

پاسخ ترمو دینامیکی سیستم روسازی با لایه آسفالتی متخلخل تحت بار ترافیکی

محسن رستم خانی^۱، ندا کامبوزیا^{۲*}، محمود عامری^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. استادیار گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳. استاد گروه راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

*nkamboozia@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۸/۲۸

چکیده

سیستم روسازی با لایه آسفالتی متخلخل به دلیل داشتن ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی قابل توجه از جمله کاهش آلودگی صوتی، جذب جریان آب، مقرون به صرفه بودن برای پارکینگ‌ها، جاده‌ها، و باندهای فرودگاه مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه، رفتار دینامیکی سیستم روسازی آسفالت متخلخل ویسکوالاستیک تحت یک بار هارمونیک متحرک بر اساس تئوری کلاسیک ورق‌ها تحت شرایط دمایی مختلف به صورت عددی و تحلیلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. سیستم روسازی به صورت یک سازه ساندویچی مستطیلی مدل‌سازی شده است. برای در نظر گرفتن خواص تخلخل، سه مدل توزیع تخلخل یکنواخت، تخلخل متقارن غیریکنواخت و تخلخل نامتقارن غیریکنواخت برای لایه آسفالت متخلخل در نظر گرفته شده است که خواص مکانیکی آنها در جهات درون صفحه و ضخامت تغییر می‌کنند. به هر ماده‌ای که چگالی آن در اثر افزایش حجم ناشی از قرار گرفتن حفرات و تخلخل‌های گازی کاهش یابد، ماده متخلخل می‌گویند. معادلات حرکت از طریق اصل همپلتون استخراج شده و سپس با استفاده از بسط سری فوریه حل می‌شوند. دقت و درستی فرمول‌بندی به دست آمده با مقایسه داده‌های موجود در ادبیات این زمینه و شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics® کاملاً نشان داده می‌شوند. مطالعات پارامتری انجام گرفته در این کار، آثار سرعت و فرکانس تحریک بار متحرک هارمونیک، توزیع تخلخل و تغییرات دما را بر پاسخ دینامیکی سیستم روسازی آشکار می‌سازد. نتایج بدست آمد نشان داده است که که رفتار دینامیکی سیستم روسازی آسفالت به طور محسوسی تحت تأثیر چنین عواملی قرار می‌گیرند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که حالت تخلخل متقارن غیریکنواخت از دو نوع تخلخل دیگر برای لایه آسفالت مناسب‌تر است.

واژگان کلیدی: سیستم روسازی آسفالت، پاسخ دینامیکی، تخلخل، بار متحرک هارمونیک، تغییرات دمایی.

۱. مقدمه

در ساخت پارکینگ‌ها، جاده‌ها و باندهای فرودگاهی در شهرهای مختلف استفاده شده و گزینه انتخابی بسیاری از مهندسان عمران بوده است. روسازی آسفالت عموماً از ماسه، سنگ (ریزدانه)، آسفالت مایع (نفت خام) و افزودنی‌ها ساخته شده است. فاکتورهای متعددی مانند تغییرات دمایی [1, 2]، نرخ بارگذاری

سیستم روسازی آسفالت به‌خاطر داشتن خواص فیزیکی مکانیکی چشمگیر از جمله کاهش آلودگی صوتی، تولید صدای پایین، قابلیت اطمینان، مقرون به صرفه بودن، پایداری و عمر بالا،

کرنش سطحی سیستم روسازی بتن آسفالت ویسکوالاستیک توسعه داده شد.

امروزه، شناسایی آثار قیود آب و هوایی همچون رطوبت نسبی، دمای هوا و سرعت باد بر رفتار دینامیکی سازه روسازی آسفالت به امری چالشی برای پژوهشگران مواد تبدیل شده است [13]. به عنوان نمونه، لیتائو و همکاران [14] تحلیلی دینامیکی را برای پیش‌بینی تنش‌های حرارتی در سیستم روسازی آسفالت ارائه نمودند. همچنین این پژوهشگران، خواص مکانیکی دینامیکی را در لایه‌های مخلوط آسفالت در نظر گرفتند. بر اساس مدل‌سازی المان محدود در آباکوس، فشار آب حفره‌ها و تنش حرارتی در سیستم روسازی آسفالت توسط سی و همکاران برای شرایط نفوذ آب باران مطالعه شد [2]. وانگ و همکاران [15] آسیب رطوبت ناشی از فشار دینامیک آب حفره‌ها را از طریق اعمال مدل‌های سه‌بعدی در مقیاس ماکرو بر سیستم آسفالت اشباع شده بررسی کردند. ژو و لیو [16] آثار کوپلینگ تنش هیدرولیکی را بر رفتار مکانیکی روسازی آسفالت برای بارگذاری خودرویی متحرک بررسی نمودند و نشان دادند که بهبود هماهنگی روسازی آسفالت نسبت به فشار آب حفره منتقل شده، نقشی اساسی در بهبود عمر و بازدهی آن دارد. طبق یک شبیه‌سازی دینامیک مولکولی (MD)، حسین و همکاران [17] نشان دادند که مشخصه‌های مکانیکی مانند فشار تیر و پارامترهای محیطی همچون رطوبت و دما، آثار مهمی بر هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای آزادشده از سیستم روسازی آسفالت دارند.

راهکارهای توسعه شهری، تأثیر شدیدی از فاکتورهای مختلف می‌گیرند که در میان آن‌ها، سیستم‌های روسازی که از آسفالت متخلخل بهره می‌برند جایگاهی مهمی دارند. دلیل این امر آن است که آسفالت متخلخل، هماهنگی بهتری با محیط زیست داشته و مزایای متعددی را ارائه می‌دهد. تجدید سفره‌های آب زیرزمینی، کنترل جریان آب و کاهش جریاب آب از این جمله هستند. دینگ و وانگ [18] به کمک یک مدل‌سازی کوپل شده FEM-BEM نوین تیر را بر سطوح غیرمتخلخل و متخلخل مقایسه کردند تا درک بهتری از مزایای روسازی متخلخل داشته باشند. آن‌ها نشان دادند که برای بافت‌های سطحی

[3]، موده‌های بارگذاری [4]، و آسیب‌پذیری در برابر رطوبت [5,6] قادر به اثرگذاری روی پاسخ دینامیکی آسفالت هستند. رفتار دینامیکی سیستم روسازی آسفالت ایزوتروپیک عرضی چند لایه تحت بارگذاری ضربه‌ای، به صورت تحلیلی توسط یو و همکاران [7] و با استفاده از روش المان طیفی بررسی شد. نویسندگان نشان دادند که تغییر شکل پیش‌بینی شده برای راه‌حل‌های ایزوتروپیک عرضی به ویژه در نزدیکی بارگذاری ضربه‌ای از پاسخ‌های ایزوتروپیک متفاوت هستند.

