسکوالاستیک با پاسخ FWD (حالت ۲)

تأثیر خاصیت همسانگرد عرضی در مصالح لایه های غیرآسفالتی

مطابق با نتایج ارائه شده در شکل های (۲۴) و (۲۵) فرض همسانگرد بودن مصالح غیرآسفالتی منجر به کاهش مقادیر D0 و D900 در مقایسه با حالت ناهمسانگرد می شود. این تفاوت عمدتاً ناشی از آن است که در مصالح دانه ای، سختی در راستای افقی کمتر از سختی در راستای قائم است؛ در حالی که در مدل همسانگرد، مدول های افقی و قائم برابر فرض می شوند. جدول (۸) به مقایسه پاسخ های بحرانی روسازی در دو حالت همسانگرد و ناهمسانگرد اختصاص دارد. این پاسخ ها شامل خیز سطحی در محل اعمال بار (δ_{surface})، کرنش کششی افقی در زیر لایه آسفالتی (ϵ_h) و کرنش فشاری قائم در سطح لایه بستر (ϵ_v) هستند. بر اساس داده های به دست آمده، در نظر گرفتن ناهمسانگردی عرضی می تواند تا حدود ۱۵ درصد موجب افزایش افت و خیز سطحی نسبت به مدل همسانگرد شود. همچنین، در

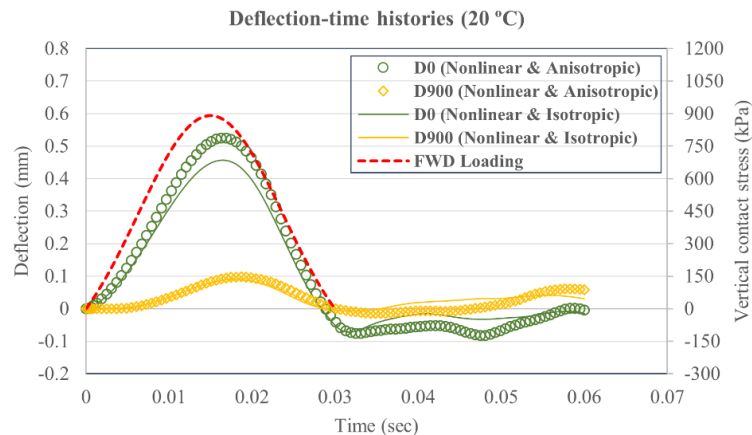
همچنین شکل (۲۲) به عنوان یک نمونه، مقایسه ای از حوضچه افت و خیز روسازی را در شرایط تحلیل آسفالت به عنوان یک ماده الاستیک و ویسکوالاستیک مطابق با حالت اول نشان می دهد. بیان می شود که نظریه الاستیک پاسخ های روسازی به بارگذاری را به طور قابل توجهی کمتر از مقدار واقعی برآورد می کند [13]. در اینجا نیز مشاهدات نشان می دهد که فرض لایه آسفالتی به عنوان یک ماده الاستیک خیز روسازی را در مرکز بارگذاری و قسمت های نزدیک به آن کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است؛ در حالی که مدل ویسکوالاستیک در تطابق با داده های FWD است. در شکل (۲۳) نیز مقایسه ای از حوضچه افت و خیز روسازی در شرایط تحلیل مدل در حالت دوم ارائه شده است. آن گونه که پیشتر نیز اشاره شد، در شرایطی که ویژگی های ویسکوالاستیک و رفتار غیر خطی مصالح در مدل لحاظ نشده اند، نحوه توزیع تنش منجر به افزایش خیز روسازی نسبت به مقادیر واقعی FWD شده است.



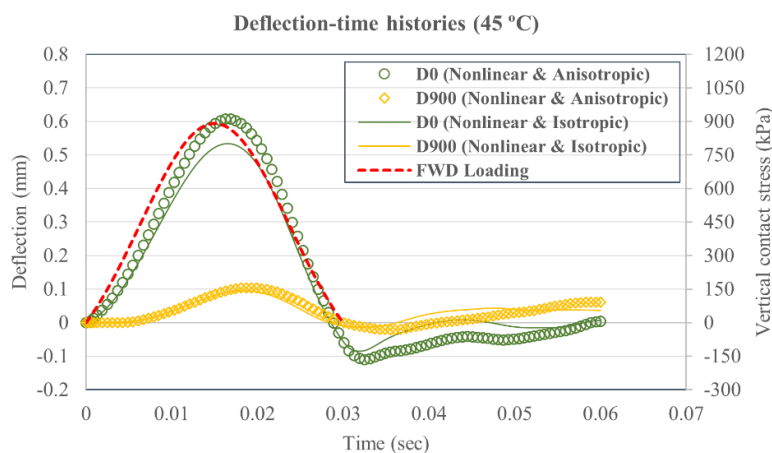
شکل ۲۲ مقایسه حوضچه افت و خیز روسازی با فرض آسفالت الاستیک و ویسکوالاستیک با پاسخ FWD (حالت ۱)

به ترتیب ۷۴ تا ۷۷ درصد بیشتر از مدل همسانگرد است که بیانگر افزایش عمق پیش‌بینی شده شیارشدگی در مدل ناهمسانگرد است [45]. درصدهای ارائه شده در جدول (۸) میزان تغییرات هر پارامتر نسبت به حالت همسانگرد را نشان می‌دهند.

