

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

فرزانه قدیانی نژاد رزکی^۱، محمدرضا خانمحمدی^۲، مهدی شجاعی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، farzaneh.ghadyani1595@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، mkhanmohammadi@iut.ac.ir

^۳ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران، mahdishojae83@gmail.com

* نویسنده مسئول: محمدرضا خانمحمدی

چکیده

ارزیابی دقیق عملکرد سازه‌ای 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 به‌صورت 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 به‌کار گرفته شد و پس از اعتبارسنجی، تأثیر عواملی نظیر تحلیل دینامیکی، ویژگی ویسکوالاستیسیته لایه آسفالتی، ویژگی ناهمسانگردی و غیرخطی بودن مصالح غیرآسفالتی و حضور سنگ بستر بررسی شد. جهت لحاظ کردن خواص غیرخطی 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 نمود 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 غیرخطی 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.

کلمات کلیدی: افت‌وخیزسنج ضربه‌ای، تحلیل دینامیکی روسازی آسفالتی، ویسکوالاستیسیته، تحلیل غیرخطی، همسانگردی عرضی

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

Farzaneh Ghadyani Nezhad Razaki¹, Mohammadreza Khanmohammadi², Mahdi Shojaei³

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

farzaneh.ghadyani1595@gmail.com

² Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran;

mkhanmohammadi@iut.ac.ir

³ M.Sc., Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran; mahdishojae83@gmail.com

* Corresponding author: Mohammadreza Khanmohammadi

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.

Keywords: Falling Weight Deflectometer (FWD), dynamic analysis of flexible pavement, viscoelasticity, non-linear analysis, transversely isotropic

۱- مقدمه و بیان مسئله

نگهداری روسازی راه‌ها 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 کفایت 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 فرآیند تصمیم‌گیری را برای انتخاب راهکار بهینه‌ی نگهداری روسازی تسهیل می‌کند. علاوه بر این، تشخیص زودهنگام خرابی‌های سازه‌ای از طریق این ارزیابی، می‌تواند از تحمیل هزینه‌های هنگفت ناشی از بازسازی‌های گسترده جلوگیری نماید [۱]–[۵].

شناسایی شرایط واقعی لایه‌های مختلف روسازی یکی از مهم‌ترین بخش‌های این ارزیابی است که عموماً با استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب و استفاده از مکانیزم اندازه‌گیری خیز روسازی صورت می‌گیرد. امروزه، تجهیزات آزمون غیرمخرب مختلفی برای اندازه‌گیری خیز^۱ روسازی معرفی شده است که در میان آن‌ها، آزمایش افت‌وخیزسنج ضربه‌ای^۲ 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 فرآیندهای تکراری است که در آن پاسخ‌های تئوریک با مقادیر اندازه‌گیری‌شده مقایسه و همگرا می‌شوند [۶]–[۸]. 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 لایه‌ی 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 غیرخطی^۳ و وابسته به تنش است. علاوه بر آن، به دلیل جهت‌گیری دانه‌ها و عملیات تراکم، سختی آن‌ها در راستای قائم با راستای افقی متفاوت بوده و ناهمسانگرد متقاطع (یا همسانگرد عرضی)^۴ 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 [۹]–[۱۲].

در همین راستا، السیفی و همکاران^۵ 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

^۱ Deflection

^۲ Falling Weight Deflectometer (FWD)

^۳ Nonlinear

^۴ Cross-anisotropic (or transversely isotropic)

^۵ Elseifi et al.

پاسخ‌های روسازی را با میانگین خطای کمتر از ۱۵ درصد نسبت به اندازه‌گیری‌های میدانی پیش‌بینی می‌کند [۱۳]. در مطالعه دیگر، محققین نشان دادند که اعمال مشخصات ویسکوالاستیک در تحلیل روسازی کافی نیست، بلکه باید لایه‌ی اساس دانه‌ای هم به طور صحیح مدل شود. نتایج نشان داد که استفاده از مدل غیرخطی ناهمسانگرد در مقایسه با مدل خطی همسانگرد موجب تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌های بحرانی روسازی می‌شود. به طور مشخص، استفاده از مدل غیرخطی 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 داد که در دماهای بالاتر (۴۷°C) و بارگذاری‌های سنگین‌تر، تأثیر مدل‌سازی غیرخطی و ناهمسانگرد بر افزایش مقادیر پاسخ‌ها برجسته‌تر می‌شود [۱۴]. در مطالعه‌ای مشابه، پژوهشگران، ضمن در نظر گرفتن لایه آسفالت به‌عنوان یک ماده ویسکوالاستیک و لایه اساس به صورت غیرخطی، 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، به‌ویژه در لایه اساس و زیراساس، به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر همسانگردی عرضی قرار دارند، در حالی که کرنش‌های عمودی در لایه آسفالت تغییرات کمتری نشان می‌دهند [۱۵].

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^۱، تحلیل اجزای محدود سه‌بعدی روسازی انعطاف‌پذیر تحت بارگذاری دینامیکی همراه با مدل‌سازی ویسکوالاستیک غیرخطی به‌کار گرفته شده و پاسخ‌های تنش و کرنش مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ با این حال، رفتار ناهمسانگردی متقاطع در لایه‌های غیرآسفالتی لحاظ نشده است [۱۶]. 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 غیرخطی و ناهمسانگردی عرضی در هیچ‌یک از لایه‌ها مدنظر قرار نگرفته‌اند [۱۷]. همچنین در مقاله‌ای از دنگ و همکاران، 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 به‌صورت ویسکوالاستیک تعریف شده و لایه‌های زیرین شامل اساس، زیراساس و بستر به‌صورت مصالح خطی و همسانگرد در نظر گرفته شده‌اند. در این مطالعه نیز ناهمسانگردی عرضی، رفتار غیرخطی در لایه‌های غیرآسفالتی و حضور سنگ بستر^۲ نادیده گرفته شده‌اند [۱۸]. در پژوهشی دیگر، مدل‌سازی سه‌بعدی روسازی آسفالتی با استفاده از تحلیل اجزای محدود و اعمال فشار تماس واقعی بین تایلر و سطح روسازی صورت گرفته است. در این مدل نیز تنها لایه آسفالت دارای رفتار ویسکوالاستیک بوده و سایر لایه‌ها به‌صورت مصالح خطی و همسانگرد مدل شده‌اند [۱۹].

با توجه به مطالعات بررسی شده، هم‌چنان ضرورت مدل‌سازی دقیق رفتار لایه‌های روسازی، به عنوان یک نیاز مهم برای ارزیابی روسازی‌ها، واضح می‌باشد. هدف این پژوهش از یک سو، توسعه مدل اجزای محدود^۳ به منظور شبیه‌سازی دقیق پاسخ روسازی محور اهواز - شوش در استان خوزستان در برابر بارگذاری دستگاه FWD است. در این راستا با تأکید بر بازنمایی واقع‌گرایانه شرایط مرزی

^۱ Nega et al.

^۳ Finite element (FE)

^۲ Bedrock

و پیچیدگی‌های رفتاری مصالح، سعی بر آن شد تا مدل پیشنهادی اثرات رفتار ویسکوالاستیک مخلوط آسفالتی، خاصیت غیرخطی و همسانگرد عرضی مصالح دانه‌ای، تحلیل دینامیکی و عمق سنگ بستر را در نظر بگیرد. از سوی دیگر، این پژوهش با بهره‌گیری از مدل توسعه‌یافته، به دنبال انجام تحلیل حساسیت به منظور شناسایی و ارزیابی پارامترهای مؤثر بر عملکرد سازه‌ای روسازی می‌باشد. در بخش‌های آتی ابتدا مشخصات محور مطالعه تشریح می‌شود و در ادامه، مراحل مدل‌سازی عددی ارائه می‌گردد. پس از اعتبارسنجی مدل با داده‌های میدانی و اطمینان از دقت نتایج حاصل شده، نتایج تحلیل حساسیت و تفسیر آن‌ها با هدف ارائه بینش‌های کاربردی برای طراحی و نگهداری روسازی گزارش شده، ارائه می‌شود.

۲- 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. جهت مدل‌سازی این روسازی در شرایط آزمایش FWD، از نتایج مطالعات صولتی‌فر و همکاران استفاده شد [۲۰]. 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 [۲۰]

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

جدول ۲- خواص حجمی مخلوط آسفالتی و پارامترهای ویسکوزیته قیر [۲۰]

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	۷/۰.۸۱۶	-۲/۲۴۱۸

جدول ۳- مدول الاستیسیته محاسبه شده لایه‌ها از طریق آزمایش FWD [۲۰]

مدول محاسبه معکوس شده (MPa)			
آسفالت	اساس	بستر	
۶۹۹۸		۳۰ °C	
۶۱۱۲	۲۲۵	۳۵ °C	
۵۲۲۵		۴۰ °C	
		۱۲۰	

۴۳۳۸	۴۵ °C
۳۴۵۱	۵۰ °C
۲۵۶۴	۵۵ °C



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

۳- 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 [۲۱]. 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 بوده 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^۱ و درصد خطای جذر میانگین مربعات^۲ که در روابط ۱ و ۲ ارائه شده‌اند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. گفتنی است RMSE با واحد کمیت بررسی شده بیان می‌شود؛ PRMSE به صورت درصدی گزارش می‌گردد. در این بخش پس از بیان خواص مصالح روسازی به عنوان یکی از اجزای اصلی مدل سازی، به جزئیات ساخت مدل پرداخته می‌شود.