همانگونه که پیشتر ذکر شد، بار متحرک، یکی از پارامترهای مهمی است که مهندسان عمران برای طراحی روسازی آسفالت استفاده نموده‌اند. تا قبل از این، چندین پروژه تجربی و عددی، تأثیر بار متحرک متمرکز یا گسترده را بر پاسخ دینامیکی روسازی آسفالت بررسی کرده‌اند. به عنوان نمونه، عامری و همکاران [8] یک شبیه‌سازی عددی را برای تحلیل تأثیر شرایط مختلف بارگذاری ترافیکی بر ضریب تمرکز تنش روسازی آسفالت که شامل ترک عرضی است، توسعه دادند. یک مدل سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار تجزیه و تحلیل اجزای محدود ABAQUS توسط وو و همکاران ارائه شد [9] تا پاسخ دینامیکی سیستم روسازی بتنی را با یک لایه جدا کننده آسفالت که تحت بارهای متحرک قرار دارد را مطالعه کنند. وانگ و لی [10] با استفاده از مدل المان محدود (FE) اثر بارگذاری متحرک ناشی از وسایل نقلیه و بارگذاری دینامیکی ضربه‌ای را بر رفتار دینامیکی روسازی آسفالت تحلیل و مقایسه کردند. نتایج ارائه شده ثابت کرد که مدت زمان پالس‌های تنش‌های فشاری در لایه آسفالت روسازی به طور محسوسی تحت تأثیر عمق و روسازی و سرعت بار قرار دارند. برای پیش‌بینی تأثیر روند بازیابی بر عمق ناهمواری و خسارت وارد شده هنگام حرکت دوره‌ای بر روسازی آسفالت، اقبال‌پور و همکاران [11] از روش تکرار نیوتن-رفسون برای بررسی آسیب‌ها، تغییر شکل دائمی و عوامل بازیابی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که این بازیابی بر ظرفیت تحمل بار و طول عمر روسازی آسفالت تأثیر می‌گذارد و باعث کاهش سرعت رشد آسیب‌ها می‌شود. یک مدل شبیه‌سازی عددی توسط لیو و ژانگ [12] برای تجزیه و تحلیل انواع مختلف زبری روسازی و سرعت خودروها بر جابه‌جایی و

۳. مطالعات تحلیلی

۳-۱. روابط ساختاری سازه

فرض شده است که لایه‌های سیستم روسازی آسفالتی از ترکیب قیر و سنگ‌دانه‌های با اندازه مختلف تشکیل شده است. سیستم روسازی فرض شده است که از چهار لایه مستطیلی با ابعاد $(a \times b)$ تشکیل شده باشد که مشخصات هر لایه عبارت است از:

۱- لایه آسفالت ویسکوالاستیک با مشخصات مکانیکی و هندسی (ضخامت h_1 ، مدول الاستیسیته E_1 ، نسبت پواسون ν_1 و چگالی جرمی ρ_1)، (۲) base layer با مشخصات مکانیکی و هندسی (ضخامت h_2 ، مدول الاستیسیته E_2 ، نسبت پواسون ν_2 و چگالی جرمی ρ_2)، (۳) sub-base layer با مشخصات مکانیکی و هندسی (ضخامت h_3 ، مدول الاستیسیته E_3 ، نسبت پواسون ν_3 و چگالی جرمی ρ_3)، (۴) sub-grade or soil layer با مشخصات مکانیکی و هندسی (ضخامت h_4 ، مدول الاستیسیته E_4 ، نسبت پواسون ν_4 و چگالی جرمی ρ_4)، همچنین یک بار ترافیکی هارمونیک با سرعت خاص و فرکانس تحریک روی لایه آسفالتی متخلخل در جهت طول فرض شده است که در حرکت است (شکل ۱).

شکل ۱: نمای سیستم روسازی با لایه آسفالتی متخلخل تحت بار متحرک هارمونیک

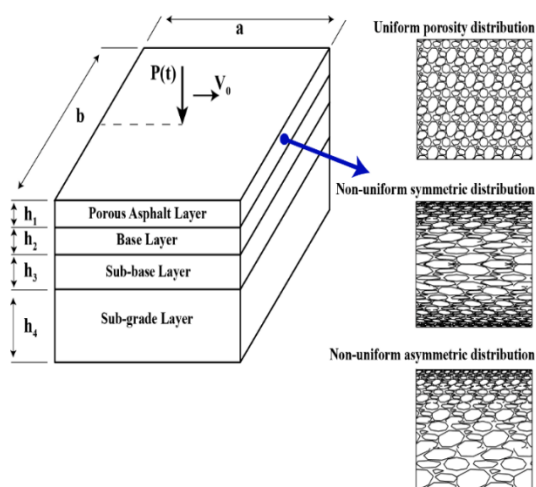


Figure 1: Porous asphalt pavement system under the moving load harmonic load.

مشابه، نویز کلی با افزایش تخلخل کاهش می‌یابد. ما و همکاران [19] اثر ناخالصی را بر نفوذپذیری روسازی آسفالت متخلخل تحلیل نمودند. وانگ و همکاران [20] از نتایج عددی المان محدود به همراه نتایج تجربی برای نشان دادن پایداری سطح جاده پروالاستیک در جاده‌های شهری و مناطق سرد بهره بردند و عملکرد تابعی و مکانیکی را در نظر گرفتند. پاسخ سازه‌ای سطوح پروالاستیک جاده‌ها تحت حرکت غلتشی تایر کامیون‌ها توسط سریرانگام و همکاران [21] به صورت عددی مطالعه شد و جنبه‌هایی همچون شرایط بارگذاری، فشار هوای لاستیک، و سرعت‌های گوناگون بررسی شد. در سالیان اخیر استفاده از نرم افزارهای تصمیم‌گیری و یا شبیه‌ساز در تمامی علوم مهندسی از جمله در حوزه راه و ترابری و حمل و نقل مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است [22-25].

۲. اهداف پژوهش

بررسی پیشینه پژوهش که در قسمت قبل ارائه شد، نشان داد که تاکنون گزارش‌هایی در مورد بررسی پاسخ دینامیکی سیستم‌های روسازی تحت بار متحرک ارائه شده است، ولی آثار تغییرات دمایی و لایه آسفالت متخلخل به صورت عددی و تحلیلی بر رفتار دینامیکی سیستم روسازی چندلایه تحت حرکت بار ترافیکی هارمونیک با فرکانس تحریک مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین هدف اصلی این مقاله، پر کردن این خلا است. با استفاده از نظریه کلاسیک ورق‌ها، سیستم روسازی مانند ساندویچ ورق چند لایه مدل‌سازی شده است. فرض شده است که خواص مکانیکی لایه آسفالتی ویسکوالاستیک متخلخل در جهت ضخامت متغیر باشد. سه مدل توزیع تخلخل یکنواخت، تخلخل متقارن غیر یکنواخت و تخلخل نامتقارن غیر یکنواخت برای لایه آسفالت متخلخل در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن پاسخ دینامیکی در بازه زمانی، از بسط‌های سری فوریه و تبدیل لاپلاس استفاده شده است.

$$\begin{aligned} E_1(z) &= E_1[1 - e_0\chi] \\ G_1(z) &= G_1[1 - e_0\chi] \\ \rho_1(z) &= \rho_1\sqrt{1 - e_0\chi} \end{aligned} \quad (4)$$

و e_0 نسبت تخلخل است که از تقسیم حجم حفرات به حجم کلی ماده بدست می‌آید، پارامتر χ برحسب نسبت تخلخل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\chi = \frac{1}{e_0} - \frac{2}{e_0} \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{1 - e_0} - \frac{2}{\pi} + 1 \right)^2 \quad (5)$$