مدل ناهمسانگرد، میزان کرنش افقی زیر لایه آسفالتی در هر دو دمای بررسی شده بین ۵۲ تا ۵۹ درصد بیشتر از حالت همسانگرد گزارش شده است؛ موضوعی که نشان دهنده کاهش عمر خستگی روسازی در این حالت است [45]. از سوی دیگر، کرنش قائم در سطح لایه بستر نیز در دماهای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد



شکل ۲۴ مقایسه فرض ویژگی ناهمسانگردی و همسانگردی در لایه‌های غیرآسفالتی با استفاده از منحنی‌های افت‌وخیز - زمان در دمای ۲۰ °C



شکل ۲۵ مقایسه فرض ویژگی ناهمسانگردی و همسانگردی در لایه‌های غیرآسفالتی با استفاده از منحنی‌های افت‌وخیز - زمان در دمای ۴۵ °C

جدول ۸ تأثیر خاصیت همسانگردی عرضی بر پاسخ‌های روسازی

۴۵ °C		۲۰ °C		دما (°C)
ناهمسانگرد	همسانگرد	ناهمسانگرد	همسانگرد	پاسخ‌های بحرانی
(% +۱۳/۹) ۰/۶۰۷	۰/۵۳۳	(% +۱۵) ۰/۵۲۵	۰/۴۵۶	δ_{surface} (mm)
(% +۵۹) ۲۴۴	۱۵۳	(% +۵۲) ۲۶۵	۱۷۴	ϵ_h ($\mu\epsilon$)
(% +۷۴) ۱۰۶۰	۶۱۰	(% +۷۷) ۹۹۰	۵۶۰	ϵ_v ($\mu\epsilon$)

*درصدهای درج شده در جدول بیانگر میزان تغییرات هر پارامتر نسبت به حالت همسانگرد است.

تأثیر خاصیت مدول غیر خطی و همسانگرد عرضی در مصالح لایه‌های غیر آسفالتی

در این بخش، تأثیر ویژگی‌های غیر خطی بودن مدول برجهندگی و همسانگردی عرضی مصالح غیر آسفالتی بر پاسخ‌های بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. این ارزیابی به صورت جداگانه برای لایه‌های اساس و بستر و در دو دمای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. نتایج حاصل در جداول (۹) و (۱۰) ارائه شده‌اند که درصد‌های درج شده در آن‌ها میزان تغییر هر پارامتر را نسبت به حالت خطی و همسانگرد نشان می‌دهند. مطابق با داده‌های جدول (۹) زمانی که لایه اساس به عنوان ماده‌ای با رفتار غیر خطی و ناهمسانگرد در نظر گرفته شود، مقادیر δ_{surface} و ϵ_h به ترتیب بین ۳۳ تا ۳۷ درصد و ۳۲ تا ۵۲ درصد کاهش می‌یابد و در مقابل، مقدار ϵ_v بین ۸۰ تا ۹۴ درصد افزایش می‌یابد. در جدول (۱۰) تحلیل مشابهی برای مصالح بستر انجام شده است که تغییرات کمتری را نشان می‌دهد؛ به طوری که δ_{surface} و ϵ_h حداکثر تا حدود ۵.۸ درصد تغییر کرده‌اند و ϵ_v بین ۱۹ تا ۲۲ درصد افزایش داشته است. این نتایج بیانگر آنند که در نظر گرفتن رفتار غیر خطی و همسانگردی عرضی در مصالح

دانه‌ای می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پاسخ‌های سازه‌ای روسازی داشته باشد.

در ادامه، مقایسه‌ای میان افت‌وخیز سطحی روسازی در دو حالت فرض مدول خطی و همسانگرد، و فرض مدول غیر خطی و ناهمسانگرد به طور همزمان برای لایه‌های اساس و بستر انجام شده که در شکل‌های (۲۶) و (۲۷) نمایش داده شده‌اند. بر اساس تحلیل‌های صورت گرفته، مقدار D0 در حالت فرض ویژگی‌های غیر خطی و همسانگردی عرضی کمتر از حالت خطی و همسانگرد است و با افزایش دما، این اختلاف نیز بیشتر شده است. این موضوع نشان می‌دهد که وابستگی مصالح دانه‌ای به تنش و جهت‌گیری مکانیکی، در دماهای بالاتر نقش پررنگ‌تری در رفتار روسازی ایفا می‌کند [46]. همچنین، مقدار D900 نیز در مدل غیر خطی و همسانگرد عرضی تا حدودی کمتر از حالت خطی گزارش شده است. بنابر مطالعات پیشین نیز نادیده گرفتن ویژگی‌های غیر خطی بودن مصالح و همسانگردی عرضی سبب افزایش خیز روسازی و کاهش دقت در تحلیل عملکرد روسازی می‌شود [47].

