

محاسبه‌ی بازگشتی مدول کشسانی لایه‌های روسازی به روش ترکیبی دیفرانسیل کوادرچر و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی

احمد حیدری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمود ملکوتی علون آبادی* (استادیار)

سید حامد معراجی (استادیار)

پرویز ملک زاده (استاد)

سینا راهش خواه (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

مهندسی عمران شریف، تابستان (۱۳۹۹)
دوره‌ی ۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۳۷-۴۵

ارزیابی روسازی‌های در حال بهره‌برداری با استفاده از آزمایش سقوط وزنه‌ی خیزسنج از ضروری‌ترین مؤلفه‌های سیستم مدیریت روسازی در بسیاری از کشورهاست. تخمین ویژگی‌های لایه‌ی روسازی در حال خدمت به منظور تخمین عمر باقیمانده‌ی روسازی و همچنین عملیات نگهداری روسازی، همواره مورد توجه پژوهشگران و مهندسان روسازی بوده است. از طرف دیگر، محاسبات بازگشتی به طور گسترده به منظور تخمین ویژگی‌های لایه‌ی روسازی استفاده می‌شود. در اغلب روش‌های محاسبات بازگشتی، از نرم‌افزارهای تجاری، نظیر: آباکوس، انسیس و غیره برای به دست آوردن توزیع تنش، کرنش و جابه‌جایی‌ها استفاده می‌شود. اما مسئله‌ی مذکور، ترکیب آن با موتور بهینه‌سازی را با مشکل مواجه کرده و الگوریتم‌های ذکر شده نیاز به استفاده از داده‌های تحلیلی مصنوعی از قبل تولید شده برای فضای جستجو دارند. در نتیجه، تعداد تکرارها زیاد می‌شود و زمان محاسبات افزایش می‌یابد. در نوشتار حاضر، از روش عددی دیفرانسیل کوادرچر (DQ) برای تحلیل روسازی استفاده شده است. با ترکیب روش اخیر و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی، یک مدل محاسباتی کارا برای محاسبه‌ی تغییرمکان سطح رویه به گونه‌ی که بتواند به طور مؤثری زمان محاسباتی برای محاسبه‌ی معکوس را کاهش دهد، گسترش داده شده است. نتایج حاصل از مطالعه‌ی حاضر با جمعیت متفاوت نشان داد که در روش مورد نظر می‌توان در کمتر از ۲۰ تکرار و با خطای بیشینه‌ی ۱۳٪ به مدول کشسانی لایه‌های روسازی دست یافت.

amet6889@chmail.ir
malakooti@pgu.ac.ir
h.meraji@pgu.ac.ir
malekzadeh@pgu.ac.ir
cnaa.rk@gmail.com

واژگان کلیدی: روش دیفرانسیل کوادرچر، الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی، محاسبات معکوس، FWD.

۱. مقدمه

در چند نقطه از سطح روسازی، تغییرمکان توسط حسگرهای تعبیه شده در FWD اندازه‌گیری می‌شود.

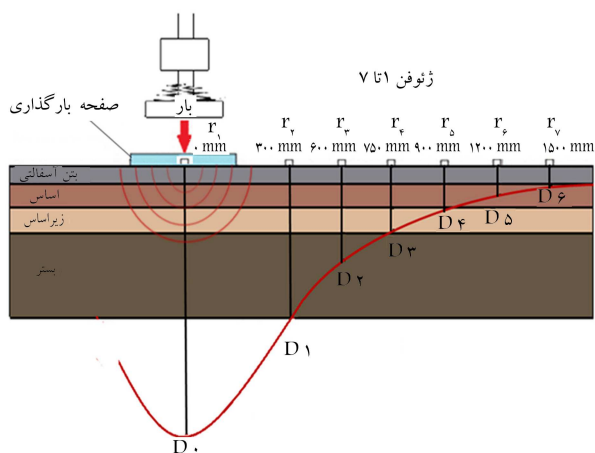
برای تخمین مدول کشسان سازه‌ی لایه‌ی روسازی از محاسبات بازگشتی استفاده می‌شود. محاسبات بازگشتی به طور گسترده به منظور تخمین ویژگی‌های لایه‌ی روسازی تاکنون استفاده شده است. با استفاده از الگوریتم تکامل تفاضلی، روش محاسبات بازگشتی برای تحلیل سازه‌ی روسازی باند فرودگاه استفاده شده است.^[۱] برای ایجاد روش محاسبات بازگشتی تاکنون از الگوریتم‌های ژنتیک و الگوریتم‌های بهبودیافته و ترکیبی ژنتیک نیز بارها استفاده شده است. سنسنی^۲