• مدل توزیع تخلخل غیریکنواخت متقارن (Type B): در این مدل، خواص مکانیکی از بیشترین مقدار خود در سطوح بالا و پایین لایه آسفالت شروع می‌شوند و در وسط لایه به کمترین مقدار خود می‌رسند، که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} E_1(z) &= E_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right] \\ G_1(z) &= G_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right], \\ \rho_1(z) &= \rho_1 \left[1 - e_m \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right] \\ e_m &= 1 - \sqrt{1 - e_0} \end{aligned} \quad (6)$$

• مدل توزیع تخلخل غیریکنواخت نامتقارن (Type C): در این مدل، خواص مکانیکی مانند چگالی و مدول الاستیسیته از بیشترین مقدار خود در سطح بالا شروع می‌شود و به کمترین مقدار خود در سطح پایین می‌رسند، که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} E_1(z) &= E_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{2h} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \\ G_1(z) &= G_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{2h} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \\ \rho_1(z) &= \rho_1 \left[1 - e_m \cos\left(\frac{\pi z}{2h} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

روابط تنش- کرنش برای سه لایه دیگر در سیستم روسازی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^{(i)} &= \begin{bmatrix} \frac{E_i}{1 - \vartheta_i^2} - \frac{\vartheta_i E_i}{1 - \vartheta_i^2} & 0 \\ \frac{\vartheta_i E_i}{1 - \vartheta_i^2} & \frac{E_i}{1 - \vartheta_i^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \\ i &= 2, 3, 4 \end{aligned} \quad (8)$$

برای بدست آوردن معادلات دینامیکی حاکم بر مسیر حرکت برای سیستم روسازی، میدان جابه‌جایی (U, V, W) را براساس نظریه کلاسیک ورق‌ها در مختصات کارتزین استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} U(x, y, z, t) &= -z \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial x} \\ V(x, y, z, t) &= -z \frac{\partial w(x, y, t)}{\partial y} \\ W(x, y, z, t) &= w(x, y, t) \end{aligned} \quad (9)$$

درحالی‌که w جابه‌جایی عرضی سیستم است. بافرض اینکه روابط کرنش-جابه‌جایی خطی است، ترم‌های کرنش نرمال و برشی برحسب میدان جابه‌جایی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \\ \varepsilon_y &= -z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \\ \gamma_{xy} &= -2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{aligned} \quad (10)$$

و ε_x و ε_y به ترتیب، کرنش‌های نرمال در جهات x و y هستند و γ_{xy} کرنش برشی است. روابط تنش-کرنش برای لایه آسفالتی ویسکوالاستیک که متخلخل فرض شده است، با درنظر گرفتن حالت تنش صفحه‌ای تحت شرایط دمایی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{E_1(z)(1+\eta \frac{\partial}{\partial t})}{1-\vartheta_1^2} - \frac{\vartheta_1 E_1(z)(1+\eta \frac{\partial}{\partial t})}{1-\vartheta_1^2} & 0 \\ \frac{\vartheta_1 E_1(z)(1+\eta \frac{\partial}{\partial t})}{1-\vartheta_1^2} & \frac{E_1(z)(1+\eta \frac{\partial}{\partial t})}{1-\vartheta_1^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} - \bar{\alpha} \Delta T \\ \varepsilon_{yy} - \bar{\alpha} \Delta T \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} + G_1(z) \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (11)$$

در حالی‌که η ضریب میرایی، $G_1(z)$ مدول برشی لایه آسفالت متخلخل، $\bar{\alpha}$ ضریب انبساط حرارتی هستند، و ΔT تغییرات دمایی محیط هستند. همانگونه که پیشتر بیان شد، سه مدل مختلف برای توزیع تخلخل درنظر گرفته شده است که به صورت زیر بیان می‌شوند.

• مدل توزیع تخلخل یکنواخت (Type A): براساس این مدل خواص مکانیکی در جهت ضخامت به صورت یکنواخت متغیر هستند و به صورت زیر بیان می‌شوند [26]:

در پایان ترم کار خارجی ناشی از تغییرات دمای محیط و بار هارمونیک متحرک بر لایه آسفالتی متخلخل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\bar{W} = \int_A \left\{ q_1 w + q_2 \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dA \quad (13)$$

و ترم‌های q_1 و q_2 به صورت زیر بیان می‌شوند [27,28]:

$$q_1 = P_0 \sin(\Omega t) \delta(x - V_0 t) \delta(y - \frac{b}{2}), \quad (14)$$

$$q_2 = \int_{-\frac{h_1}{2}}^{\frac{h_1}{2}} E_1(z) \bar{\alpha} \Delta T dz$$

در حالی که P_0 دامنه اولیه بار متحرک و Ω فرکانس تحریک بار متحرک هارمونیک هستند. همچنین δ بیانگر تابع دلتای دیراک است. توجه شود که در اینجا، بار متحرک با سرعت V_0 در جهت طولی روی لایه آسفالت ویسکوالاستیک متخلخل در حال حرکت است. با استفاده از ترم‌های انرژی جنبشی (رابطه ۱۰)، انرژی کرنش (رابطه ۱۲)، و کار خارجی (رابطه ۱۳) در اصل همپلتون و استفاده از انتگرال‌گیری جز به جز، معادله دینامیکی حاکم بر مسیر حرکت برای سیستم روسازی آسفالت تحت بار متحرک، با در نظر گرفتن تغییرات دمایی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_{yy}}{\partial y^2} + q_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = q_1 + I_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + I_1 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^2 \partial t^2} \right) \quad (15)$$

و نتیجه تنش M_{ij} به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M_{xx} = \int_{-\frac{h_{t0}}{2}}^{h_{t1}} \sigma_{xx}^{(4)} z dz + \int_{h_{t1}}^{h_{t2}} \sigma_{xx}^{(3)} z dz + \int_{h_{t2}}^{h_{t3}} \sigma_{xx}^{(2)} z dz + \int_{h_{t3}}^{\frac{h_{t0}}{2}} \sigma_{xx}^{(1)} z dz, \\ M_{yy} = \int_{-\frac{h_{t0}}{2}}^{h_{t1}} \sigma_{yy}^{(4)} z dz + \int_{h_{t1}}^{h_{t2}} \sigma_{yy}^{(3)} z dz + \int_{h_{t2}}^{h_{t3}} \sigma_{yy}^{(2)} z dz + \int_{h_{t3}}^{\frac{h_{t0}}{2}} \sigma_{yy}^{(1)} z dz, \\ M_{xy} = \int_{-\frac{h_{t0}}{2}}^{h_{t1}} \sigma_{xy}^{(4)} z dz + \int_{h_{t1}}^{h_{t2}} \sigma_{xy}^{(3)} z dz + \int_{h_{t2}}^{h_{t3}} \sigma_{xy}^{(2)} z dz + \int_{h_{t3}}^{\frac{h_{t0}}{2}} \sigma_{xy}^{(1)} z dz, \quad (16)$$

سرانجام با استفاده از روابط ۳ و ۸ در رابطه ۱۶ و استفاده در رابطه ۱۵، فرم نهایی معادله دینامیکی بر حسب جابه‌جایی عرضی به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