جدول ۹. پیش‌بینی پاسخ‌های روسازی در حالات مختلف تحلیل برای لایه اساس

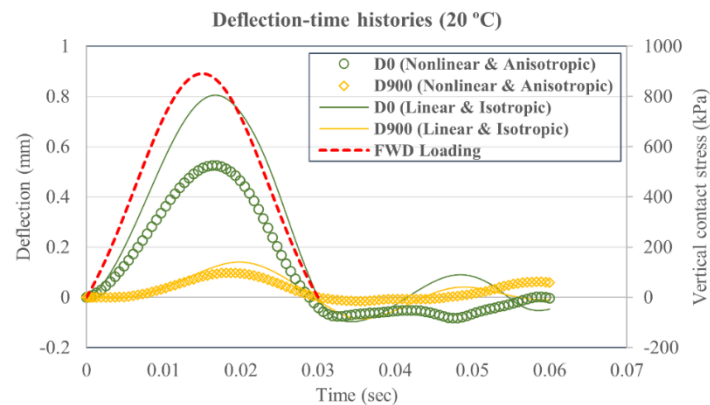
۴۵°C		۲۰°C		دما (°C)
لایه‌های غیر آسفالتی با ویژگی غیر خطی ناهمسانگرد	اساس با ویژگی خطی همسانگرد	لایه‌های غیر آسفالتی با ویژگی غیر خطی ناهمسانگرد	اساس با ویژگی خطی همسانگرد	پاسخ‌های بحرانی
۰/۶۰۷ (۳۷-٪)	۰/۹۶۵	۰/۵۲۵ (۳۳-٪)	۰/۷۸۳	δ_{surface} (mm)
۲۴۴ (۵۲-٪)	۵۰۸	۲۶۵ (۳۲-٪)	۳۹۰	ϵ_h (μE)
۱۰۶۰ (۸۰+٪)	۵۹۰	۹۹۰ (۹۴+٪)	۵۱۰	ϵ_v (μE)

*درصد‌های درج شده در جدول بیانگر میزان تغییرات هر پارامتر نسبت به حالت خطی و همسانگرد است.

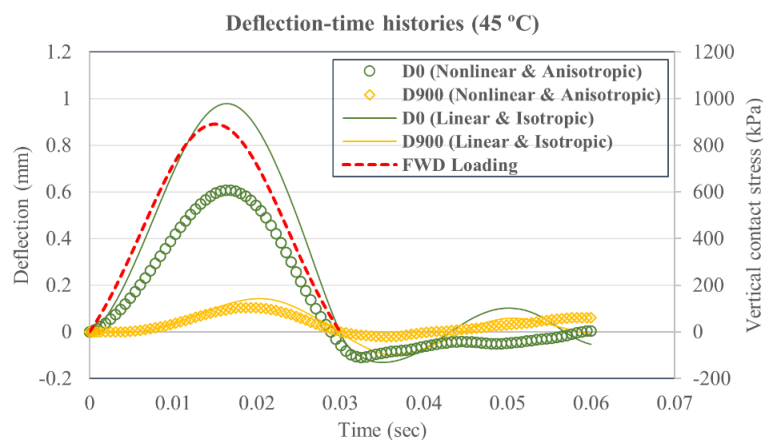
جدول ۱۰. پیش‌بینی پاسخ‌های روسازی در حالات مختلف تحلیل برای بستر

۴۵°C		۲۰°C		دما (°C)
لایه‌های غیر آسفالتی با ویژگی غیر خطی ناهمسانگرد	بستر با ویژگی خطی همسانگرد	لایه‌های غیر آسفالتی با ویژگی غیر خطی ناهمسانگرد	بستر با ویژگی خطی همسانگرد	پاسخ‌های بحرانی
۰/۶۰۷ (۲/۹-٪)	۰/۶۲۵	۰/۵۲۵ (۳/۵-٪)	۰/۵۴۴	δ_{surface} (mm)
۲۴۴ (۵/۸-٪)	۲۵۹	۲۶۵ (۱/۱۳+٪)	۲۶۲	ϵ_h (μE)
۱۰۶۰ (۲۱/۸+٪)	۸۷۰	۹۹۰ (۱۹/۳+٪)	۸۳۰	ϵ_v (μE)

*درصد‌های درج شده در جدول بیانگر میزان تغییرات هر پارامتر نسبت به حالت خطی و همسانگرد است.



شکل ۲۶ مقایسه فرض مدول غیر خطی ناهمسانگرد در لایه‌های غیر آسفالتی با استفاده از منحنی‌های افت‌وخیز - زمان در دمای ۲۰ °C



شکل ۲۷ مقایسه فرض مدول غیر خطی ناهمسانگرد در لایه‌های غیر آسفالتی با استفاده از منحنی‌های افت‌وخیز - زمان در دمای ۴۵ °C