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

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

x_i : مقدار اندازه گیری شده x'_i : مقدار پیش بینی N : تعداد داده های لحاظ شده در محاسبه خطا

۳-۱- خواص مصالح لایه آسفالتی

آسفالت به عنوان یک ماده ویسکوالاستیک شناخته می‌شود و رفتار آن به شدت به زمان (یا فرکانس) بارگذاری و دما وابسته است [۲۲]. برای در نظر گرفتن ویژگی ویسکوالاستیک لایه آسفالتی، ابتدا با استفاده از مدل ویتزاک^۳ مدول دینامیکی اولیه لایه آسفالتی در فرکانس بارگذاری و دمای آزمون FWD محاسبه می‌شود. 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 می‌گیرد. سپس منحنی مدول دینامیکی اولیه لایه آسفالتی به نحوی تعدیل می‌شود 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 شرح داده شده است [۱]. جهت استفاده از مدول نهایی تعدیل شده در تحلیل های ویسکوالاستیک، لازم است این مدول به نرمی خزشی^۴ متناظر تبدیل شود. این تبدیل از طریق روش عددی ارائه شده توسط پارک و شیپری^۵ 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 [۲۳]. شکل ۲ نمونه ای از نمودار نرمی خزشی به دست آمده از لایه آسفالتی روسازی انعطاف پذیر محور اهواز - شوش در دمای ۳۰ °C را نشان می‌دهد.

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

$|E^*|$: 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

^۱ Root Mean Square Error (RMSE)

^۲ Percentage of Root Mean Square Error (PRMSE)

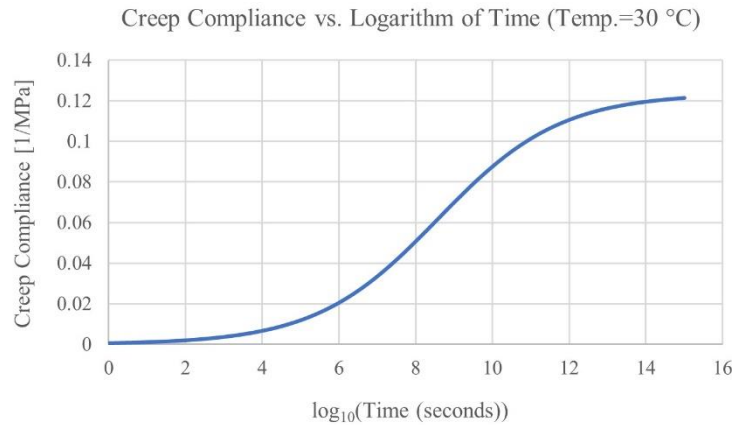
^۳ Witczak Model

^۴ Creep compliance

^۵ Park & Schapery

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 V_{beff} : درصد حجمی مقدار قیر مؤثر



شکل-۲- نمودار نرمی خزشی بر حسب لگاریتم زمان

۲-۳- خواص مصالح لایه‌های غیر آسفالتی

برای درک رفتار مصالح غیرآسفالتی ابتدا باید به ویژگی غیرخطی بودن آن‌ها توجه کرد. خاک بستر و لایه‌های اساس یا زیراساس تحت بارهای تکراری رفتار غیرخطی نشان می‌دهند، به این معنا که پاسخ مکانیکی آن‌ها با مدول برجهندگی^۱ وابسته به تنش توصیف می‌شود. لذا برای تحلیل دقیق‌تر روسازی بهتر است اثر مدول غیرخطی مصالح در نظر گرفته شود. در این مطالعه با استفاده از زیرروال UMAT مدول غیرخطی وابسته به تنش بر اساس مدل ARA^۲ برنامه‌نویسی شد؛ مدلی که به عنوان راهنمای طراحی مکانیکی - تجربی روسازی^۳ [۲۴] نیز شناخته می‌شود و رابطه ۴ مبنای پیاده‌سازی آن می‌باشد [۲۵]، [۲۶]. مدل ساختاری ARA از قابلیت بالایی در شبیه‌سازی رفتارهای مصالح روسازی برخوردار است؛ به گونه‌ای که هم توانایی بازتاب فرآیند سخت‌شوندگی مصالح سنگدانه‌ای لایه‌های اساس را دارد و هم قادر است نرم‌شوندگی خاک‌های ریزدانه در بستر را به‌دقت مدل‌سازی کند [۲۷]. نقطه قوت این معادله توانایی آن در اعمال نمودن وابستگی مدول برجهندگی به وضعیت تنش و نوع ماده است [۲۸].

$$M_r = k_1 P_a \left(\frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad (۴)$$

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, k_3 : ثابت‌های رگرسیون

در مطالعه‌ای از رائو و همکاران^۴، روابطی جهت پیش‌بینی ضرایب رگرسیون معادله ۴ ارائه شده است [۲۸]. هم‌چنین مشخصات فیزیکی مصالح که به عنوان متغیرهای ورودی در روابط محاسبه ضرایب رگرسیون مورد نیاز است، توسط یائو و کوینتوس^۵ گزارش

^۱ Resilient modulus

^۴ Rao et al.

^۲ Applied Research Associates

^۵ Yau & Quintus

^۳ Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)

شده‌اند [۲۹]. از سویی دیگر ژیاو و توتوملوئر^۱ 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 بنابر مطالعه ژیاو و توتوملوئر متناسب با کیفیت مصالح اختصاص داده شوند [۳۰]، [۳۱]. رویکرد مطالعاتی این پژوهش در تخمین مقادیر ضرایب رگرسیون مدول برجهندگی، بهره‌گیری از پژوهش‌های معرفی شده در این بخش می‌باشد. 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 ژیاو 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)^۲ در سه تراز مختلف صورت گرفته است. انتخاب این ترازا با هدف پوشش بازه‌ای از شرایط محتمل در پروژه‌های روسازی انجام شده است؛ به‌طوری‌که عمق ۳ متر نمایانگر حالت سنگ بستر کم‌عمق، ۴٫۵ متر به‌عنوان وضعیت میانی، و ۶ متر به‌عنوان آستانه‌ای در نظر گرفته شده که در برخی منابع، تأثیر سنگ بستر در آن آستانه به‌طور قابل توجهی در تحلیل روسازی کاهش می‌یابد [۳۲]. سرانجام لایه اساس با درجه کیفی پایین (Low) و بستر روسازی در حالت ماسه‌ای (Sand) به عنوان مصالح غیرآسفالتی با ویژگی مدول غیرخطی مبنای مدل‌سازی قرار گرفت. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالت SL و عمق ۳ متری قرارگیری سنگ بستر کمترین میزان خطا (۰/۱۷ میلی‌متر) به‌دست آمده است. بیان می‌شود در مطالعه‌ای از لی و ونگ^۳ نیز پارامترهای مصالح برای اساس و بستر از معادلات تجربی - آزمایشگاهی توسعه‌یافته که خواص فیزیکی مصالح غیرآسفالتی را به پارامترهای مدول غیرخطی مرتبط می‌کنند، به دست آمده‌اند [۳۳]. گفتنی است، مقدار خطای RMSE در شکل ۳ بر اساس مقایسه میان داده‌های افت‌وخیز روسازی تحت بار FWD معادل ۵۶۶ کیلوپاسکال و در دمای ۳۵ °C با نتایج مدل عددی است.

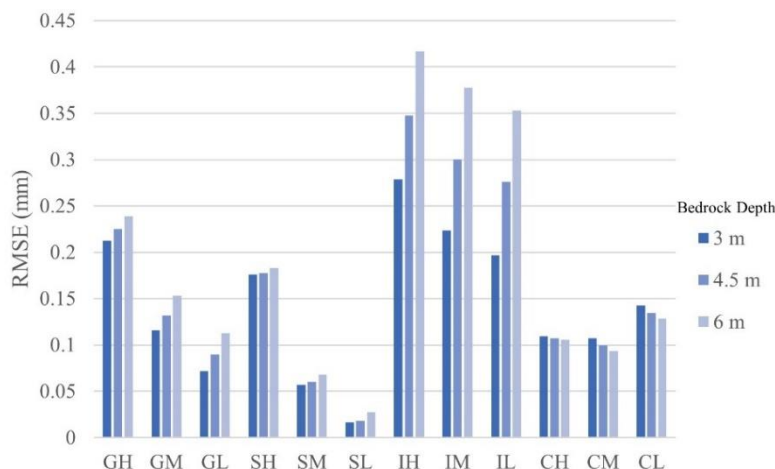
یکی دیگر از ویژگی‌های قابل توجه در مصالح غیرآسفالتی، همسانگردی عرضی آن‌هاست. بر اساس مطالعات انجام‌شده، سختی لایه‌های روسازی در راستای عمودی بیشتر از سختی آن‌ها در راستای افقی است [۳۴]. زیرا فرآیند روسازی راه‌ها شامل تراکم مصالح در راستای عمود است و همین امر منجر به خواص مکانیکی متفاوت در راستای عمودی و افقی می‌شود. این ویژگی با عنوان همسانگردی عرضی در لایه‌های روسازی شناخته می‌شود. به طور معمول، شاخص همسانگردی عرضی با نسبت مدول افقی به قائم (n) مشخص می‌شود. با توجه به نبود داده‌های آزمایشگاهی صریح برای تعیین پارامتر همسانگردی عرضی n در مصالح روسازی، انتخاب این پارامتر در مطالعات عددی معمولاً بر اساس ویژگی‌های فیزیکی مصالح، کیفیت ساخت، و انطباق با رفتار واقعی صورت می‌گیرد. در مدل‌های عددی معتبر نظیر مطالعه یو و همکاران^۴، مقدار n برای مصالح دانه‌ای برابر با ۰/۷۵ به کار گرفته شد [۳۵]. 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 محدوده‌ای قرار دارد که در مطالعات عددی مرتبط با مصالح دانه‌ای رایج بوده و منجر به پاسخ عددی پایدار در مدل‌سازی است [۳۶]، [۳۷].

^۱ Xiao and Tutumluer

^۲ Li & Wang

^۳ Stiff layer (Bedrock)

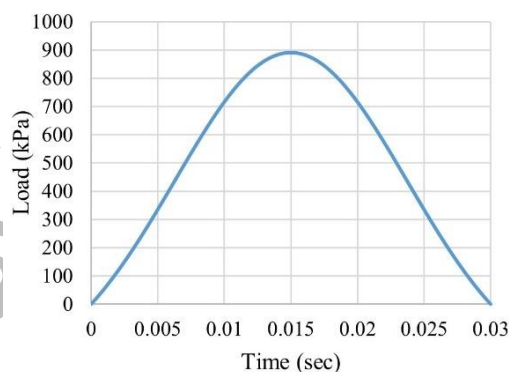
^۴ You et al.