برای بدست آوردن معادلات دینامیکی حاکم بر مسیر حرکت برای سیستم روسازی با لایه آسفالت ویسکوالاستیک متخلخل، از اصل همپلتون در فرمت زیر استفاده می‌شود:

$$\delta \pi = 0, \pi = \int_{t_0}^t (\bar{K} - \bar{V} + \bar{W}) dt \quad (9)$$

در حالی که $\bar{V}$ بیانگر انرژی کرنش، $\bar{W}$ کار خارجی ناشی از تغییرات دمایی و بار هارمونیک متحرک، و $\bar{K}$ انرژی جنبشی سیستم است. قابل توجه است که براساس اصل همپلتون اگر زمان متوقف شود و به سیستم یک تغییر کوچک داده شود سیستم در حالت قبلی خود می‌ماند. بنابراین تغییرات در رابطه اصل همپلتون برابر صفر می‌شود. با استفاده از رابطه ۱، انرژی جنبشی برای سیستم روسازی با لایه آسفالت متخلخل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^4 \iiint_V \frac{1}{2} \rho_i (\dot{U}^2 + \dot{V}^2 + \dot{W}^2) dv = \frac{1}{2} \int_A \left\{ I_0 \dot{w}^2 + I_1 \left[\left(\frac{\partial \dot{w}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \dot{w}}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dA \quad (10)$$

در حالی که V و A به ترتیب، حجم و مساحت سطح مقطع هستند. همچنین پارامترهای ممان اینرسی I_0 و I_1 به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$I_0 = \int_{-\frac{h_{t0}}{2}}^{h_{t1}} \rho_4 dz + \int_{h_{t1}}^{h_{t2}} \rho_3 dz + \int_{h_{t2}}^{h_{t3}} \rho_2 dz + \int_{h_{t3}}^{\frac{h_{t0}}{2}} \rho_1(z) dz, \\ I_1 = \int_{-\frac{h_{t0}}{2}}^{h_{t1}} \rho_4 z^2 dz + \int_{h_{t1}}^{h_{t2}} \rho_3 z^2 dz + \int_{h_{t2}}^{h_{t3}} \rho_2 z^2 dz + \int_{h_{t3}}^{\frac{h_{t0}}{2}} \rho_1(z) z^2 dz, \quad (11)$$

$$h_{t0} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad h_{t1} = -\frac{h_{t0}}{2} + h_4, \quad h_{t2} = h_{t1} + h_3, \quad h_{t3} = h_{t2} + h_2$$

انرژی کرنش سیستم روسازی با لایه آسفالت متخلخل با استفاده از روابط ۳ و ۸ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\bar{V} = \sum_{i=1}^4 \iiint_V \frac{1}{2} \left(\sigma_{xx}^{(i)} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}^{(i)} \varepsilon_{yy} + \sigma_{xy}^{(i)} \gamma_{xy} \right) dv \quad (12)$$

$$M\ddot{Q} + C\dot{Q} + KQ = F \quad (۲۱)$$

در حالی که :

$$M = I_0 + I_1 \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right],$$

$$K = D_{11} \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^4 \right] + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 - q_2 \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right], \quad (۲۲)$$

$$C = \eta \left\{ D_{11} \left[\left(\frac{m\pi}{a} \right)^4 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^4 \right] + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right\},$$

$$F = \frac{4P_0}{ab} \sin \left(\frac{m\pi}{a} V_0 t \right) \sin \left(\frac{n\pi}{b} \right)$$

با استفاده از تبدیل لاپلاس بر معادله ۲۱ و در نظر گرفتن

شرایط اولیه صفر، معادله جبری زیر حاصل می‌شود:

$$(Ms^2 + Cs + K)Q(s) = F(s) \quad (۲۳)$$

سرانجام با حل معادله ۲۳ و استفاده از تبدیل معکوس

لاپلاس، پاسخ دینامیکی سیستم روسازی با لایه آسفالت در بازه زمانی بدست می‌آید. در اینجا، پاسخ دینامیکی بدون بعد بر

حسب جابه‌جایی استاتیکی به صورت $\frac{w}{w_{st}}$ بررسی می‌شود.

و $w_{st} = 0.1265 \frac{p_0 b^2}{E h^3}$ جابه‌جایی استاتیکی است [29].

به منظور ارزیابی بهتر اثر بار متحرک هارمونیک بر پاسخ دینامیکی سیستم روسازی با لایه آسفالت، پارامتر سرعت بدون

بعد را برحسب سرعت بحرانی به صورت $\alpha_v = \frac{V_0}{V_{cr}}$ تعریف

می‌شود. $V_{cr} = \frac{\omega_{11} a}{\pi}$ سرعت بحرانی بار متحرک است که

برحسب فرکانس طبیعی اول ω_{11} سیستم روسازی بیان می‌شود.

همچنین آثار فرکانس تحریک بار متحرک هارمونیک به صورت

$$\beta = \frac{\Omega}{\omega_{11}}$$

تعریف می‌شود.

۴. نتایج و بحث‌ها

در این بخش در ابتدا درستی روابط استخراج شده براساس مدل تحلیلی با نتایج مقالات گذشته و نرم افزار شبیه‌سازی کامسول نشان داده می‌شود. سپس آثار پارامترهای مختلف مانند نسبت تخلخل، تغییرات دما، و پارامترهای سرعت و فرکانس تحریک بار ترافیکی متحرک هارمونیک بر پاسخ دینامیکی سیستم

$$D_{11} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + 2(D_{12} + 2D_{66}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + q_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = q_1 + \quad (۲۴)$$

$$I_0 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + I_1 \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^2 \partial t^2} \right)$$

و :

$$D_{11} = \int_{-\frac{h_{t0}}{2}}^{h_{t1}} E_4 z^2 dz + \int_{h_{t1}}^{h_{t2}} E_3 z^2 dz +$$

$$\int_{h_{t2}}^{h_{t3}} E_2 z^2 dz + \int_{h_{t3}}^{\frac{h_{t0}}{2}} E_1(z) \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) z^2 dz,$$

$$D_{12} = \int_{-\frac{h_{t0}}{2}}^{h_{t1}} E_4 \vartheta_4 z^2 dz +$$

$$\int_{h_{t1}}^{h_{t2}} E_3 \vartheta_3 z^2 dz + \int_{h_{t2}}^{h_{t3}} E_2 \vartheta_2 z^2 dz +$$

$$\int_{h_{t3}}^{\frac{h_{t0}}{2}} E_1(z) \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) \vartheta_1 z^2 dz,$$

(۱۸)

$$D_{66} = \int_{-\frac{h_{t0}}{2}}^{h_{t1}} G_4 z^2 dz + \int_{h_{t1}}^{h_{t2}} G_3 z^2 dz +$$

$$\int_{h_{t2}}^{h_{t3}} G_2 z^2 dz + \int_{h_{t3}}^{\frac{h_{t0}}{2}} G_1(z) \left(1 + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right) z^2 dz$$

۲-۳. روش حل

برای حل تحلیلی معادله دینامیکی (۱۷)، فرض شده است که

شرایط مرزی در چهار طرف سیستم روسازی به صورت تکیه‌گاه

ساده باشد. بنابراین جابه‌جایی و گشتاور در چهار لبه به صورت

زیر بیان می‌شود:

$$w(0, y, t) = w(a, y, t) = w(x, 0, t) =$$

$$w(x, b, t) = 0,$$

$$M_{xx}(0, y, t) = M_{xx}(a, y, t) =$$

$$M_{yy}(x, 0, t) = M_{yy}(x, b, t) = 0$$

(۱۹)