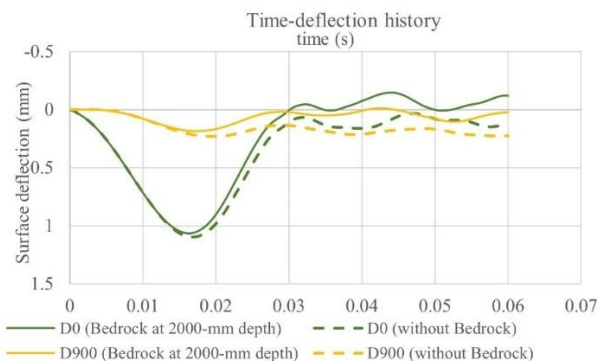
اما از این نقطه به بعد، تأثیر سنگ بستر کاهش می‌یابد و رفتار روسازی به حالت نیم‌فضای بی‌نهایت (Infinite half-space) نزدیک می‌شود. این روند با مشاهدات گزارش شده در مطالعات پیشین قابل مقایسه است؛ به طوری که در برخی منابع، عمق‌های بیش از ۵ متر به عنوان محدوده‌ای با تأثیر ناچیز سنگ بستر بر پاسخ‌های افت‌وخیز معرفی شده‌اند [۳۲]، در حالی که در مطالعات دیگر، این آستانه تا حدود ۸ یا حتی ۱۲ متر نیز گزارش شده است [39,48]. می‌توان گفت چنین تفاوت‌هایی در آستانه تأثیرگذاری، ناشی از عواملی مانند شرایط مرزی، نوع مصالح، و ضخامت لایه‌های روسازی است که نقش تعیین‌کننده‌ای در پاسخ دینامیکی سیستم دارند. همچنین مطالعات نشان داده است که نادیده گرفتن سنگ بستر در فرایند تحلیل می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجه در محاسبه مدول‌های سازه‌ای شود، به ویژه در شرایطی که این لایه در نزدیکی سطح قرار دارد [49].

تأثیر حضور و عمق قرارگیری لایه سخت (سنگ بستر)
بر اساس تاریخچه‌های افت‌وخیز - زمان D0 و D900 در شکل (۲۸) تأثیر حضور لایه سخت در زیر بستر راه نشان داده شده است. مطابق با تحلیل‌های انجام شده وجود لایه سخت در زیر بستر روسازی مقادیر D0 و D900 را کاهش می‌دهد. وجود این لایه همچنین می‌تواند بر دامنه و زمان‌بندی افت‌وخیز تأثیرگذار باشد. در نمودارهای مربوط به نقاط D0 و D900 مشاهده می‌شود که وجود سنگ بستر در عمق ۲ متر در مقایسه با حالت عدم وجود آن، موجب کاهش مقدار خیز و تسریع در رسیدن به بیشینه خیز شده است. این رفتار را می‌توان ناشی از بازتاب سریع‌تر موج‌های تنش در مرز سخت و افزایش سختی مؤثر سیستم دانست. در ادامه و در شکل‌های (۲۹) و (۳۰) بررسی حساسیت نسبت به عمق سنگ بستر نیز نشان می‌دهد که تا عمق حدود ۴ متر، تغییرات قابل توجهی در پاسخ خیز سطحی مشاهده می‌شود،

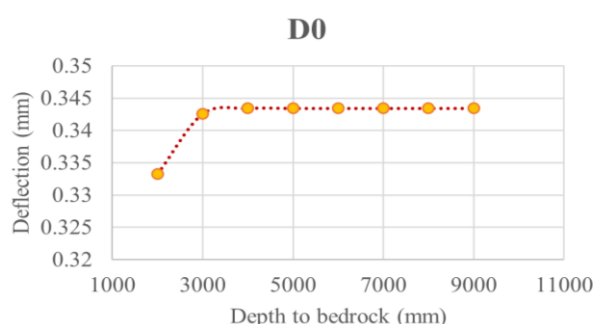
بحرانی روسازی تحت بارگذاری FWD را فراهم می‌سازد و نسبت به مطالعات پیشین، دیدگاه کامل‌تری از رفتار سازه‌ای روسازی ارائه می‌دهد. در این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود روسازی اهواز - شوش به ارزیابی تأثیر عوامل مختلف در شبیه‌سازی بر پاسخ‌های بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر تحت آزمون FWD پرداخته شد. بر همین اساس نتایج زیر ارائه می‌شود:

۱. مقادیر خیز در تحلیل دینامیکی در مقایسه با تحلیل استاتیکی افزایش قابل توجهی داشت. این امر در دماهای بالاتر بیشتر بود و مقادیر بیشینه شاخص‌های D0 و D900 به ترتیب ۲۷/۵ و ۴۴ درصد در دمای ۴۰ درجه افزایش یافتند. همچنین در تحلیل دینامیکی به دلیل ماهیت گذرای بارگذاری FWD و تأثیر همزمان عوامل مکانیکی از جمله رفتار ویسکوالاستیک، انتشار موج‌های تنش و میرایی مصالح، پاسخ روسازی با وقفه زمانی همراه بود. مشاهده خیز منفی در نمودارهای دینامیکی نیز بیانگر اثر نیروهای اینرسی و توانایی مصالح در بازیابی تغییر شکل و اتلاف انرژی است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تحلیل دینامیکی، با لحاظ کردن وابستگی زمانی بارگذاری و رفتار گذرای مصالح، امکان ارزیابی دقیق‌تری از عملکرد سازه‌ای روسازی فراهم می‌کند.