از سال ۱۹۷۰، آزمایش سقوط وزنه‌ی خیزسنج (FWD)^۱ به طور گسترده به عنوان یک روش غیرمخرب برای محاسبه‌ی تغییرمکان سطح روسازی استفاده شده است. شکل ۱، ارزیابی سازه‌ی روسازی یا استفاده از FWD را نشان می‌دهد. در سیستم ذکر شده، یک وزنه به جرم m از یک ارتفاع مشخص بر روی روسازی رها و اثر آن به وسیله‌ی سیستم فنر و صفحه‌ی بارگذاری به روسازی منتقل می‌شود. هم‌زمان

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۹/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱۰/۲۳، پذیرش ۱۳۹۷/۱۱/۱۶.

DOI:10.24200/J30.2019.52331.2466



شکل ۱. ارزیابی سازه‌ی روسازی با استفاده از آزمایش سقوط وزنه‌ی خیزسنج (FWD).

روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی استفاده کردند.^[۱۰] همچنین گروسکی و وزاریکی (۲۰۱۷) با استفاده از الگوریتم محاسبات معکوس چندسطحی برای تعیین پارامترهای سازه‌ی روسازی استفاده کردند.^[۱۱] سیممی^۹ و همکاران (۲۰۱۶) هم محاسبات بازگشتی را برای تحلیل روسازی فرودگاه مطالعه کردند و بهینه‌سازی مورد استفاده در پژوهش مذکور الگوریتم فراابتکاری کلونی مورچه بوده است.^[۱۲] روش‌های محاسبات بازگشتی از نظر سیستم روسازی در نظر گرفته شده، روش تحلیلی و یا عددی مورد استفاده برای تحلیل روسازی، انتخاب حدس اولیه، محدوده‌ی مدول، پارامترهای محاسبات معکوس، آرایش حسگر و الگوریتم بهینه‌سازی استفاده شده برای محاسبه با یکدیگر متفاوت هستند.^[۱۳] اغلب روش‌های ذکر شده از تئوری لایه‌ی کشسان و یا از نرم‌افزارهای تجاری موجود، نظیر: آباکوس، انسیس، کنلایر و غیره برای تحلیل روسازی انعطاف‌پذیر استفاده می‌کنند.^[۱۴-۱۶] روش‌های اخیر، معمولاً با مجموعه‌ی از مدول حدسی اولیه شروع می‌شوند. تغییرمکان محاسبه شده با مدول‌های حدسی با تغییرمکان اندازه‌گیری شده با FWD مقایسه و تابع خطا ارزیابی می‌شود. مجموعه‌ی از مدول بعدی پذیرفته شده در فرایند تکرار انتخاب می‌شود، به گونه‌ی که اختلاف بین تغییرمکان محاسبه شده با اندازه‌گیری شده کاهش یابد. این فرایند تکرار تا زمانی که تطابق رضایت‌بخش حاصل شود، ادامه می‌یابد. فرایند تکرار از محدودیت‌هایی نظیر وابستگی به حدس اولیه و زیاد بودن مدت زمان تحلیل رنج می‌برند.^[۱۷، ۱۸] الگوریتم استفاده شده در پژوهش حاضر برای محاسبات بازگشتی مدول ارتجاعی لایه‌های روسازی، روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونی است. این الگوریتم با الهام از علم موسیقی و یکی از زیرمجموعه‌های آن، که علم هارمونی است، توسط گیم و همکاران (۲۰۰۱) ارائه شد.