با استفاده از بسط سری فوریه که شرایط مرزی ۱۹ را ارضاء

می‌کند، میدان جابه‌جایی عرضی به صورت زیر (۲۰) بیان می‌

شود:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} Q(t) \sin \left(\frac{m\pi x}{a} \right) \sin \left(\frac{n\pi y}{b} \right), \quad Q(t) = \bar{Q} e^{i\omega t} \quad (۲۰)$$

$\bar{Q}$ ضریب مودال است، m و n به ترتیب شماره مود در

جهت x و y هستند. با جایگذاری رابطه ۲۰ در رابطه ۱۷،

معادله دیفرانسیلی جزئی (رابطه ۱۷) به معادله دیفرانسیلی

معمولی زیر تبدیل می‌شود:

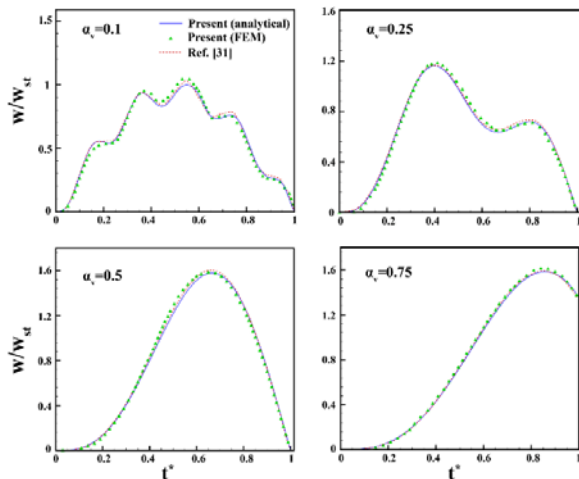


Figure. 2: A comparative study of the dynamic deflection of elastic plate for various values of velocity parameter.

در اعتبار سنجی دیگر، با حذف بار هارمونیک، خاصیت ویسکوالاستیک و تغییرات دما، سه فرکانس طبیعی بدون بعد اول $\tilde{\omega}_{mn} = \omega_{mn} a^2 \sqrt{\frac{\rho h}{D}}$ برای یک ورق مربعی الاستیک متخلخل تحت سه مدل تخلخل یکنواخت، غیریکنواخت متقارن، و غیریکنواخت نامتقارن به صورت تحلیلی و عددی با نرم افزار کامسول بدست آمده و در شکل (۳) با نتایج انتشار یافته در مرجع [32] برحسب نسبت تخلخل مقایسه شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می شود، نتایج از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. به علاوه مشاهده می شود که فرکانس طبیعی ها با افزایش نسبت تخلخل کاهش پیدا می کنند. همچنین فرکانس محاسبه شده بر حسب مدل غیریکنواخت متقارن دارای بیشترین مقدار و برحسب مدل توزیع تخلخل یکنواخت دارای کمترین مقدار هستند

نهایتاً با در نظر گرفتن بار هارمونیک متحرک، ضریب میرایی و و تخلخل، چهار فرکانس طبیعی بدون بعد اول برای یک ورق الاستیکی مربعی به صورت تحلیلی بدست آمده و بر حسب تغییرات دما در شکل (۴) با نتایج مرجع [33] مقایسه شده است. همان گونه که از این شکل مشخص است دقت حل تحلیلی بسیار بالا است. همچنین این شکل نشان می دهد که با افزایش تغییرات دما، فرکانس طبیعی های سیستم کاهش پیدا می کند.

روسازی با لایه آسفالت متخلخل ارائه می شود. بهرحال مشخصات هندسی و فیزیکی استفاده شده در سیستم روسازی برای کلیه نتایج، به جز اعتبارسنجی ها، در جدول (۱) گزارش شده است [30]. نرم افزار کامسول ابزاری قدرتمند برای شبیه سازی بسیاری از پدیده های فیزیکی و شیمیایی است که بر پایه روش حل عددی المان محدود (Finite Element Method)، قابلیت حل معادلات دیفرانسیلی را دارد و کاربران می توانند با استفاده از ماژول های موجود در این نرم افزار، بسیاری از فرآیندهای موجود در طبیعت را شبیه سازی کنند؛

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و هندسی سیستم روسازی آسفالت.

Layer	Modulus of elasticity (ksi)	Poisson's ratio	Mass density (pcf)	Thickness (cm)
Surface	200	0.3	150	14
Base	50	0.35	140	20
Subbase	15	0.35	130	25
Subgrade	10	0.35	130	200

Table 1: The characteristics of the considered asphalt pavement system.

۴-۱. اعتبار سنجی

در اعتبارسنجی اول، با حذف لایه های سیستم روسازی و حذف خواص تخلخل و تغییرات دما، پاسخ دینامیکی بدون بعد یک ورق مربعی الاستیک برای چهار سرعت بدون بعد مختلف به صورت تحلیلی و عددی کامسول بدست آمده و در شکل (۲) با نتایج مرجع [31] مقایسه شده است. همان گونه که این شکل مشخص است نتایج عددی و تحلیلی از دقت خوبی برخوردار هستند.

شکل ۲: مقایسه پاسخ دینامیکی بدون بعد ورق الاستیک بر حسب سرعت بدون بعد بار متحرک

متخلخل برای پارامتر سرعت بدون بعد با فرض کردن $\beta = 0, \Delta T = 0, \eta = 0$ نشان داده شده است. به علاوه نتایج عددی المان محدود ناشی از شبیه سازی کامسول نیز در این شکل نشان داده شده است. نتایج ناشی از این شکل نشان می دهد که پاسخ دینامیکی سیستم روسازی به صورت محسوسی تحت تاثیر پارامتر سرعت است. با دقت در شکل مشاهده می شود که با افزایش پارامتر نسبت تخلخل برای هر سه مدل توزیع تخلخل، پاسخ دینامیکی افزایش پیدا می کند. این امر ناشی از این است که با افزایش نسبت تخلخل لایه آسفالتی، سختی سیستم روسازی کم شده و پاسخ دینامیکی سیستم افزایش می یابد. همچنین از آنجا که سختی کلی مدل توزیع غیریکنواخت متقارن بیشتر از دو مدل دیگر است بنابراین پاسخ دینامیکی سیستم روسازی با در نظر گرفتن این مدل برای توزیع تخلخل لایه آسفالت کمتر تغییر می کند. درحالی که بیشترین پاسخ دینامیکی سیستم روسازی برای حالت توزیع یکنواخت تخلخل است.

شکل ۵: آثار پارامتر نسبت تخلخل و سرعت بار متحرک بر تغییرات پاسخ دینامیکی سیستم روسازی آسفالت.