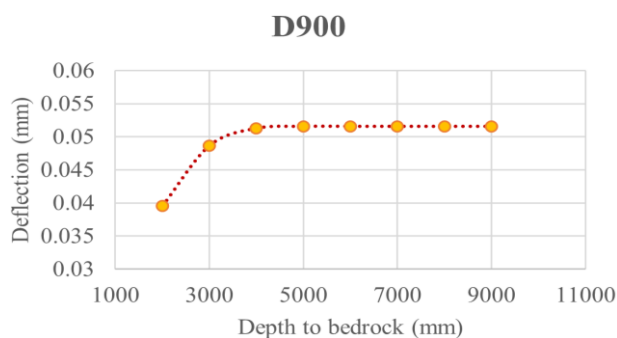
۲. بررسی اثر رفتار ویسکوالاستیک در لایه آسفالتی نشان داد که لحاظ کردن این ویژگی موجب افزایش خیز در مرکز بارگذاری (D0) و تطابق بهتر با داده‌های FWD می‌شود. در مدل‌هایی که آسفالت به صورت الاستیک خطی فرض شده بود، توانایی جذب و اتلاف انرژی کاهش یافت و بخش عمده‌ای از تنش به لایه‌های زیرین منتقل شد. این انتقال تنش موجب سخت‌شوندگی موضعی در مصالح دانه‌ای لایه اساس و در نهایت کاهش خیز کل روسازی گردید. در مقابل، مدل ویسکوالاستیک بخشی از انرژی وارد شده را در خود مستهلک کرد و از انتقال مستقیم تنش جلوگیری نمود، که نتیجه آن افزایش خیز در D0 و کاهش سختی موضعی در لایه‌های زیرین بود. مقادیر بیشینه D0 در مدل معیار سنجش ۲۱ و ۲۷ درصد افزایش را نسبت به مقادیر مشابه آن در حالت فرض آسفالت الاستیک نشان داد. همچنین، در مدل‌هایی که هیچ یک از ویژگی‌های ویسکوالاستیسیته و رفتار غیر خطی لحاظ نشده بود، ظرفیت جذب انرژی به طور محسوسی کاهش یافت و



شکل ۲۸ تأثیر وجود لایه سخت در زیر بستر راه بر تاریخچه افت و خیز - زمان D0 و D900



شکل ۲۹ تأثیر عمق قرارگیری بستر سخت بر خیز D0 روسازی تحت بار FWD



شکل ۳۰ تأثیر عمق قرارگیری بستر سخت بر خیز D900 روسازی تحت بار FWD

یافته‌ها و نتیجه‌گیری

این پژوهش یک چارچوب مدل‌سازی جامع برای تحلیل عملکرد روسازی انعطاف‌پذیر تحت بار FWD ارائه می‌دهد که به صورت همزمان اثر تحلیل دینامیکی، رفتار ویسکوالاستیک لایه آسفالتی، ناهمسانگردی مصالح سنگدانه‌ای، رفتار غیر خطی مدول برجهندگی مصالح غیر آسفالتی و موقعیت سنگ بستر را در مدل در نظر می‌گیرد. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق‌تر پاسخ‌های

۵. تحلیل‌های دینامیکی نشان دادند که قرارگیری سنگ بستر در عمق کمتر از ۴ متر می‌تواند موجب بروز خطا در پیش‌بینی افت‌وخیز روسازی گردد. این خطا در نقاط دورتر از مرکز بارگذاری، که به عنوان شاخص عملکرد بستر روسازی محسوب می‌شوند، از اهمیت بیشتری برخوردار است. بنابراین، لحاظ کردن موقعیت سنگ بستر در مدل‌سازی عددی، به ویژه در عمق‌های کم، برای دستیابی به تحلیل دقیق عملکرد سازه‌ای روسازی ضروری است.

واژه‌نامه

Deflection	خیز
Falling Weight Deflectometer (FWD)	افت‌وخیزسنج ضربه‌ای
Nonlinear	غیر خطی
Cross-anisotropic (or transversely isotropic)	ناهمسانگرد متقاطع (یا همسانگرد عرضی)
Elseifi et al.	السیفی و همکاران
Nega et al.	نگا و همکاران
Bedrock	سنگ بستر
Finite element (FE)	اجزای محدود
Root Mean Square Error (RMSE)	خطای جذر میانگین مربعات
Percentage of Root Mean Square Error (PRMSE)	درصد خطای جذر میانگین مربعات
Witczak Model	مدل ویتزاک
Creep compliance	نرمی خزشی
Park & Schapery	پارک و شاپری
Resilient modulus	مدول برجهندگی
Applied Research Associates	ARA
Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)	راهنمای طراحی مکانیکی - تجربی روسازی
Rao et al.	رائو و همکاران
Yau & Quintus	یائو و کویتوس
Xiao and Tutumluer	ژیائو و توتوملوئر
Stiff layer (Bedrock)	لایه سخت (سنگ بستر)

پاسخ دینامیکی سیستم به صورت نوسانی و بیشتر از مقدار واقعی ظاهر شد. به گونه‌ای که مدل معیار سنجش ۷ و ۹ درصد کاهش را در مقادیر D_0 نسبت به مدلی با ویژگی الاستیک خطی در تمامی لایه‌ها و به ترتیب در دماهای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد نشان داد و در حالت مشابه مقادیر D_{900} با ۳۰ و ۲۶ درصد کاهش روبه‌رو شد. یافته‌ها تأکید می‌کند که در نظر گرفتن رفتار ویسکوالاستیک برای دستیابی به تحلیل دقیق و واقع‌گرایانه از عملکرد روسازی ضروری است.