^[۱۹] هارمونی به مجموعه‌ی نت‌هایی گفته می‌شود که به موسیقی اصلی اضافه می‌شود تا موسیقی گوش‌نازتری شنیده شود. در واقع، نحوه‌ی عملکرد الگوریتم ذکر شده به این صورت است که بهترین هارمونی را باید برای اتصال به موسیقی اصلی در فضای جستجو بیابد. با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و ترکیب آن با موتور شبیه‌سازی می‌توان به صورت معکوس به ضرایب ارتجاعی مجهول لایه‌های روسازی دست یافت. استفاده از نرم‌افزارهای تجاری به منظور شبیه‌سازی عددی برای محاسبه‌ی تغییر سطح روسازی به دلیل پیچیده بودن ترکیب آن به موتور بهینه‌سازی منجر به افزایش هزینه‌ی محاسبات می‌شود. زیرا در روش‌های اشاره شده نیاز به پایگاه داده‌ی مصنوعی از پیش تولید شده با استفاده از نرم‌افزار و همچنین استفاده از شبکه‌ی عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی است. بنابراین برای تولید جمعیت تحلیل باید با دسته‌ی مدول‌های تخمینی متفاوت، نرم‌افزار را اجرا کرد تا جمعیت لازم برای تحلیل معکوس فراهم شود. فرایند اخیر، هزینه‌ی محاسبات را افزایش می‌دهد. توانایی حل تحلیلی و یا عددی برای مسئله تحت بارگذاری با شرایط اولیه و مرزی معلوم، گام اولیه و مهم در تحلیل مسائل معکوس است. روش‌های عددی متعددی برای تحلیل سازه‌های چندلایه با بارگذاری سطحی از جمله روسازی راه به وسیله‌ی برخی پژوهشگران استفاده شده است.^[۲۰-۲۶] با به کارگیری روش‌های عددی می‌توان پاسخ سازه‌ی روسازی را با هم‌خوانی مناسبی با رفتار واقعی مدل‌سازی کرد. در حال حاضر روش‌های عددی بسیاری برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده‌های فیزیکی گسترش یافته است، که از میان آنها می‌توان به روش‌های اجزاء محدود، اجزاء مرزی، تفاضل محدود، المان مجزا، حجم محدود و روش دیفرانسیل کوادرچر اشاره کرد. روش عددی دیفرانسیل کوادرچر به طور موفقیت‌آمیزی برای تحلیل سازه‌های چندلایه و روسازی استفاده شده است. نرخ هم‌گرایی سریع، سرعت بالا و دقت آن در مطالعات متعددی نشان داده شده است.^[۲۷-۲۸] هدف اصلی پژوهش حاضر، توسعه‌ی یک مدل کارای محاسباتی به منظور تخمین مدول کشسانی لایه‌های روسازی به شکل بازگشتی است. بدین منظور از روش عددی دیفرانسیل کوادرچر که صحت،