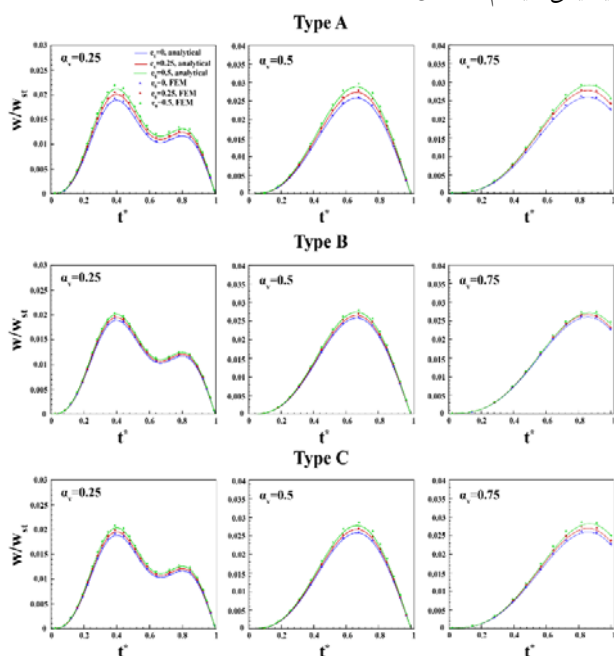


Figure 5: Effect of porosity coefficient on the dimensionless dynamic deflection of asphalt pavement system for different values of velocity parameter.

در شکل ۶، آثار تغییرات دما بر پاسخ دینامیکی سیستم روسازی با لایه آسفالتی متخلخل برحسب پارامترهای مختلف

شکل ۳: مقایسه فرکانس طبیعی های بدون بعد ورق متخلخل.

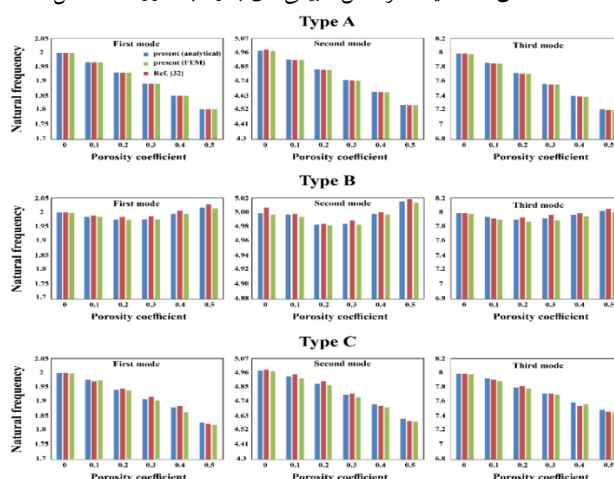


Figure 3: A comparative study of the dimensionless natural frequencies of porous plate.

۵- نتایج

بعد از نشان دادن درستی روابط استخراج شده و روش حل، به بررسی آثار پارامترهای مختلف مانند نسبت تخلخل، ضریب میرایی، تغییرات دما، و پارامترهای سرعت و فرکانس تحریک بار ترافیکی متحرک هارمونیک بر پاسخ دینامیکی سیستم روسازی با لایه آسفالت متخلخل پرداخته می شود.

شکل ۴: مقایسه فرکانس طبیعی های بدون بعد ورق الاستیک تحت شرایط دمایی

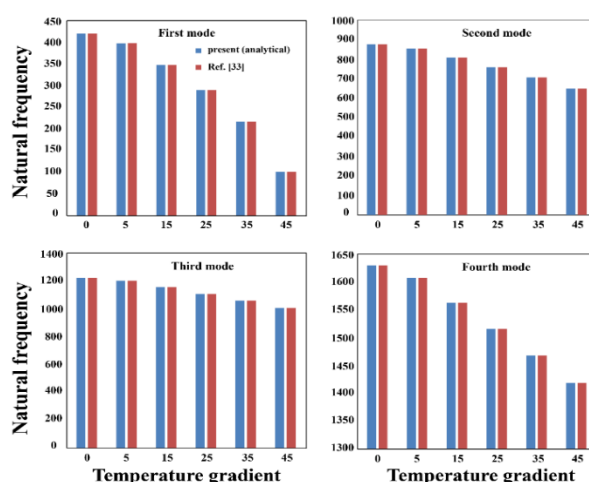


Figure 4: A comparative study of the natural frequencies of elastic plate under different temperature variations.

در شکل (۵)، آثار نسبت تخلخل و سه مدل توزیع تخلخل بر رفتار پاسخ دینامیکی بدون بعد سیستم روسازی با لایه آسفالت

حسب سرعت بدون بعد مختلف با فرض $\Delta T = 0$ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر فرکانس تحریک، نوسانات پاسخ دینامیکی در بازه زمانی افزایش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که هنگامی فرکانس تحریک بار هارمونیک با فرکانس طبیعی سیستم روسازی برابر شود پاسخ دینامیکی سیستم به صورت محسوس افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیکی لایه آسفالتی، پاسخ دینامیکی کل سازه به صورت محسوس کاهش یابد که ناشی از آثار میرایی بر پاسخ دینامیکی سیستم بوده است.

شکل ۷. آثار فرکانس تحریک بار ترافیکی هارمونیک و میرایی لایه آسفالت بر پاسخ دینامیکی سیستم روسازی.

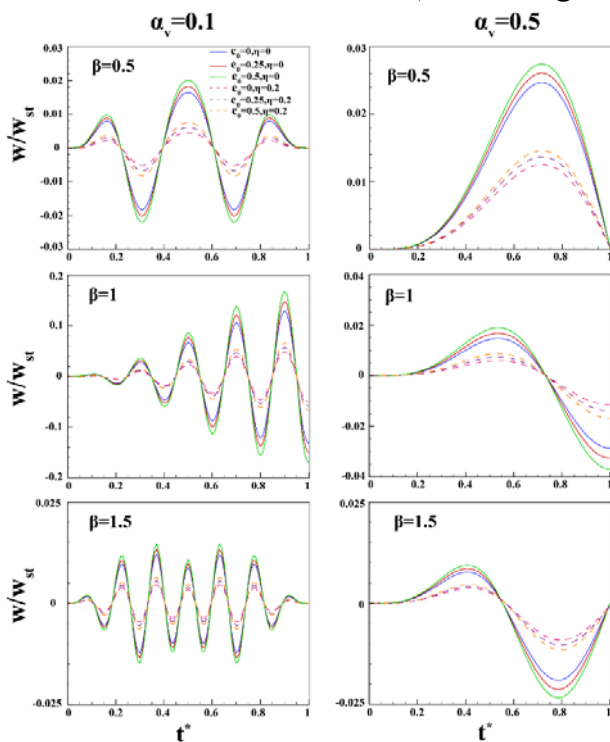


Figure 7: Effect of excitation frequency parameter on the dimensionless dynamic deflection of viscoelastic asphalt pavement system for different values of velocity parameter and porosity coefficient.

۶. نتیجه گیری

سرعت بار متحرک با فرض $\beta = 0, e_0 = 0.2, \eta = 0$ برای سه مدل توزیع تخلخل بررسی شده است. به علاوه نتایج عددی المان محدود ناشی از شبیه سازی کامسول نیز در این شکل نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما، پاسخ دینامیکی سیستم روسازی افزایش پیدا می‌کند. این امر ناشی از این است که با افزایش دما، سختی سازه کم شده و پاسخ دینامیکی افزایش می‌یابد.