شکل-۳-۲ RMSE در مقادیر مختلف از ضرایب رگرسیون اختصاص داده شده به بستر و اساس

۳-۳- ساختار مدل اجزای محدود

در این پژوهش روسازی محور مورد مطالعه تحت بار دستگاه FWD به صورت دوبعدی و تقارن محور شبیه‌سازی شد. مدل تقارن محور دوبعدی در مدل‌سازی آزمون FWD نتایجی مشابه مدل سه‌بعدی را با کارایی بالاتر ارائه می‌دهد [۱۸]. شکل ۴ نمونه‌ای از الگوی بارگذاری FWD در این مدل‌سازی برای بار ۸۹۰ کیلوپاسکال است. فرکانس مؤثر بارگذاری با توجه به دوره تناوب ۰/۰۳ ثانیه‌ای، برابر با حدود ۳۳/۳ هرتز است.

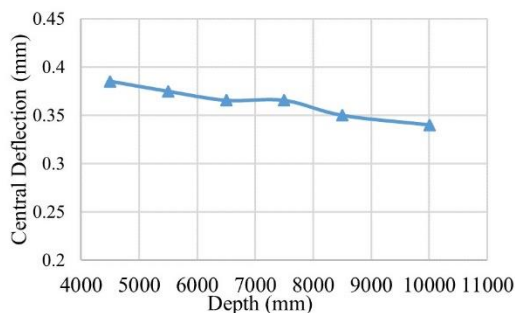


شکل-۴- الگوی دامنه نوسان بار ضربه‌ای آزمون FWD

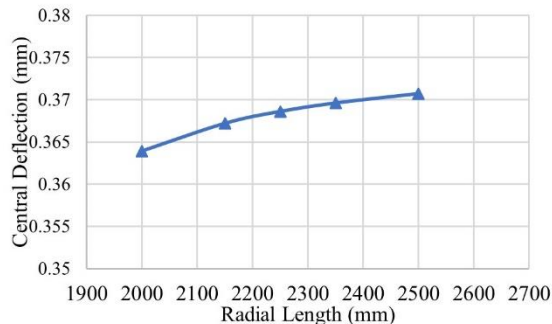
همچنین، تحلیل حساسیت نسبت به بیشینه خیز مرکزی و کناری برای تعیین شعاع و عمق مدل صورت گرفت. خیز بیشینه مرکزی بیانگر خیز در مرکز بارگذاری و خیز بیشینه کناری معادل با خیز در انتهای صفحه بارگذاری است. بنابر نمودارهای ۵ و ۷، طول شعاعی مدل از مقدار ۲ تا ۲/۵ متر تغییر کرده و مقادیر خیز بیشینه مرکزی و کناری ثبت شده است. معیار انتخاب ابعاد رسیدن به تغییرات خیز کمتر از ۵ درصد بوده 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 دغدغه‌های اصلی در تحلیل دینامیکی است. تشدید^۱ دینامیکی ممکن است در اثر انعکاس

^۱ Amplification

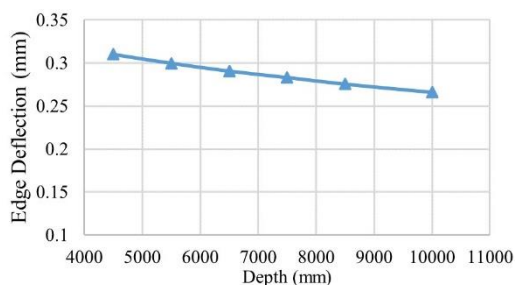
موج تنش، که ناشی از فاصله ناکافی تا این مرزهاست، رخ دهد. [۱۵]. برای اجتناب از احتمال وقوع این پدیده می‌توان مطابق پیشنهاد دانکن و همکاران^۱ عمق مدل را ۵۰ برابر شعاع بارگذاری، و طول شعاعی آن را ۱۲ برابر شعاع بارگذاری در نظر گرفت [۳۸]. در اینجا ابعاد مدل تقارن محور با شعاع ۲/۵ متر و عمق ۸ متر در جهت اطمینان تعیین شد.



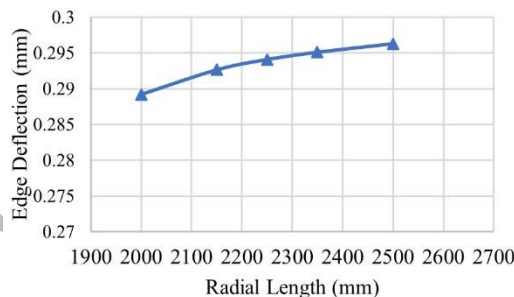
شکل-۶- مقدار خیز بیشینه مرکزی با تغییر در عمق مدل



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



شکل-۸- مقدار خیز بیشینه کناری با تغییر در عمق مدل



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

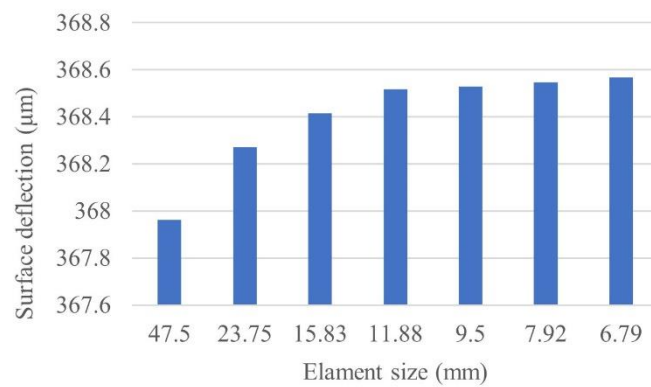
برای انتخاب سازه‌ی مش‌بندی نیز مطابق با شکل ۹، تغییرات خیز سطح روسازی در مقابل تغییر سازه‌ی مش مورد بررسی قرار گرفت و سازه‌ی مش ۹/۵ میلی‌متر انتخاب شد. زیرا مقادیر کوچکتر از آن عملاً تأثیری در خیز به دست آمده نداشته‌اند. بنابر شکل ۱۰ و ۱۱، مش‌بندی اجزای محدود در ناحیه‌ی بارگذاری دایره‌ای ریزتر و در نواحی 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 غیرخطی از خود نشان می‌دهند، از المان‌های CAX4R^۲ در حالی که در نواحی با مصالح خطی از المان‌های CAX4^۳ استفاده شده 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 مدنظر قرار گرفت. این موضوعی است که با ماهیت بارگذاری فشاری نیز سازگار است [۳۹]. بنابراین، مدل اجزای محدود از اتصال گره‌ای^۴ بهره می‌برد؛ روشی که اتصال کامل میان سطح را بدون لغزش یا جداسازی فراهم می‌سازد و برای شبیه‌سازی تعامل میان لایه‌های روسازی به کار گرفته می‌شود [۴۰]. 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.

^۱ Duncan et al.

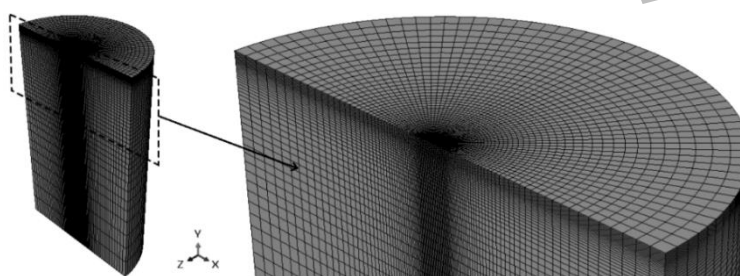
^۲ 4-node bilinear

^۳ 4-node bilinear, reduced integration with hourglass control

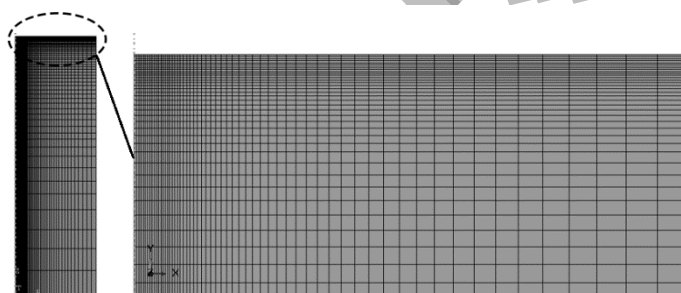
^۴ Tie-contact



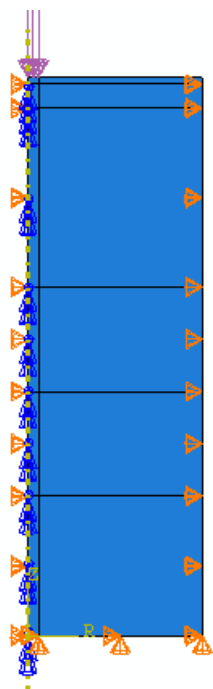
شکل-۹- تحلیل حساسیت مش



شکل-۱۰- ساختار سه بعدی مدل تقارن محور اجزای محدود روسازی



شکل-۱۱- ساختار دو بعدی مدل تقارن محور اجزای محدود روسازی



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

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 ضمنی^۱ و صریح^۲ 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 پایداری عددی این روش مشروط است. در مقابل الگوریتم ضمنی از پایداری عددی بی قید و شرط برخوردار است. این الگوریتم برای حل معادله از اطلاعات مربوط به وضعیت فعلی و آینده سیستم به طور هم زمان بهره می برد [۱۵]. 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 مدل سازی ارائه شده و با مقادیر اندازه گیری شده از آزمون FWD مورد مقایسه قرار می گیرد.