و همکاران (۲۰۱۲) در مطالعه‌ی خود، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌ی عصبی و نرم‌افزار اجزاء محدود، ضخامت لایه‌ی اول و مدول کشسانی لایه‌های اول و دوم یک روسازی دولایه را با محاسبات معکوس به دست آوردند.^[۲] سنگاله^۳ و همکاران (۲۰۱۴) نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک و نرم‌افزار MultiSmart^{۳D}، ضخامت لایه‌ها و مدول کشسانی یک روسازی دولایه را به شکل معکوس محاسبه کردند.^[۳] همچنین شیبر و اومنز^۴ (۲۰۱۶) با استفاده از روش ترکیبی بهینه‌سازی به وسیله‌ی الگوریتم ژنتیک با روش طاقچه‌های پی در پی، مدلی برای محاسبات بازگشتی جهت برآورد تخمینی شرایط سازه‌ی روسازی پل عرضه کردند.^[۴] لی و وانگ (۲۰۱۷) نیز با گسترش روش ترکیبی شبکه‌ی عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک، محاسبات بازگشتی ضریب ارتجاعی لایه‌های روسازی را این بار به صورت ویسکوکشسان استفاده کردند.^[۵] روش محاسبات بازگشتی نه فقط با استفاده از الگوریتم قدیمی و قدرتمند ژنتیک، بلکه با ترکیب روش‌های عددی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی دیگر، مانند: الگوریتم ازدحام ذرات، داده‌کاوی، الگوریتم کلونی مورچه و الگوریتم محاسبات معکوس چندسطحی با استفاده از رگرسیون شبکه‌ی عصبی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تحلیل سازه‌ی و بررسی روسازی مطالعه شده است. گوبالاکریشنان^۵ (۲۰۰۹) نیز با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و محاسبات معکوس با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، به محاسبه‌ی معکوس مدول لایه‌های روسازی اقدام کرد. پژوهش اخیر شامل مطالعه‌ی موردی بر روسازی فرودگاه نیز می‌شد.^[۶] سالتان و همکاران (۲۰۱۱) هم با استفاده از محاسبات بازگشتی به وسیله‌ی داده‌کاوی، نسبت پواسون و همچنین ضریب ارتجاعی لایه‌های روسازی را تخمین زدند.^[۷] گوبالاکریشنان^۶ و پاپادوپولوس (۲۰۱۱) نیز با استفاده از روش محاسبات بازگشتی برای رسیدن به روسازی قابل اعتماد استفاده کردند. همچنین از روش اجزاء محدود برای ایجاد هوش مصنوعی استفاده شده است. نکته‌ی حائز اهمیت استفاده از رگرسیون شبکه‌ی عصبی به جای شبکه‌ی عصبی مصنوعی برای تحلیل روسازی و حل مشکل سرعت پایین روش عددی اجزاء محدود است.^[۸] کارگاه - استادی و استوفلز^۷ (۲۰۱۵) با استفاده از آزمایش میدانی FWD به تعیین پارامترهای روسازی پرداختند و با تکیه بر روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی، ضریب ارتجاعی لایه را با استفاده از محاسبات بازگشتی با تخمینی نزدیک محاسبه کردند.^[۹] تارفدر^۸ و همکاران (۲۰۱۵) نیز به جای استفاده از روش کارگیری از روسازی، که روشی مخرب برای به دست آوردن ضخامت لایه‌هاست، از

یکنواخت قائم در سطح $Z = 0$ و در ناحیه دایره‌ای شکل به شعاع a اعمال شده است.

در حالت سه‌بُعدی با فرض تقارن محوری، معادلات حاکم بر حسب جابه‌جایی را می‌توان به صورت روابط ۱ و ۲ نوشت:

$$(\alpha + 2\beta) E \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \beta E \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + (\alpha + \beta) E \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial z} + \frac{(\alpha + 2\beta) E}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{(\alpha + 2\beta) E}{r^2} u = 0 \quad (1)$$

$$\beta E \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + (\alpha + 2\beta) E \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + (\alpha + \beta) E \frac{\partial^2 u}{\partial r \partial z} + \frac{\beta E}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{(\alpha + \beta) E}{r} \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

که در آنها، α از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید:

$$\alpha = \frac{\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \quad \beta = \frac{\nu}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

همچنین در آنها، E مدول کشسانی و ν نسبت پواسون است.

۳. روش دیفرانسیل کوادرچر

روش دیفرانسیل کوادرچر (DQ) با در نظر گرفتن مقادیر وزنی مناسب همانند روش مرسوم انتگرال کوادرچر، مشتق تابع را در هر نقطه به صورت جمع خطی تمام مقادیر تابع در راستای خط شبکه تقریب می‌زند. با استفاده از روش DQ، [۲۶] فرم گسسته‌ی معادلات حاکم روابط ۱ و ۲ را می‌توان به صورت روابط ۴ و ۵ بیان کرد:

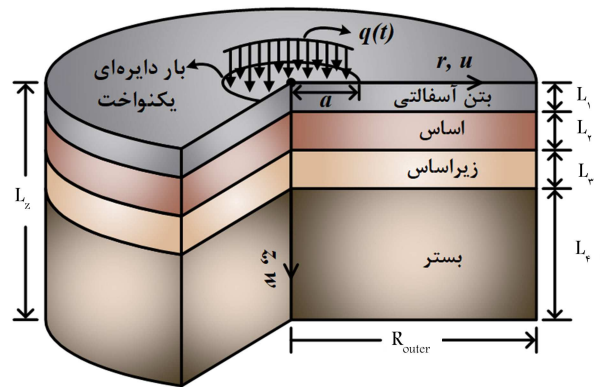
$$(\alpha + 2\beta) E \sum_{m=1}^{N_r} B_{im}^r u_{mj} + \beta E \sum_{n=1}^{N_z} B_{jn}^z u_{in} + (\alpha + \beta) E \sum_{m=1}^{N_r} \sum_{n=1}^{N_z} A_{im}^r A_{jn}^z w_{mn} + \frac{(\alpha + 2\beta) E}{r_i} \sum_{m=1}^{N_r} A_{im}^r u_{mj} + \frac{(\alpha + 2\beta) E}{r_i^2} u_{ij} = 0 \quad (4)$$

$$\beta E \sum_{m=1}^{N_r} B_{im}^r w_{mj} + (\alpha + 2\beta) E \sum_{n=1}^{N_z} B_{jn}^z w_{in} + (\alpha + \beta) E \sum_{m=1}^{N_r} \sum_{n=1}^{N_z} A_{im}^r A_{jn}^z u_{mn} +$$

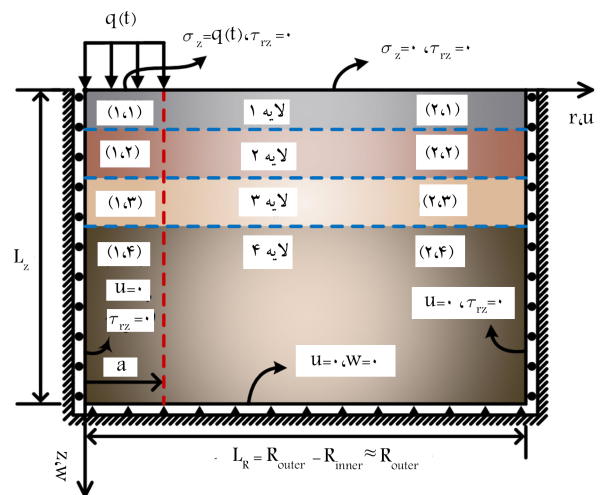
سرعت و دقت آن در پژوهش پیشین نویسندگان، [۲۶] به اثبات رسیده است، به عنوان موتور شبیه‌سازی محاسبات عددی برای محاسبه‌ی تغییرمکان روسازی چندلایه با رفتار کشسان استفاده شده است. روش عددی دیفرانسیل کوادرچر قادر است با سرعت بالا، تغییرمکان سطح رویه را محاسبه کند و به طور مؤثری زمان محاسباتی (هزینه‌ی محاسبات) محاسبه‌ی بازگشتی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. سپس با ترکیب روش دیفرانسیل کوادرچر با موتور بهینه‌سازی جستجوی هارمونی، برنامه‌ی در محیط نرم‌افزار متلب^۱ فراهم شده است که قادر است مدول کشسانی یک روسازی چندلایه با رفتار کشسان را به شکل معکوس و با دقت و سرعت مناسب تخمین بزند. استفاده از مدل مذکور این امکان را به مهندسان روسازی می‌دهد تا با تخمین مدول کشسانی لایه‌های مختلف روسازی (به صورت غیرمخرب)، ظرفیت سازه‌ی روسازی در حال خدمت را بررسی و کمک شایانی به تصمیم‌گیری‌های لازم در سیستم مدیریت روسازی کند.

۲. معادلات حاکم

یک روسازی ۴ لایه‌ی متقارن محوری با شعاع خارجی R_{outer} و ارتفاع کلی L_z به همراه شرایط مرزی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. بارگذاری



شکل ۲. مدل متقارن محوری روسازی ۴ لایه.



شکل ۳. شرایط مرزی تقارن محوری روسازی.