شکل ۶. آثار تغییرات دما و سرعت بار متحرک بر تغییرات پاسخ دینامیکی سیستم روسازی آسفالت

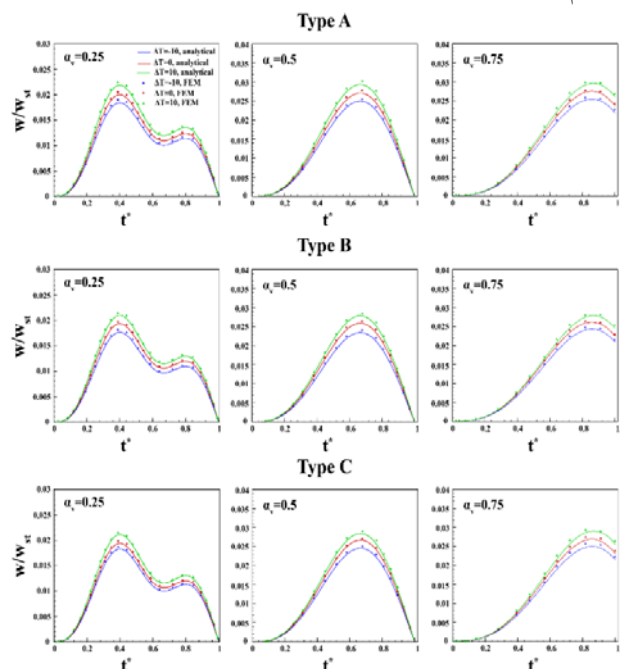


Figure 6: Effect of temperature variation on the dimensionless dynamic deflection of asphalt pavement system for different values of velocity parameter.

سرانجام در شکل (۷)، آثار پارامتر فرکانس تحریک بار متحرک هارمونیک و ضریب میرایی لایه آسفالتی بر پاسخ دینامیکی بدون بعد سیستم روسازی با لایه آسفالت ویسکوالاستیک متخلخل برای مدل توزیع تخلخل یکنواخت بر

۷. مراجع

- [1] Haponiuk B, Zbiciak A. 2016 Mechanistic-empirical asphalt pavement design considering the effect of seasonal temperature variations. *Arch Civ Eng*, **62**.
 - [2] Si C, Chen E, You Z, Zhang R, Qiao P, Feng Y. 2019 Dynamic response of temperature-seepage-stress coupling in asphalt pavement. *Constr Build Mater*, **211**, 824–36.
 - [3] Roja KL, Padmarekha A, Krishnan JM. 2019 Influence of warm mix additive and loading rate on rutting of warm mix asphalt pavement. *Int J Pavement Eng*, **20**, 366–81.
 - [4] Guan Z, Zhuang C, Zhang P. Asphalt Pavement 2019 Mechanical Response of Accelerated Pavement Testing in Single-Axle and Dual-Axle Loading Modes. *Adv Civ Eng*.
 - [5] Kushwaha P, Swami BL. 2019 A Study on Moisture Susceptibility of Foamed Bitumen Mix Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Transp Infrastruct Geotechnol*, **6**, 89–104.
 - [6] Ayazi MJ, Moniri A, Barghabany P. 2017 Moisture susceptibility of warm mixed-reclaimed asphalt pavement containing Sasobit and Zycotherm additives. *Pet Sci Technol*, **35**, 890–5.
 - [7] You L, Yan K, Hu Y, Liu J, Ge D. 2018 Spectral element method for dynamic response of transversely isotropic asphalt pavement under impact load. *Road Mater Pavement Des*, **19**, 223–38.
 - [8] Ameri M, Mansourian A, Khavas MH, Aliha M, Ayatollahi MR. 2011 Cracked asphalt pavement under traffic loading—A 3D finite element analysis. *Eng Fract Mech*, **78**, 1817–26.
 - [9] Wu J, Liang J, Adhikari S. 2014 Dynamic response of concrete pavement structure with asphalt isolating layer under moving loads. *J Traffic Transp Eng*, **1**, 439–47.
 - [10] Wang H, Li M. 2016 Comparative study of asphalt pavement responses under FWD and moving vehicular loading. *J Transp Eng*, **142**, 4016069.
 - [11] Eghbalpoor R, Baghani M, Shahsavari H. 2019 An implicit finite element framework considering damage and healing effects with application to cyclic moving load on asphalt pavement. *Appl Math Model*, **70**, 139–51.
 - [12] Liu X, Zhang X. 2019 Asphalt pavement dynamic response under different vehicular speeds and pavement roughness. *Road Mater Pavement Des*, 1–22.
- در این پژوهش پاسخ دینامیکی سیستم روسازی با در نظر گرفتن لایه آسفالتی متخلخل تحت بار ترافیکی هارمونیکی با سرعت‌های مختلف در محیط دمایی به صورت تحلیلی و عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مدلسازی تحلیلی سیستم از تئوری کلاسیک ورق‌ها استفاده شد. با در نظر گرفتن روابط تخلخل و کرنش حرارتی در ماتریس‌های تنش-کرنش و استفاده از اصل همیلتون معادلات دینامیکی به دست آمد. با کمک بسط‌های سری فوریه، با توجه به شرایط مرزی در نظر گرفته شده، معادلات دینامیکی جزئی به معادلات دینامیکی دیفرانسیلی معمولی تبدیل شد و با استفاده از تبدیل لاپلاس، پاسخ دینامیکی سیستم به دست آمد و بر حسب پارامترهای موثر مانند نسبت تخلخل، ضریب میرایی لایه آسفالت، نوع تخلخل، تغییرات دمای محیط و سرعت‌های مختلف بارگذاری مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین از نرم‌افزار شبیه‌سازی المان محدود برای اعتبار سنجی نتایج علاوه بر مقالات انتشار یافته استفاده شد. برخی از نتایج مهم بدست آمده از این پژوهش به صورت زیر است:
- تغییرات دما سبب کاهش سختی سیستم روسازی شده و سرانجام پاسخ دینامیکی سیستم روسازی افزایش پیدا می‌کند.
 - با افزایش نسبت تخلخل، پاسخ دینامیکی سیستم روسازی برای هر سه مدل تخلخل افزایش پیدا می‌کند.
 - هنگامی که فرکانس تحریک بار ترافیکی متحرک هارمونیکی برابر با فرکانس طبیعی سیستم روسازی شد، پاسخ دینامیکی سیستم روسازی با لایه آسفالت متخلخل به شدت افزایش پیدا کرد.
 - به این دلیل که سختی کلی مدل توزیع غیریکنواخت متقارن بیشتر از دو مدل دیگر است بنابراین پاسخ دینامیکی سیستم روسازی با در نظر گرفتن این مدل برای توزیع تخلخل لایه آسفالت کمتر تغییر می‌کند.
 - مشاهده شد که با در نظر گرفتن خاصیت ویسکوالاستیک در لایه آسفالت، دامنه پاسخ دینامیکی سیستم روسازی به صورت محسوسی کاهش پیدا می‌کند.