۳-۴- مقایسه نتایج مدل سازی و FWD

به منظور ارزیابی دقت شبیه سازی پاسخ دینامیکی روسازی، نتایج مربوط به حوضچه ی خیز^۳ محاسبه شده با داده های میدانی حاصل از آزمایش FWD از مطالعه ی صولتی فر و همکاران مقایسه شد. این مقایسه در چهار سطح بارگذاری شامل بارهای ۵۶۶، ۸۹۰، ۱۳۰۰ و ۱۹۷۰ کیلو پاسکال و در پنج دمای مختلف ۳۵، ۴۰، ۴۵، ۵۰ و ۵۵ درجه سانتی گراد (در مجموع ۲۰ حالت) صورت گرفت. گفتنی است دمای عمق میانی لایه آسفالتی به عنوان نماینده ی دمای کل لایه در نظر گرفته شده [۳۹] و مدول الاستیسیته لحظه ای^۴ لایه آسفالتی در مدل بنابر مطالعات گذشته، معادل مقدار مدول الاستیسیته محاسبه ی معکوس شده ی آن تحت آزمایش FWD در

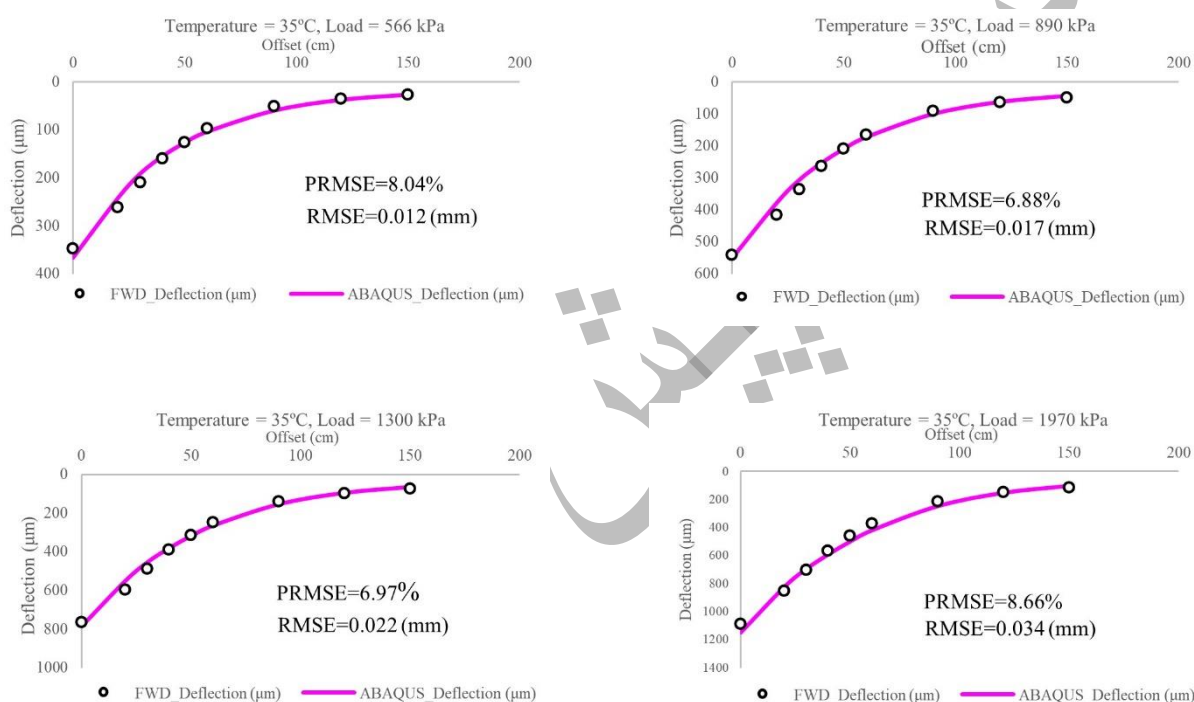
^۱ Implicit

^۲ Explicit

^۳ Deflection bowl/basin

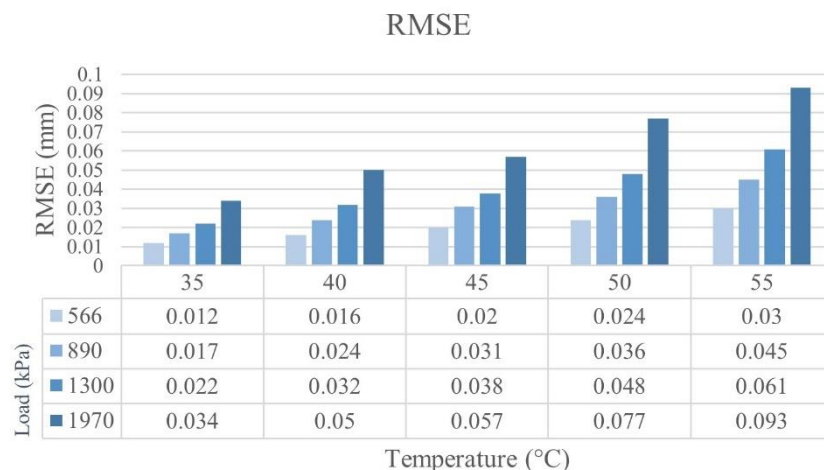
^۴ Instantaneous elastic modulus

شرایط مختلف دمایی و بارگذاری مطابق با جدول ۳ که پیش‌تر ارائه شد، لحاظ شده است [۱۵]. 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 بوده و در اکثر موارد به‌طور 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 [۴۱]. با توجه به انطباق نتایج حاضر با معیارهای پذیرفته‌شده در ادبیات، می‌توان عملکرد مدل پیشنهادی را از نظر دقت عددی، معتبر و قابل اتکا ارزیابی نمود.

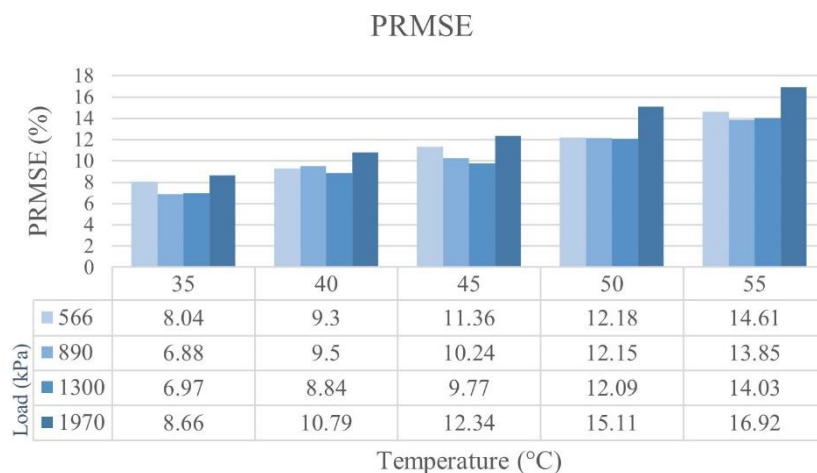


شکل ۱۳- اعتبارسنجی حوضچه خیز مدل FE با مقادیر FWD در دمای ۳۵ °C

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 شده و موجب افزایش حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی گردد. گفتنی است از آنجا که مقادیر RMSE برای داده‌های مورد بررسی مورد تأیید بوده 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.



شکل-۱۴- مقادیر RMSE در مقایسه داده‌های FWD و مدل عددی



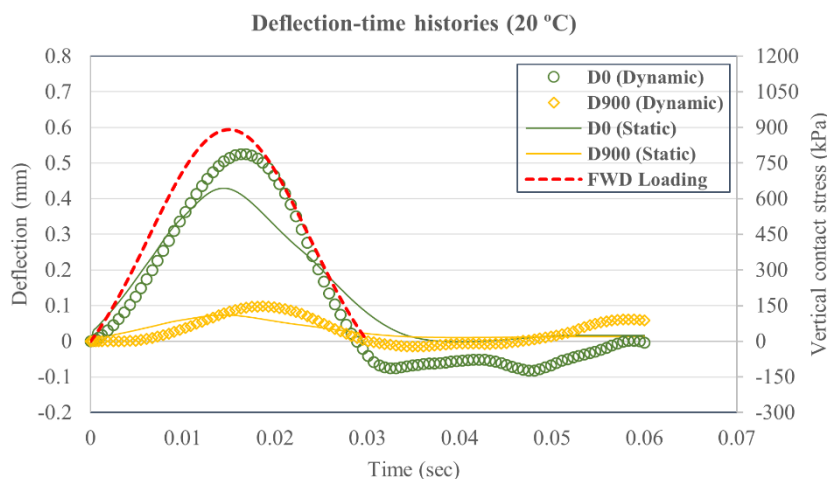
شکل-۱۵- مقادیر PRMSE در مقایسه داده‌های FWD و مدل عددی

۴- 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 به‌عنوان معیاری مهم بر مبنای دو شاخص D0 و D900 مورد بررسی قرار می‌گیرد که در این بین، D0 نشان‌دهنده خیز در مرکز بارگذاری و بیانگر رفتار کلی سازه روسازی است و D900 خیز در فاصله ۹۰۰ میلی‌متری از مرکز را نشان داده و بیشتر معرف عملکرد بستر روسازی است [۳۹]. عوامل بررسی‌شده شامل تحلیل دینامیکی، ویژگی ویسکوالاستیک لایه آسفالتی، خاصیت غیرخطی و همسانگرد عرضی در لایه‌های غیرآسفالتی و عمق قرارگیری سنگ بستر است. به‌منظور ارزیابی اثر هر عامل، مدلی با تمامی شرایط تحلیل به‌عنوان 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 شده تا اثر آن در تحلیل مشخص شود.