۴. الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی

برای برآورد پارامترهای ضروری هر لایه، تابع خطای بین تغییرمکان سطح روسازی با تغییرمکان محاسبه شده از موتور شبیه‌ساز عددی باید به میزان کمینه برسد. بدین منظور از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. براساس روش مذکور، با کمینه‌سازی تابع هدف ارائه شده در رابطه‌ی ۱۳ می‌توان پارامترهای نامعلوم را محاسبه کرد:

$$O.F = \min \left(\sum_{i=1}^m (D_i - d_i)^2 \right) \quad (13)$$

$$E_{\min_i} \leq E_i \leq E_{\max_i}$$

که در آن، m تعداد تغییرمکان‌های اندازه‌گیری شده توسط ژئوفن‌ها در نقاط مشخص در امتداد روسازی است. D_i و d_i نیز به ترتیب تغییرمکان‌های محاسبه شده با استفاده از موتور شبیه‌ساز عددی و تغییرمکان‌های اندازه‌گیری شده‌ی حسگر آم در امتداد محور بارگذاری سطح روسازی هستند. E_{\min_i} و E_i ، E_{\max_i} مقادیر مدول کشسانی و حد بالا و پایین آن در هر لایه هستند.

روش بهینه‌سازی جستجوی هارمونی که یک روش شناخته شده است، به منظور کمینه‌سازی تابع خطای رابطه‌ی ۱۳ استفاده شده است. مدول کشسانی لایه‌های روسازی مطابق رابطه‌ی ۱۴ در نظر گرفته شده‌اند:

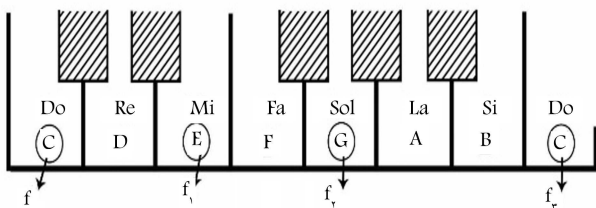
$$P = [E_1 \ E_2 \ \dots \ E_{N_1}] \quad (14)$$

که در آن، $E_1 = (1, 2, \dots, N_1)$ مدول یانگ لایه‌ی i ام است.

الگوریتم HS، از علم هارمونی که زیرمجموعه‌ی بی از علم موسیقی به حساب می‌آید و روش ریاضی‌گونه‌ی بی دارد، الهام گرفته شده است. در علم هارمونی، مباحث عمیق ریاضی و فیزیک و مخصوصاً فیزیک صوت، استفاده می‌شود.

هارمونی به معنای هماهنگی است. در موسیقی، هارمونی به نت‌های مکملی گفته می‌شود که به موسیقی اصلی اضافه می‌شود تا فضاهای خالی درون موسیقی اصلی را پر و آن را گوش‌نازتر کند. بسیاری از موسیقی‌های گوش‌ناز اگر بدون هارمونی شنیده شوند، حتی برای عموم انسان‌ها نیز جذابیتی ندارند. اگر فرض بر این باشد که نت‌ی با بسامد f وجود دارد و قرار بر این است که با افزایش چند بسامد متفاوت دیگر زیبایی موسیقی افزایش یابد، که آنها f_1 ، f_2 و f_3 نام‌گذاری شوند، یافتن بهترین بسامدهای ممکن برای نت‌ها در واقع همان جستجویی است که در الگوریتم جستجوی هارمونی از آن استفاده می‌شود. برای مثال با فرض این‌که نت اصلی روی پیانو بر روی Do اجرا شود و هارمونی ایجاد شده بر روی Mi، Sol و Do قرار داشته باشد شکل ۴، ممکن است موسیقی شنیدنی‌تر شود.

بنابر آن‌چه گفته شده است، برای شروع به کار، ابتدا حافظه‌ی بی از پاسخ‌ها ایجاد می‌شود، که به آن حافظه‌ی هارمونی (HM) می‌گویند. هدف از اجرای الگوریتم HS،



شکل ۴. مثالی از نحوه‌ی ایجاد هارمونی بر روی پیانو.

$$\frac{\beta E}{r_i} \sum_{m=1}^{N_r} A_{im}^r w_{mj} + \frac{(\alpha + \beta) E}{r_i} \sum_{n=1}^{N_z} A_{jn}^z u_{in} = 0 \quad (5)$$

که در آنها، A_{ij}^α ، A_{ij}^β ضرایب وزنی مشتق مراتب اول و دوم و همچنین N_r و N_z و تعداد نقاط شبکه در راستاهای r و z هستند. همچنین $i = 2, 3, \dots, N_r - 1$ و $j = 2, 3, \dots, N_r - 1$ است.