۳. ویژگی همسانگردی عرضی، به عنوان یکی از مشخصه‌های رفتاری مصالح سنگدانه‌ای در لایه‌های روسازی، می‌تواند موجب افزایش پاسخ‌های بحرانی سازه روسازی نسبت به حالت همسانگرد شود. نتایج تحلیل‌های عددی نشان دادند که در نظر گرفتن این ویژگی تا ۱۵ درصد باعث افزایش میزان افت‌وخیز سطحی در مقایسه با فرض همسانگردی می‌شود. همچنین، در مدل‌های ناهمسانگرد، مقادیر کرنش کششی افقی در زیر لایه آسفالتی و کرنش فشاری قائم در بالای بستر، در هر دو دمای بررسی شده، به ترتیب ۵۲ تا ۵۹ درصد و ۷۴ تا ۷۷ درصد بیشتر از مقادیر متناظر در حالت همسانگرد به دست آمد. این افزایش کرنش‌ها منجر به کاهش عمر خستگی پیش‌بینی شده و افزایش عمق شیارشدگی در مدل ناهمسانگرد نسبت به مدل همسانگرد می‌شود.

۴. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن رفتار غیر خطی برای مدول برجهندگی مصالح سنگدانه‌ای، تأثیر قابل توجهی بر پیش‌بینی میزان افت‌وخیز روسازی دارد و این پیش‌بینی‌ها با نتایج حاصل از فرض خطی بودن مدول تفاوت دارد. بنابراین، لحاظ کردن این ویژگی در فرایند شبیه‌سازی و تفسیر نتایج آزمون FWD از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، زمانی که لایه اساس به صورت ماده‌ای با رفتار غیر خطی و ناهمسانگرد مدل‌سازی شد، مقادیر δ_{surface} و ϵ_h به ترتیب بین ۳۳ تا ۳۷ درصد و ۳۲ تا ۵۲ درصد کمتر، و مقدار ϵ_v بین ۸۰ تا ۹۴ درصد بیشتر از حالتی بود که اساس به صورت ماده‌ای خطی و همسانگرد در نظر گرفته شده بود. بررسی‌های مشابه برای لایه بستر نیز نشان داد که δ_{surface} تا ۳۰ درصد کاهش و ϵ_h تا ۵۸ درصد تغییر داشته، در حالی که ϵ_v در این حالت حدود ۱۹ تا ۲۲ درصد افزایش یافته است.

Implicit	ضمنی	Li & Wang	لی و ونگ
Explicit	صریح	You et al.	یو و همکاران
Deflection bowl/basin	حوضچه خیز	Amplification	تشدید
Instantaneous elastic modulus	مدول الاستیسیته لحظه‌ای	Duncan et al.	دانکن و همکاران
Time lag	وقفه زمانی		CAX4R
Infinite half-space	نیم‌فضای بی‌نهایت	4-node bilinear, reduced integration with hourglass control	
	سپاسگزاری	4-node bilinear	CAX4
		Tie-contact	اتصال گرهی

مراجع

- [1] M. Nasimifar and M. Shojaei, "Evaluation of vehicle speed effect on continuous pavement surface deflection measurements," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 15, no. 1, pp. 184–195, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00017-1>
- [2] M. A. Elseifi and Z. U. A. Zihan, "Assessment of the traffic speed deflectometer in Louisiana for pavement structural evaluation," Louisiana Transportation Research Center, 2018.
- [3] M. Fakhri and R. S. Dezfoulan, "Pavement structural evaluation based on roughness and surface distress survey using neural network model," *Construction and Building Materials*, vol. 204, pp. 768–780, 2019.
- [4] Y. J. Chou, "Knowledge-based system for flexible pavement structural evaluation," *Journal of transportation engineering*, vol. 119, no. 3, pp. 450–466, 1993. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1993\)119:3\(450\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1993)119:3(450))
- [5] A. Ahmad, Z. U. Rehman, and A. H. Khan, "Developing Correlation Between Structural Parameter and Functional Parameter for Pavement Evaluation," *International Journal of Transportation Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 1667–1677, 2024.
- [6] V. Vyas, A. P. Singh, and A. Srivastava, "Prediction of asphalt pavement condition using FWD deflection basin parameters and artificial neural networks," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, no. 12, pp. 2748–2766, 2021. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1797855>
- [7] FHWA, "Pavement Structural Evaluation at the Network Level," Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, p. 286, 2016.
- [8] A. Kavussi and N. Solatifar, "Analysis of the Results of FWD Back-Calculation Simulations in Asphalt Pavements," The 1st National Conference on Transportation Infrastructure. Tehran, 1392. (In Persian)
- [9] K. Gkyrtis, "Pavement Analysis with the Consideration of Unbound Granular Material Nonlinearity," *Designs*, vol. 7, no. 6, p. 142, 2023. <https://doi.org/10.3390/designs7060142>
- [10] A. Adu-Osei, D. N. Little, and R. L. Lytton, "Cross-anisotropic characterization of unbound granular materials," *Transportation Research Record*, vol. 1757, no. 1, pp. 82–91, 2001. <https://doi.org/10.3141/1757-10>