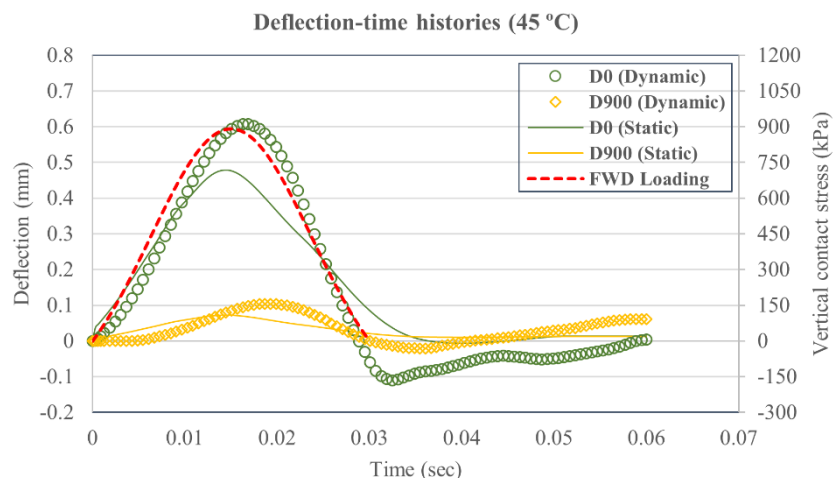
۱-۴- تأثیر تحلیل دینامیکی

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 [۴۲]. در این مطالعه، پاسخ سازه روسازی تحت دو نوع تحلیل دینامیکی و استاتیکی بررسی شد تا اثرات وابستگی زمانی بارگذاری و مصالح آشکار گردد. شکل‌های 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^۱ 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 [۴۳]. 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 [۴۴]. این ترکیب باعث می‌شود که پاسخ مصالح نه تنها به مقدار بار، بلکه به سرعت و مدت زمان اعمال آن وابسته باشد، و در نتیجه، پاسخ با تأخیر زمانی ظاهر شود. عامل دوم، فرآیند انتشار موج تنش در مصالح است که با سرعت مشخصی در محیط حرکت می‌کند. از این رو عامل سوم یعنی میرایی مصالح باعث جذب بخشی از انرژی موج در حین انتشار شده 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 فرآیند 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.



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

^۱ Time lag



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

جدول-۴- تأثیر تحلیل دینامیکی بر افت‌وخیز سطح روسازی

۴۵°C		۲۰°C		دما (°C)
تحلیل دینامیکی	تحلیل استاتیکی	تحلیل دینامیکی	تحلیل استاتیکی	شاخص افت‌وخیز
۰/۶۰۷ (۲۷/۵٪)	۰/۴۷۶	۰/۵۲۵ (۲۳٪)	۰/۴۲۷	D0 (mm)
۰/۱۰۴ (۴۴٪)	۰/۰۷۲	۰/۰۹۷ (۳۳٪)	۰/۰۷۳	D900 (mm)

*درصدهای درج شده در جدول بیانگر میزان تغییرات هر شاخص نسبت به حالت تحلیل استاتیکی می‌باشد.

همان‌گونه که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، در آزمایش FWD، به‌دلیل ماهیت ضربه‌ای و گذرای بارگذاری، خیز ثبت شده در حالت تحلیل دینامیکی معمولاً بیشتر از استاتیکی است. این تفاوت در دمای بالاتر تشدید شده، زیرا رفتار ویسکوالاستیک در لایه آسفالتی غالب می‌شود. بنابراین شاخص D0 در تحلیل دینامیکی در دماهای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد 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 به‌مراتب بیشتر از D0 است، چرا که D900 در فاصله‌ی دورتری از مرکز بارگذاری قرار دارد. در این نقطه، اثرات اینرسی و بازتاب موج به‌صورت برجسته‌تری ظاهر می‌شود. در مقابل، تحلیل استاتیکی به‌دلیل عدم لحاظ‌کردن وابستگی زمانی، قادر به بازنمایی این پدیده‌ها نیست. بنابراین، تحلیل دینامیکی نقش کلیدی در ارزیابی دقیق عملکرد گذرای روسازی ایفا می‌کند. وجود خیز منفی در نمودارهای دینامیکی نیز ناشی از ماهیت گذرای بارگذاری ضربه‌ای، رفتار ویسکوالاستیک مصالح، و اثر نیروهای اینرسی است. این پدیده در تحلیل دینامیکی روسازی اهمیت بالایی دارد، زیرا نشان‌دهنده‌ی توانایی مصالح در بازیابی تغییر شکل و میزان اتلاف انرژی در سیستم است.

۴-۲- تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک لایه آسفالتی

به منظور بررسی اثر خاصیت ویسکوالاستیک در تحلیل پاسخ روسازی، دو حالت ساده شده با مدل معیار سنجش مقایسه شده‌اند؛ مدل معیار سنجش، به‌عنوان حالت پایه و نزدیک‌ترین مدل به واقعیت، شامل رفتار ویسکوالاستیک در لایه آسفالتی و رفتار الاستیک

غیرخطی و ناهمسانگرد در لایه‌های غیرآسفالتی است. در حالت اول، برای بررسی تأثیر خاصیت ویسکوالاستیک، رفتار آسفالت به صورت الاستیک خطی فرض شده و سایر ویژگی‌های مدل معیار حفظ شده‌اند. در حالت دوم، علاوه بر فرض رفتار الاستیک خطی برای آسفالت، رفتار لایه‌های غیرآسفالتی نیز به صورت خطی و همسانگرد در نظر گرفته شده‌اند. جزئیات این حالات در جدول ۵ ارائه شده است. بررسی نتایج به دست آمده از تحلیل حالت اول، مطابق با شکل‌های ۱۸ و ۱۹، نشان می‌دهد 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 نداشته و تقریباً برابر بوده‌اند. این تفاوت در مقدار D0 را می‌توان 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 عمده‌ای از تنش به لایه‌های زیرین، به ویژه لایه اساس، منتقل می‌شود. در نتیجه، تنش‌های اعمال شده در لایه اساس افزایش یافته و این مصالح دانه‌ای، که رفتار غیرخطی دارند، به صورت موضعی وارد فاز سخت‌شوندگی می‌شوند. این پدیده موجب افزایش سختی موضعی و در نهایت کاهش خیز کل سیستم روسازی می‌شود. از سوی دیگر، در تحلیلی که رفتار ویسکوالاستیک برای لایه آسفالتی در نظر گرفته شده، بخشی از انرژی وارده توسط خود این لایه جذب و مستهلک می‌گردد و در نتیجه، میزان تنش منتقل شده به لایه‌های زیرین کمتر خواهد بود. به همین دلیل، فرآیند سخت‌شوندگی در لایه اساس به میزان کمتری رخ داده 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 غیرخطی 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 D0 در حالتی که همه لایه‌ها به صورت الاستیک فرض شده‌اند در دماهای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی گراد 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. هرچند 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.

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 غیرخطی و ناهمسانگرد	الاستیک غیرخطی و ناهمسانگرد	الاستیک خطی و همسانگرد

جدول ۶- بررسی اثر خاصیت ویسکوالاستیک (حالت ۱)

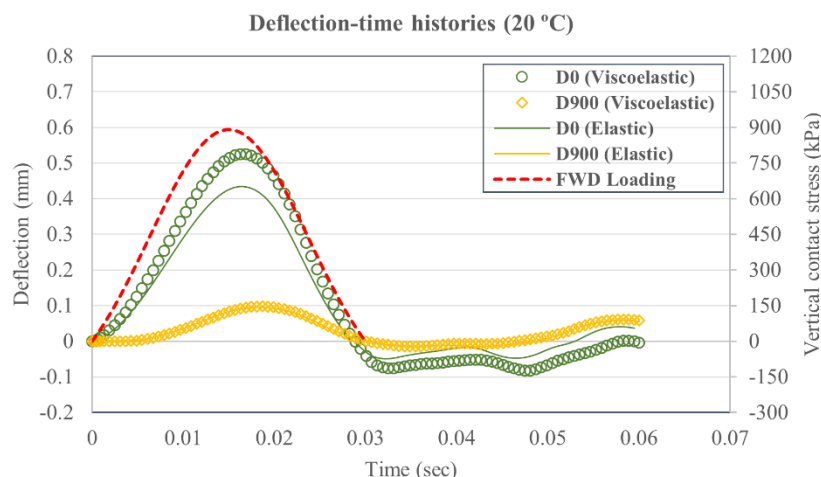
دما (°C)	۲۰°C	۴۵°C	شاخص افت‌وخیز
	آسفالت الاستیک	آسفالت ویسکوالاستیک	آسفالت الاستیک
(mm) D0	۰/۴۳۵	۰/۴۷۷	۰/۶۰۷ (+۲۷٪)
(mm) D900	۰/۰۹۵	۰/۰۹۶	۰/۱۰۴ (+۸/۳٪)

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

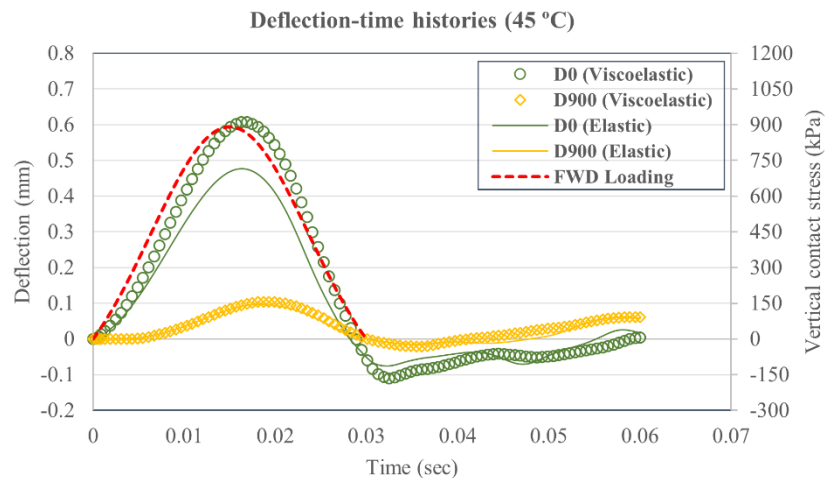
جدول ۷- بررسی اثر خاصیت ویسکوالاستیک (حالت ۲)

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

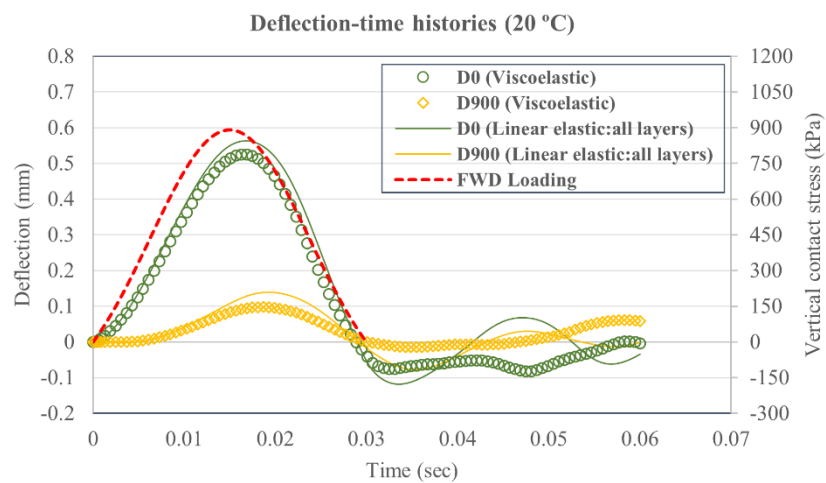
*درصدهای درج شده در جدول بیانگر میزان تغییرات هر شاخص نسبت به حالت ۲ (تمامی لایه‌ها الاستیک) می‌باشد.