- Artificial neural networks approach to predicting rut depth of asphalt concrete by using of visco-elastic parameters. *Constr Build Mater*, **158**, 873–82.
- [24] Behbahani H, Ziari H, Kamboozia N. 2016 Evaluation of the visco-elasto-plastic behavior of glasphalt mixtures through generalized and classic Burger's models modification. *Constr Build Mater*, **118**, 36–42.
- [25] Arabani M, Kamboozia N. 2013 Simulating the visco-elasto plastic behavior of glasphalt mixtures by using of modified Burger's model. *Tech J Eng Appl Sci*, **3**, 678.
- [26] Thang PT, Nguyen-Thoi T, Lee D, Kang J, Lee J. 2018 Elastic buckling and free vibration analyses of porous-cellular plates with uniform and non-uniform porosity distributions. *Aerosp Sci Technol*, **79**, 278–87.
- [27] Şimşek M, Kocatürk T, Akbaş ŞD. 2012 Dynamic behavior of an axially functionally graded beam under action of a moving harmonic load. *Compos Struct*, **94**, 2358–64.
- [28] Hosseini M, Jamalpoor A. 2015 Analytical Solution for Thermomechanical Vibration of Double-Viscoelastic Nanoplate-Systems Made of Functionally Graded Materials. *J Therm Stress*, **38**, 1428–56.
- [29] Timoshenko SP, 1959 Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells. *McGraw-hill*.
- [30] Beskou ND, Theodorakopoulos DD. 2011 Dynamic effects of moving loads on road pavements: a review. *Soil Dyn Earthq Eng*, **31**, 547–67.
- [31] Shahsavari D, Karami B, Janghorban M, Li L. 2017 Dynamic characteristics of viscoelastic nanoplates under moving load embedded within visco-Pasternak substrate and hygrothermal environment. *Mater Res Express*, **4**, 85013.
- [32] Xue Y, Jin G, Ma X, Chen H, Ye T, Chen M, et al. 2019 Free vibration analysis of porous plates with porosity distributions in the thickness and in-plane directions using isogeometric approach. *Int J Mech Sci*, **152**:346–62.
- [33] Geng Q, Li Y. 2012 Analysis of dynamic and acoustic radiation characters for a flat plate under thermal environments. *Int J Appl Mech*, **4**, 1250028.
- [13] Willway T, Baldachin L, Reeves S, Harding M, McHale M, Nunn M. 2008 The effects of climate change on highway pavements and how to minimise them: Technical report. *Eff Clim Chang Highw Pavements How to Minimise Them Tech Rep*, **1**, 1–111.
- [14] Geng L, Wang X, Xu Q. 2016 Thermal stress of asphalt pavement based on dynamic characteristics of asphalt mixtures. *Int J Pavement Res Technol*, **9**, 363–7.
- [15] Wang W, Wang L, Xiong H, Luo R. 2019 A review and perspective for research on moisture damage in asphalt pavement induced by dynamic pore water pressure. *Constr Build Mater*, **204**, 631–42.
- [16] Xue Q, Liu L. 2013 Hydraulic-stress coupling effects on dynamic behavior of asphalt pavement structure material. *Constr Build Mater*, **43**, 31–6.
- [17] Hossain MI, Yadavalli JPS, Pan J, Azam HM. 2019 Molecular-Dynamics Simulation Approach to Identifying PAH Release from Asphalt Concrete Pavements due to Mechanical and Environmental Factors. *J Transp Eng Part B Pavements*, **145**, 4019023.
- [18] Ding Y, Wang H. 2019 FEM-BEM analysis of tyre-pavement noise on porous asphalt surfaces with different textures. *Int J Pavement Eng*, **20**, 1090–7.
- [19] Ma Y, Chen X, Geng Y, Zhang X. 2020 Effect of Clogging on the Permeability of Porous Asphalt Pavement. *Adv Mater Sci*.
- [20] Wang D, Liu P, Leng Z, Leng C, Lu G, Buch M, et al. 2017 Suitability of PoroElastic Road Surface (PERS) for urban roads in cold regions: Mechanical and functional performance assessment. *J Clean Prod*, **165**, 1340–50.
- [21] Srirangam SK, Anupam K, Casey D, Liu X, Kasbergen C, Scarpas A. 2016 Evaluation of Structural Performance of Poroelastic Road Surfacing Pavement Subjected to Rolling–Truck Tire Loads. *Transp Res Rec*, **2591**:42–56.
- [22] Kamboozia N, Ameri M, Hosseinian SM. 2020 Statistical analysis and accident prediction models leading to pedestrian injuries and deaths on rural roads in Iran. *Int J Inj Contr Saf Promot*, 1–17.
- [23] Kamboozia N, Ziari H, Behbahani H. 2018

Thermo-dynamic response of porous asphalt pavement system subjected to a moving harmonic load

Mohsen Rostamkhani ¹, Neda Kamboozia ^{*2}, Mahmoud Ameri ³

1.M .sc. student, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

2.Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran,

3.Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran

Abstract

Because of having amazing mechanical physical properties including noise pollution reduction, quiet, reliability, most cost-effective, sustainable and lasting life, asphalt pavement system has been utilized for parking lots, roadways, airstrips by the most state and federal governments highly prefer asphalt pavement by many civil engineers. Generally, asphalt pavement is made up of sand, stone (aggregate), liquid (petroleum) asphalt and additives. Accordingly, the main objective of this article is to analyze the thermo-dynamic behavior of porous viscoelastic asphalt pavement system under a moving harmonic load based on the classical plate theory. The asphalt pavement system is modeled as a rectangular sandwich plate structure. Three states of porosity distribution pattern, i.e., uniform porosity, non-uniform symmetric porosity, non-uniform asymmetric porosity distributions are considered for porous asphalt layer which are supposed to vary along the in-plane and thickness directions. The equations of motion are extracted in accordance with Hamilton's variational principle and then solved using the expanded Fourier series. The accuracy and correctness of the extracted formulation are firmly demonstrated by comparing the data accessible in the literature and finite element simulation COMSOL Multiphysics®. In this study, the dynamic response of the asphalt pavement system was evaluated analytically and numerically by considering the porous asphalt layer under the harmonic load at various velocities in a thermal environment. The classical theory of plates was used for the analytical modeling of the system. The dynamic equations were derived in view of the relations for porosity and thermal strain in the stress-strain matrices in combination with Hamilton's principle. With the aid of Fourier series expansions, and given the considered boundary conditions, the partial dynamic equations were transformed into differential dynamic equations. Furthermore, the dynamic response of the system was obtained using Laplace transform, which was then evaluated in terms of effective parameters. A finite element simulation software was also used to validate the results against the published articles. Parameter studies reveal the impacts of the velocity and the excitation frequency of the harmonic moving load, porosity distributions, and temperature changes on the dynamic response of the pavement system. According to the conducted studies thus far, the dynamic behavior of asphalt pavement system is inevitably affected by such outcomes. Furthermore, the results demonstrated that non-uniform symmetric porosity case is more suitable than the other two types of porosity, the temperature changes lead to a softer asphalt pavement system, with increasing porosity, the dynamic response of the system rises in all the cases of porosity distributions and the amplitude of nondimensional dynamic deflection is directly proportional to the frequency of excitation up to the resonance. It is seen that for a smaller velocity parameter in this case, i.e. $\alpha = 0.1$, and with increasing frequency parameter, i.e. from $\beta = 0$ to resonance $\beta = 1$, higher dimensionless dynamic deflections are observed. However, a reversed behavior is displayed if the excitation frequency parameter surpasses the resonance. For $\beta \neq 0$ (moving harmonic load), and a predetermined excitation frequency, the number of oscillations is inversely proportionate to the velocity parameter. Accordingly, a twofold increase in the velocity parameter halves the number of oscillations as observed in the deflection time response.

Keywords: Asphalt Pavement System, Dynamic Response, Porosity, Harmonic Moving Load, Temperature Changes.