فرم گسسته‌ی معادلات مرزهای $r = a$ و $r = R_{inner}$ که مربوط به المان‌های (۱،J) و (۲،J) و برای تمام لایه‌ها (J=۱،۲،۳،۴) است و در آنها تنش برشی و جابه‌جایی شعاعی برابر صفر لحاظ می‌شود، به صورت رابطه‌های ۶ و ۷ است:

$$u(r_i, z_j) = u_{ij} = 0 \quad (6)$$

$$\beta E \sum_{n=1}^{N_z} A_{jn}^z u_{in} + \beta E \sum_{m=1}^{N_r} A_{im}^r w_{mj} = 0 \quad (7)$$

که در آنها، $j = 1, 2, \dots, N_z$ و همچنین در المان (۱،J) مقدار $i=1$ و در المان (۲،J) مقدار $i = N_r$ است.

فرم گسسته‌ی معادلات مرز $z=0$ که مربوط به المان‌های (۱،۱) و (۲،۱) است و در آنها تنش قائم برابر بار قائم وارد شده و تنش برشی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود، به صورت روابط ۸ و ۹ است:

$$\alpha E \sum_{m=1}^{N_r} A_{im}^r u_{mj} + \frac{\alpha E}{r_i} u_{ij} + (\alpha + 2\beta) E \sum_{n=1}^{N_z} A_{jn}^z w_{in} - qH(a - r_i) \quad (8)$$

$$\beta E \sum_{n=1}^{N_z} A_{jn}^z u_{in} + \beta E \sum_{m=1}^{N_r} A_{im}^r w_{mj} = 0 \quad (9)$$

که در آنها، $i = 2, 3, \dots, N_r - 1$ و $j=1$ است.

فرم گسسته‌ی معادلات مرز افقی $z = L_z$ که مربوط به المان‌های (۱،۴) و (۲،۴) بوده و در آنها جابه‌جایی در دو جهت r و z ، صفر است ($u=w=0$) به صورت روابط ۱۰ و ۱۱ است:

$$u_{ij} = 0 \quad (10)$$

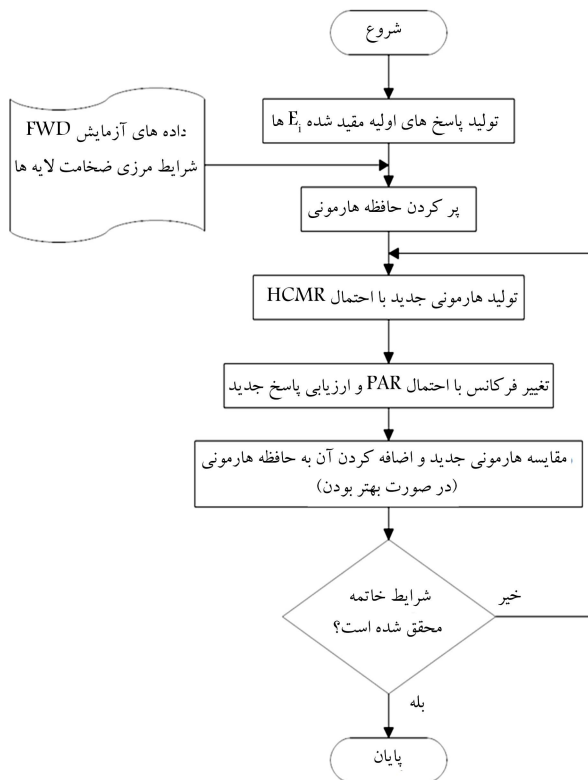
$$w_{ij} = 0 \quad (11)$$

که در آنها، $i = 2, 3, \dots, N_r - 1$ و $j = N_z$ است.