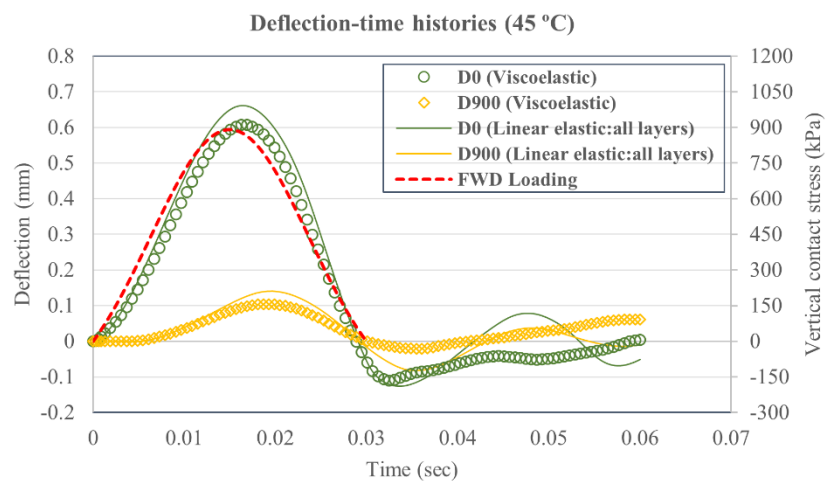
شکل ۱۸- مقایسه فرض ویژگی ویسکوالاستیک و الاستیک در لایه آسفالتی با منحنی‌های افت‌وخیز-زمان در دمای ۲۰ °C (حالت ۱)



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

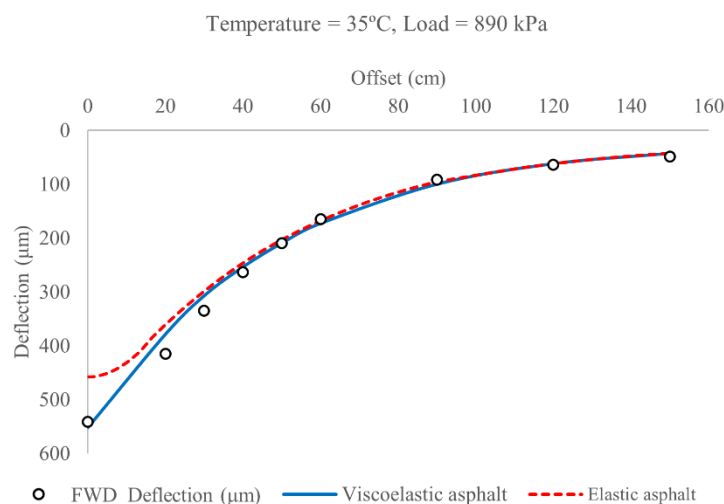


شکل-۲۰- مقایسه فرض ویژگی ویسکوالاستیک و الاستیک در لایه آسفالتی با منحنی‌های افت‌وخیز-زمان در دمای ۲۰ °C (حالت ۲)

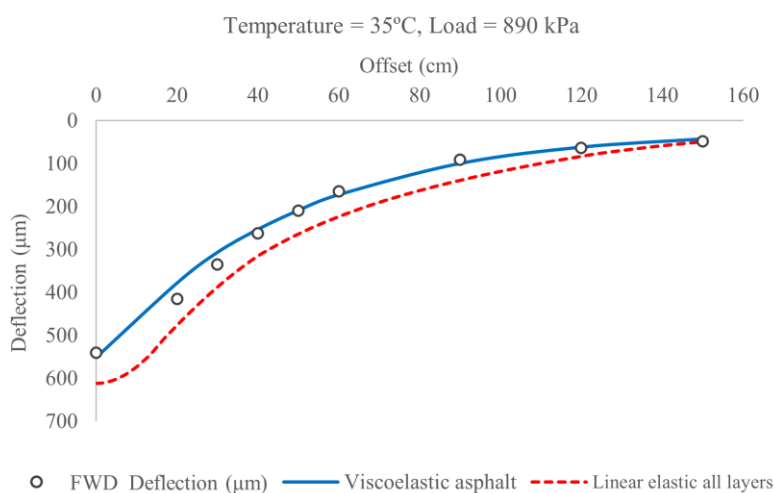


شکل-۲۱- مقایسه فرض ویژگی ویسکوالاستیک و الاستیک در لایه آسفالتی با منحنی‌های افت‌وخیز-زمان در دمای ۴۵ °C (حالت ۲)

همچنین شکل ۲۲ به عنوان یک نمونه، مقایسه‌ای از حوضچه افت‌وخیز روسازی را در شرایط تحلیل آسفالت به عنوان یک ماده الاستیک و ویسکوالاستیک مطابق با حالت اول نشان می‌دهد. بیان می‌شود که نظریه الاستیک پاسخ‌های روسازی به بارگذاری را به‌طور قابل توجهی کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند [۱۳]. در این‌جا نیز مشاهدات نشان می‌دهد که فرض لایه آسفالتی به عنوان یک ماده الاستیک خیز روسازی را در مرکز بارگذاری و قسمت‌های نزدیک به آن کمتر از مقدار واقعی برآورد نموده است؛ در حالی که مدل ویسکوالاستیک در تطابق با داده‌های FWD می‌باشد. در شکل ۲۳ نیز مقایسه‌ای از حوضچه افت‌وخیز روسازی در شرایط تحلیل مدل در حالت دوم ارائه شده است. آن‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، در شرایطی که ویژگی‌های ویسکوالاستیک و رفتار غیرخطی مصالح در مدل لحاظ نشده‌اند، نحوه توزیع تنش منجر به افزایش خیز روسازی نسبت به مقادیر واقعی FWD شده است.



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



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

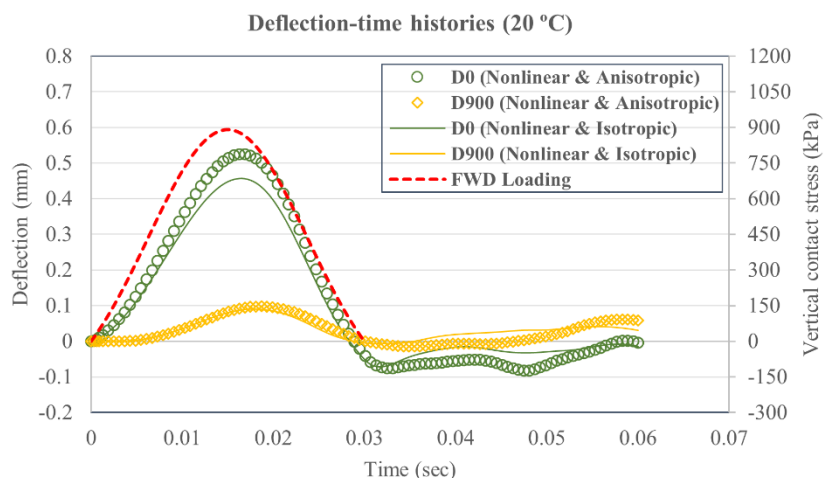
۳-۴- تأثیر خاصیت همسانگرد عرضی در مصالح لایه‌های غیرآسفالتی

مطابق با نتایج ارائه شده در شکل‌های ۲۴ و ۲۵، فرض همسانگرد بودن مصالح غیرآسفالتی منجر به کاهش مقادیر D0 و D900 در مقایسه با حالت ناهمسانگرد می‌شود. این تفاوت عمدتاً ناشی از آن است که در مصالح دانه‌ای، سختی در راستای افقی کمتر از سختی در راستای قائم است؛ در حالی که در مدل همسانگرد، مدول‌های افقی و قائم برابر فرض می‌شوند. جدول ۸ به مقایسه پاسخ‌های بحرانی روسازی در دو حالت همسانگرد و ناهمسانگرد اختصاص دارد. این پاسخ‌ها 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 داده‌های به دست آمده، در نظر گرفتن ناهمسانگردی عرضی می‌تواند تا حدود ۱۵ درصد موجب افزایش افت‌وخیز سطحی نسبت به مدل همسانگرد شود. همچنین، در 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 نشان‌دهنده کاهش عمر خستگی روسازی در این حالت است [۴۵]. از سوی دیگر، کرنش قائم در سطح لایه بستر نیز در دماهای ۲۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد به ترتیب ۷۴ تا ۷۷ درصد بیشتر از مدل همسانگرد بوده که بیانگر افزایش عمق پیش‌بینی شده شیارشدگی در مدل ناهمسانگرد است [۴۵]. درصد‌های ارائه شده در جدول ۸، میزان تغییرات هر پارامتر نسبت به حالت همسانگرد را نشان می‌دهند.