- [11] A. Chabot, O. Chupin, L. Deloffre, and D. Duhamel, "Viscoroute 2.0 A: tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 11, no. 2, pp. 227–250, 2010. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690274>
- [12] K. Gkyrtis, C. Plati, and A. Loizos, "Mechanistic analysis of asphalt pavements in support of pavement preservation decision-making," *Infrastructures*, vol. 7, no. 5, p. 61, 2022. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7050061>
- [13] M. A. Elseifi, I. L. Al-Qadi, and P. J. Yoo, "Viscoelastic Modeling and Field Validation of Flexible Pavements," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 132, no. 2, pp. 172–178, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2006\)132:2\(172\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2006)132:2(172))
- [14] H. Wang and I. L. Al-Qadi, "Importance of nonlinear anisotropic modeling of granular base for predicting maximum viscoelastic pavement responses under moving vehicular loading," *Journal of engineering mechanics*, vol. 139, no. 1, pp. 29–38, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000465](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000465)
- [15] R. A. Tarefder, M. U. Ahmed, M. R. Islam, and M. T. Rahman, "Finite Element Model of Pavement Response Under Load Considering Cross-Anisotropy in Unbound Layers," *Advances in Civil Engineering Materials*, vol. 3, no. 1, p. 20130102, 2014. <https://doi.org/10.1520/ACEM20130102>
- [16] A. Nega, D. Gedafa, and H. Nikraz, "Stress and Strain Characteristics in Flexible Pavement Using Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 17, no. 6, pp. 1498–1512, 2024. <https://doi.org/10.1007/s42947-024-00422-2>
- [17] B. Zhang, D. Wang, Y. Zhong, X. Li, H. Cai, and T. Wang, "Mechanical Analysis of Semi-Rigid Base Asphalt Pavement under the Influence of Groundwater with the Spectral Element Method," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 6, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14062375>
- [18] Y. Deng, Y. Zhang, X. Luo, and R. L. Lytton, "Development of equivalent stationary dynamic loads for moving vehicular loads using artificial intelligence-based finite element model updating," *Engineering with Computers*, vol. 38, no. 4, pp. 2955–2974, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01306-w>
- [19] T. Bai, Z. Cheng, X. Hu, L. Fuentes, and L. F. Walubita, "Viscoelastic modelling of an asphalt pavement based on actual tire-pavement contact pressure," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 22, no. 11, pp. 2458–2477, 2021. <https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1766545>
- [20] N. Solatifar, A. Kavussi, M. Abbasghorbani, and S. W. Katicha, "Development of dynamic modulus master curves of in-service asphalt layers using MEPDG models," *Road Materials and Pavement Design*, vol. 20, no. 1, pp. 225–243, 2019. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1380688>
- [21] M. Li, "Pavement response analysis and modulus back-calculation for highway and airfield flexible pavements," PhD dissertation Rutgers University-School of Graduate Studies, 2017. <https://doi.org/doi:10.7282/T30K2CP7>
- [22] Q. Zhang, J. Zhao, and S. Guo, "Asphalt Rheological Properties Transformation from Frequency Domain to Temperature Domain Based on WLF Equation," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 167–175, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42947-021-00123-0>