جدول ۸- تأثیر خاصیت همسانگردی عرضی بر پاسخ‌های روسازی

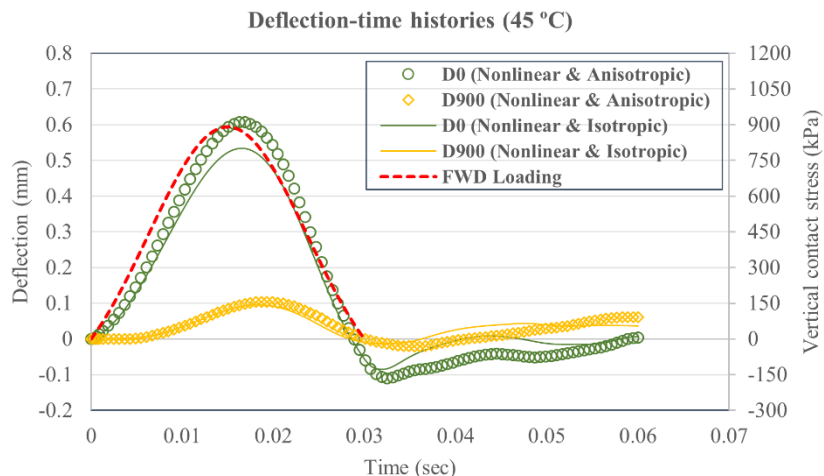
۴۵°C		۲۰°C		دما (°C)
ناهمسانگرد	همسانگرد	ناهمسانگرد	همسانگرد	پاسخ‌های بحرانی
۰/۶۰۷ (۱۳/۹٪)	۰/۵۳۳	۰/۵۲۵ (۱۵٪)	۰/۴۵۶	δ_{surface} (mm)
۲۴۴ (۵۹٪)	۱۵۳	۲۶۵ (۵۲٪)	۱۷۴	ϵ_h (μE)
۱۰۶۰ (۷۴٪)	۶۱۰	۹۹۰ (۷۷٪)	۵۶۰	ϵ_v (μE)

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



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

۴-۴- تأثیر خاصیت مدول غیرخطی و همسانگرد عرضی در مصالح لایه‌های غیرآسفالتی

در این بخش، تأثیر ویژگی‌های غیرخطی بودن مدول برجهندگی و همسانگردی عرضی مصالح غیرآسفالتی بر پاسخ‌های بحرانی روسازی انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. این ارزیابی به‌صورت 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 درج‌شده در آن‌ها میزان تغییر هر پارامتر را نسبت به حالت خطی و همسانگرد نشان می‌دهند. مطابق با داده‌های جدول ۹، زمانی که لایه اساس به‌عنوان ماده‌ای با رفتار غیرخطی 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 یافته و در مقابل، مقدار ϵ_v بین ۸۰ تا ۹۴ درصد افزایش می‌یابد. در جدول ۱۰، تحلیل مشابهی برای مصالح بستر انجام شده که تغییرات کمتری را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که 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 آن‌اند که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی و همسانگردی عرضی در مصالح دانه‌ای می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پاسخ‌های سازه‌ای روسازی داشته باشد.

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

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

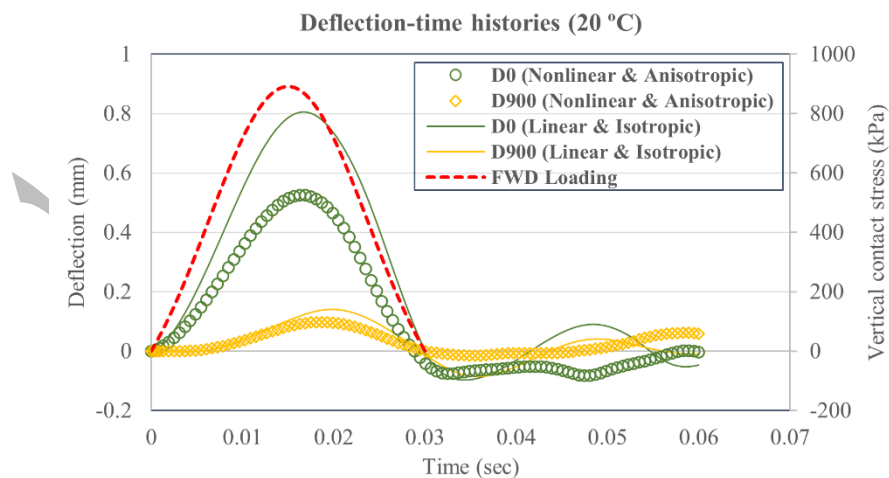
*درصد‌های درج شده در جدول بیانگر میزان تغییرات هر پارامتر نسبت به حالت خطی و همسانگرد می‌باشد.

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

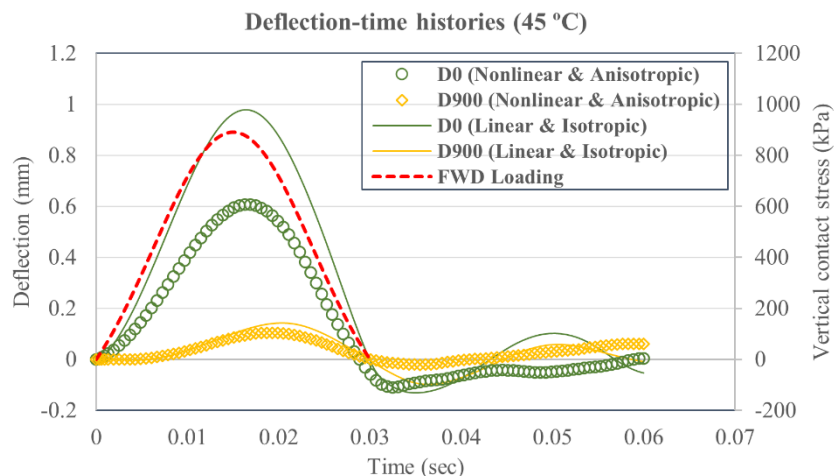
۴۵°C		۲۰°C		دما (°C)
لایه‌های غیرآسفالتی با بستر با ویژگی خطی ویژگی غیرخطی ناهمسانگرد		لایه‌های غیرآسفالتی با بستر با ویژگی خطی ویژگی غیرخطی ناهمسانگرد		پاسخ‌های بحرانی
۰/۶۰۷ (۲/۹- %)	۰/۶۲۵	۰/۵۲۵ (۳/۵- %)	۰/۵۴۴	$\delta_{surface}$ (mm)
۲۴۴ (۵/۸- %)	۲۵۹	۲۶۵ (۱/۱۳+ %)	۲۶۲	ϵ_h ($\mu\epsilon$)
۱۰۶۰ (۲۱/۸+ %)	۸۷۰	۹۹۰ (۱۹/۳+ %)	۸۳۰	ϵ_v ($\mu\epsilon$)

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

در ادامه، مقایسه‌ای میان افت‌وخیز سطحی روسازی در دو حالت فرض مدول خطی و همسانگرد، و فرض مدول غیرخطی و ناهمسانگرد به‌طور 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 غیرخطی و همسانگردی عرضی کمتر از حالت خطی و همسانگرد بوده 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 [۴۶]. همچنین، مقدار D900 نیز در مدل غیرخطی و همسانگرد عرضی تا حدودی کمتر از حالت خطی گزارش شده است. بنابر مطالعات پیشین نیز نادیده گرفتن ویژگی‌های غیرخطی بودن مصالح و همسانگردی عرضی سبب افزایش خیز روسازی و کاهش دقت در تحلیل عملکرد روسازی می‌شود [۴۷].



شکل ۲۶- مقایسه فرض مدول غیرخطی ناهمسانگرد در لایه‌های غیرآسفالتی با استفاده از منحنی‌های افت‌وخیز-زمان در دمای ۲۰°C

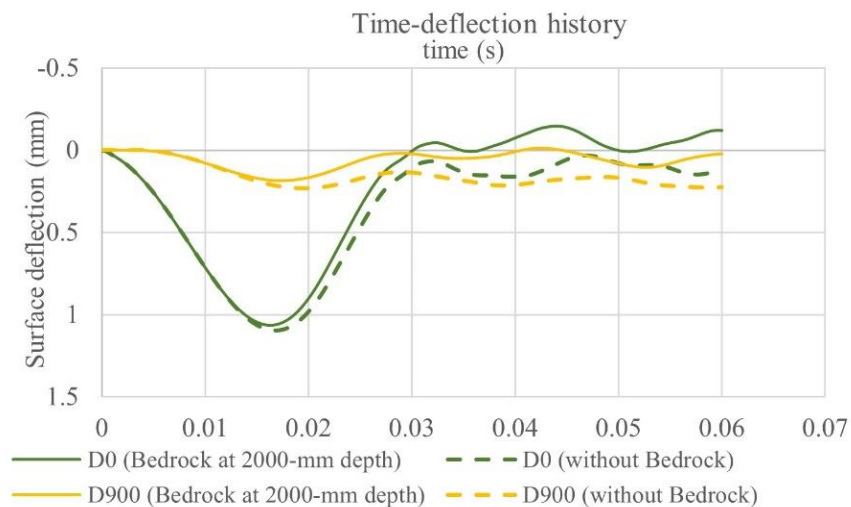


شکل-۲۷- مقایسه فرض مدول غیرخطی ناهمسانگرد در لایه‌های غیر آسفالتی با استفاده از منحنی‌های افت‌وخیز-زمان در دمای ۴۵ °C

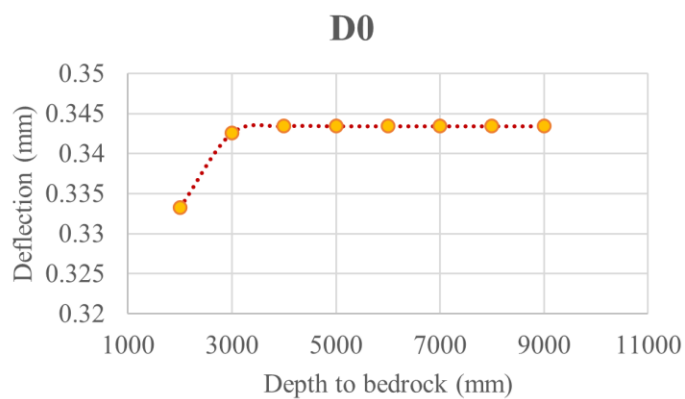
۵-۴- تأثیر حضور و عمق قرارگیری لایه سخت (سنگ بستر)

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 زمان بندی 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، اما از این نقطه به بعد، تأثیر سنگ بستر کاهش یافته و رفتار روسازی به حالت نیم‌فضای بی‌نهایت^۱ نزدیک می‌شود. این روند با مشاهدات گزارش شده در مطالعات پیشین قابل مقایسه است؛ به‌طوری‌که در برخی منابع، عمق‌های بیش از ۵ متر به‌عنوان 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 [۳۹]، [۴۸]. 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 فرآیند تحلیل می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجه در محاسبه مدول‌های سازه‌ای شود، به‌ویژه در شرایطی که این لایه در نزدیکی سطح قرار دارد [۴۹].

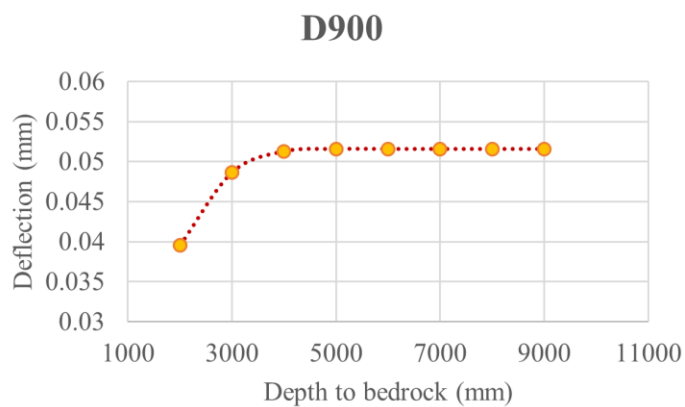
^۱ Infinite half-space



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



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

۵- یافته‌ها و نتیجه‌گیری

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

- مقادیر خیز در تحلیل دینامیکی در مقایسه با تحلیل استاتیکی افزایش قابل‌توجهی داشت. این امر در دماهای بالاتر بیشتر بوده 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 می‌سازد.

- 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 به‌صورت الاستیک خطی فرض شده بود، توانایی جذب و اتلاف انرژی کاهش یافته 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 وارده را در خود مستهلک کرده 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 هیچ‌یک از ویژگی‌های ویسکوالاستیسیته و رفتار غیرخطی لحاظ نشده بود، ظرفیت جذب انرژی به‌طور محسوسی کاهش یافته و پاسخ دینامیکی سیستم به‌صورت نوسانی و بیشتر از مقدار واقعی ظاهر شد. به‌گونه‌ای که مدل معیار سنجش ۷ و ۹ درصد کاهش را در مقادیر D0 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 D900 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.

- 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 بررسی‌شده، به ترتیب ۵۲ تا ۵۹ درصد و ۷۴ تا ۷۷ درصد بیشتر از مقادیر متناظر در حالت همسانگرد به‌دست آمد.

این افزایش کرنش‌ها منجر به کاهش عمر خستگی پیش‌بینی‌شده و افزایش عمق شیارشدگی در مدل ناهمسانگرد نسبت به مدل همسانگرد می‌شود.

- نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن رفتار غیرخطی 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 فرآیند شبیه‌سازی و تفسیر نتایج آزمون FWD از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش، زمانی که لایه اساس به صورت ماده‌ای با رفتار غیرخطی 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 ۳,۵ درصد کاهش و ϵ_h تا ۵,۸ درصد تغییر داشته، در حالی که ϵ_v در این حالت حدود ۱۹ تا ۲۲ درصد افزایش یافته است.
- 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، به‌ویژه در عمق‌های کم، برای دستیابی به تحلیل دقیق عملکرد سازه‌ای روسازی ضروری است.

واژه‌نامه

Deflection	خیز
Falling Weight Deflectometer (FWD)	افت‌وخیزسنج ضربه‌ای
Nonlinear	غیرخطی
Cross-anisotropic (or transversely isotropic)	ناهمسانگرد متقاطع (یا همسانگرد عرضی)
Elseifi et al.	السیفی و همکاران
Nega et al.	نکا 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 شاپیری
Resilient modulus	مدول برجهندگی
Applied Research Associates	ARA
Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG)	راهنمای طراحی مکانیکی - تجربی روسازی
Rao et al.	راو و همکاران
Yau & Quintus	یائو و کوینتوس
Xiao and Tutumluer	ژیائو و توتوملور
Stiff layer (Bedrock)	لایه سخت (سنگ بستر)
Li & Wang	لی و ونگ

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

۶- منابع و مراجع:

- [1] M. Nasimifar and M. Shojaei, "Evaluation of vehicle speed effect on continuous pavement surface deflection measurements," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 184–195, 2022.
- [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," *Constr. Build. Mater.*, vol. 204, pp. 768–780, 2019.
- [4] Y. J. Chou, "Knowledge-based system for flexible pavement structural evaluation," *J. Transp. Eng.*, vol. 119, no. 3, pp. 450–466, 1993.
- [5] A. Ahmad, Z. U. Rehman, and A. H. Khan, "Developing Correlation Between Structural Parameter and Functional Parameter for Pavement Evaluation," *Int. J. Transp. Eng.*, 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 Mater. Pavement Des.*, vol. 22, no. 12, pp. 2748–2766, 2021.
- [7] FHWA, "Pavement Structural Evaluation at the Network Level," *Fed. Highw. Adm. Publ.*, no. September, p. 286, 2016, [Online]. Available: <http://www.ntis.gov>.
- [8] ا. کاووسی و ن. صولتی فر، "تحلیل نتایج محاسبات بازگشتی آزمایش fwd در روسازی های آسفالتی،" *اولین کنفرانس ملی زیرساختهای حمل و نقل*. تهران، ۱۳۹۲.
- [9] K. Gkyrtis, "Pavement Analysis with the Consideration of Unbound Granular Material Nonlinearity," *Designs*, vol. 7, no. 6, p. 142, 2023.
- [10] A. Adu-Osei, D. N. Little, and R. L. Lytton, "Cross-anisotropic characterization of unbound granular materials," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1757, no. 1, pp. 82–91, 2001.
- [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 Mater. Pavement Des.*, vol. 11, no. 2, pp. 227–250, 2010.
- [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.
- [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, doi: 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," *J. Eng.*

- Mech.*, vol. 139, no. 1, pp. 29–38, 2013.
- [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,” *Adv. Civ. Eng. Mater.*, vol. 3, no. 1, p. 20130102, 2014, doi: 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,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 17, no. 6, pp. 1498–1512, 2024, doi: 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,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 6, 2024, doi: 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,” *Eng. Comput.*, vol. 38, no. 4, pp. 2955–2974, 2021, doi: 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 Mater. Pavement Des.*, vol. 22, no. 11, pp. 2458–2477, 2021, doi: 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 Mater. Pavement Des.*, vol. 20, no. 1, pp. 225–243, 2019, doi: 10.1080/14680629.2017.1380688.
 - [21] M. Li, “PAVEMENT RESPONSE ANALYSIS AND MODULUS BACK-CALCULATION FOR HIGHWAY AND AIRFIELD FLEXIBLE PAVEMENTS,” 2017.
 - [22] Q. Zhang, J. Zhao, and S. Guo, “Asphalt Rheological Properties Transformation from Frequency Domain to Temperature Domain Based on WLF Equation,” *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 167–175, 2023, doi: 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,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 36, no. 11, pp. 1653–1675, 1999, doi: 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.
 - [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,” vol. 723, pp. 12–21, 2013, doi: 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,” no. August, p. 214, 2012.
 - [29] A. Yau and H. L. Von Quintus, “Study of LTPP Laboratory Resilient Modulus Test Data and Response Characteristics□: Final Report,” no. October, 2002.
 - [30] Y. Xiao and E. Tutumluer, “Best Value Granular Material for Road Foundations,” no. January, p. 167, 2012, [Online]. Available: <http://www.dot.state.mn.us/research/TS/2012/2012-01.pdf>.
 - [31] Y. Xiao, E. Tutumluer, and J. Siekmeier, “Mechanistic–Empirical Evaluation of Aggregate Base and Granular Subbase Quality Affecting Flexible Pavement Performance in Minnesota.” 2011.
 - [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 . Michaël Broutin To cite this version□: HAL Id□: pastel-00565757 Submitted,” 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,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 20, no.

- 4, pp. 490–498, 2017, doi: 10.1080/10298436.2017.1309197.
- [34] K. D. Hjelmstad and E. Taciroglu, “Analysis and Implementation of Resilient Modulus Models for Granular Solids,” no. August, pp. 821–830, 2000.
 - [35] L. You *et al.*, “Dynamic Viscoelastic Response of Asphalt Pavement With Random Transversely Isotropic Base Courses,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2677, no. 8, pp. 37–53, 2023, doi: 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,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2369, pp. 20–29, 2013, doi: 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,” *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 366–377, 2016, doi: 10.1016/j.jrmge.2016.01.001.
 - [38] J. M. Duncan, C. L. Monismith, and E. L. Wilson, “Finite Element Analyses of Pavements,” *Univ. California, Berkeley*, 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,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 141, no. March, pp. 23–35, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.096.
 - [40] P. Praveen Kumar, B. V. Kiran Kumar, S. Manjunatha, and K. G. Subramanya, “Finite Element Modeling by ABAQUS for Rutting in Flexible Pavement,” *Civ. Eng. Archit.*, vol. 12, no. 3, pp. 1576–1584, 2024, doi: 10.13189/cea.2024.120323.
 - [41] M. Li and H. Wang, *Final report Final report: Nondestructive Evaluation of Pavement Structural Condition for Rehabilitation Design*, vol. 2019, no. 23 February 2021. 2016.
 - [42] H. S. Lee, “Viscowave - A new solution for viscoelastic wave propagation of layered structures subjected to an impact load.” 2013.
 - [43] K. Chatti, Y. Ji, and R. Harichandran, “Dynamic time domain backcalculation of layer moduli, damping, and thicknesses in flexible pavements,” *Transp. Res. Rec.*, no. 1869, pp. 106–116, 2004, doi: 10.3141/1869-13.
 - [44] B. Definitions, “Mechanical Behavior of Time-Dependent , Viscoelastic , Materials,” 2024.
 - [45] F. Gu, X. Luo, Y. Zhang, R. Lytton, and H. Sahin, “Modeling of unsaturated granular materials in flexible pavements,” *E3S Web Conf.*, vol. 9, 2016, doi: 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,” no. January, pp. 29–38, 2013, doi: 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,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–17, 2024, doi: 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 Spec. Tech. Publ.*, vol. 1555 STP, no. December, pp. 205–218, 2017, doi: 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,” *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 44, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s10921-025-01159-z.

نسخه پیش انتشار