- [23] S. W. Park and R. A. Schapery, "Methods of interconversion between linear viscoelastic material functions. Part I - A numerical method based on Prony series," *International journal of solids and structures*, vol. 36, no. 11, pp. 1653–1675, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(98\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00055-9)
- [24] American Association of State Highway and Transportation Officials, "Mechanistic-empirical pavement design guide : A manual of practice (3rd ed.). Washington, DC: AASHTO.,” 2020.
- [25] Y. Yao, J. Qian, J. Li, A. Zhang, and J. Peng, "Calculation and Control Methods for Equivalent Resilient Modulus of Subgrade Based on Nonuniform Distribution of Stress," vol. 2019, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6809510>
- [26] C. Olidis and D. Hein, "Guide for the mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures materials characterization," TAC/ATC 2004 - 2004 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada: Transportation Innovation - Accelerating the Pace, 2004.
- [27] B. Ghadimi, H. Nikraz, C. Leek, and A. Nega, "A Comparison between Effects of Linear and Non-linear Mechanistic Behaviour of Materials on the Layered Flexible Pavement Response," *Advanced Materials Research*, vol. 723, pp. 12–21, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.723.12>
- [28] C. Rao *et al.*, "Estimation of key PCC, base, subbase, and pavement engineering properties from routine tests and physical characteristics,," Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, p. 214, 2012.
- [29] A. Yau and H. L. Von Quintus, "Study of LTPP Laboratory Resilient Modulus Test Data and Response Characteristics : Final Report," 2002.
- [30] Y. Xiao and E. Tutumluer, "Best Value Granular Material for Road Foundations," p. 167, 2012.
- [31] Y. Xiao, E. Tutumluer, and J. Siekmeier, "Mechanistic–Empirical Evaluation of Aggregate Base and Granular Subbase Quality Affecting Flexible Pavement Performance in Minnesota." *Transportation research record*, vol. 2227, no. 1, 2011. <https://doi.org/10.3141/2227-11>
- [32] B. Michel, "Assessment of flexible airfield pavements using Heavy Weight Deflectometers. Development of a FEM dynamical time-domain analysis for the backcalculation of structural properties," Doctoral dissertation, Ecole des Ponts ParisTech, 2011.
- [33] M. Li and H. Wang, "Development of ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD testing with viscoelastic and nonlinear parameters," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 490–498, 2017. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1309197>
- [34] K. D. Hjelmstad and E. Taciroglu, "Analysis and Implementation of Resilient Modulus Models for Granular Solids," *Journal of engineering mechanics*, vol. 126, no. 8, pp. 821–830, 2000. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:8\(821\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:8(821))
- [35] L. You *et al.*, "Dynamic Viscoelastic Response of Asphalt Pavement With Random Transversely Isotropic Base Courses," *Transportation Research Record*, vol. 2677, no. 8, pp. 37–53, 2023. <https://doi.org/10.1177/03611981231155417>

- [36] M. U. Ahmed, R. A. Tarefder, and M. R. Islam, "Effect of cross-anisotropy of hot-mix asphalt modulus on falling weight deflections and embedded sensor stress-strain," *Transportation research record*, vol. 2369, pp. 20–29, 2013. <https://doi.org/10.3141/2369-03>
- [37] R. A. Tarefder, M. U. Ahmed, and A. Rahman, "Effects of cross-anisotropy and stress-dependency of pavement layers on pavement responses under dynamic truck loading," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, no. 3, pp. 366–377, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.01.001>
- [38] J. M. Duncan, C. L. Monismith, and E. L. Wilson, "Finite Element Analyses of Pavements," *Highway Research Record*, vol. 15, pp. 18–33, 1968.
- [39] M. Li, H. Wang, G. Xu, and P. Xie, "Finite element modeling and parametric analysis of viscoelastic and nonlinear pavement responses under dynamic FWD loading," *Construction and Building Materials*, vol. 141, no. March, pp. 23–35, 2017.
- [40] P. Praveen Kumar, B. V. Kiran Kumar, S. Manjunatha, and K. G. Subramanya, "Finite Element Modeling by ABAQUS for Rutting in Flexible Pavement," *surfaces*, vol. 23, p. 24, 2024. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120323>
- [41] M. Li and H. Wang, "Final report Final report: Nondestructive Evaluation of Pavement Structural Condition for Rehabilitation Design," 2016.
- [42] H. S. Lee, "Viscowave - A new solution for viscoelastic wave propagation of layered structures subjected to an impact load." pp. 542-557, 2013.
- [43] K. Chatti, Y. Ji, and R. Harichandran, "Dynamic time domain backcalculation of layer moduli, damping, and thicknesses in flexible pavements," *Transportation research record*, no. 1869, pp. 106–116, 2004. <https://doi.org/10.3141/1869-13>
- [44] B. Definitions, "Mechanical Behavior of Time-Dependent , Viscoelastic , Materials," 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-56517-5_2
- [45] F. Gu, X. Luo, Y. Zhang, R. Lytton, and H. Sahin, "Modeling of unsaturated granular materials in flexible pavements," *E3S Web Conference*, vol. 9, 2016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20160920002>
- [46] H. Wang, A. M. Asce, I. L. Al-qadi, and D. M. Asce, "Importance of Nonlinear Anisotropic Modeling of Granular Base for Predicting Maximum Viscoelastic Pavement Responses under Moving Vehicular Loading," pp. 29–38, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000465](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000465)
- [47] N. Kazemi, M. Saleh, and C. L. Lee, "Effect of nonlinear stress-dependency and cross-anisotropy on the backcalculation outputs from the TSD deflection slopes and the effect on estimated pavement performance," *International Journal of Pavement Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 1–17, 2024. <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2417967>
- [48] L. M. Pierce, K. D. Smith, J. E. Bruinsma, and N. Sivanesarwan, "Using Falling Weight Deflectometer Data with Mechanistic-Empirical Design and Analysis, Volume III: Guidelines for Deflection Testing, Analysis, and

Interpretation,” *ASTM International*, vol. 1555 STP, no. December, pp. 205–218, 2017.
<https://doi.org/10.1520/STP104445>

- [49] Q. Sun, Y. Zhao, Y. Wang, R. Wang, and B. Li, “Bedrock Identification and Bedrock Depth Prediction in Asphalt Pavements Using Pavement System Transfer Function,” *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 44, no. 1, 2025.
<https://doi.org/10.1007/s10921-025-01159-z>