از معادلات حاکم گسسته شده و شرایط مرزی مرتبط در هر مسئله، تعداد $2 \times \sum_{I=1}^{N_I} N_{r,I} \times \sum_{J=1}^{N_J} N_{z,J}$ معادله و مجهول تشکیل می‌شود، که می‌توان آن را به فرم ماتریسی رابطه‌ی ۱۲ بیان کرد:

$$[K] \{U\} = \{q\} \quad (12)$$

که در آن، $[K]$ ، $\{U\}$ و $\{q\}$ به ترتیب ماتریس مربعی سختی کل، ماتریس ستونی درجه‌های آزادی و ماتریس ستونی بار خارجی مسئله هستند. براساس فرمولاسیون ارائه شده، برنامه‌ی رایانه‌ی در محیط نرم‌افزار متلب تهیه شده و معادله‌ی ۱۲ با استفاده از آن حل شده و مؤلفه‌های بردار $\{U\}$ به دست آمده است.



شکل ۵. فلوجارت پروسهی روش ترکیبی DQ-HS.

جدول ۱. پارامترهای روسازی سه لایه.

لایه	پارامترها	
	ضخامت (m)	نسبت پواسون مدول کشسانی (kPa)
آسفالت	۰/۱	۰/۳۵
اساس	۰/۲	۰/۳
بستر	∞	۰/۴

ارتجاعی را که به عنوان ورودی در موتور شبیه‌ساز برای محاسبه‌ی تغییرمکان استفاده شده بودند، را استخراج کند. بسیاری از نوشتارها که به داده‌های میدانی FWD و ضخامت لایه‌های روسازی (جهت اعتبارسنجی) دسترسی ندارند، از روش مذکور برای بررسی صحت و دقت مدل پیشنهادی استفاده می‌کنند.^[۲۰-۲۵] بیشتر پژوهش‌ها جهت افزایش سرعت هم‌گرایی و رسیدن به پاسخ در زمان کمتر، محدودی‌بی برای پاسخ‌ها در نظر گرفته می‌شود، که پاسخ قطعاً در محدوده‌ی ذکر شده قرار می‌گیرد و در حقیقت پاسخ خارج از آن مورد پذیرش نخواهد بود. در پژوهش حاضر، محدوده‌ی پاسخ مدول لایه‌ی آسفالتی بین ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. همچنین محدوده‌ی مقید شده برای پاسخ مدول لایه‌ی اساس مابین ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوپاسکال و قید لایه‌ی بستر برای پاسخ مدول ارتجاعی آن مابین ۵۰ تا ۱۵۰ کیلوپاسکال فرض شده است. خروجی مورد نیاز از موتور شبیه‌ساز DQ برای استفاده در روش محاسبات بازگشتی مدول کشسانی لایه‌های روسازی، جابه‌جایی در نقاط متناظر با آزمایش FWD است، که در جدول ۲ ارائه شده است.

در پژوهش حاضر، پارامتر احتمال ایجاد هارمونی (HCMR) برابر با ۰/۵ و پارامتر تغییر بسامد (PAR) برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شدند. نتایج به دست آمده از

یافتن هارمونی جدید است، که با سایر هارمونی‌های به دست آمده و هارمونی‌های موجود در HM مقایسه و بهترین‌ها انتخاب می‌شود.

احتمال استفاده از هارمونی‌های ذخیره شده در HM پارامتری را نشان می‌دهد، که به آن احتمال ایجاد هارمونی (HCMR) می‌گویند و به این صورت انجام می‌شود:

- با احتمال HCMR از مؤلفه‌های حافظه‌ی هارمونی استفاده می‌شود.
- با احتمال HCMR-۱ با اعداد تصادفی، هارمونی ساخته خواهد شد.
- پارامتر دیگری نیز در الگوریتم HS وجود دارد که همانند اپراتور جهش در الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند. این اپراتور را تغییر بسامد (PAR) می‌نامند. نحوه‌ی عملکرد این عملگر به این صورت است که:
- با احتمال PAR تغییرات جزئی در مؤلفه‌ی مورد نظر اعمال می‌شود.
- با احتمال PAR-۱ تغییری در مؤلفه اعمال نمی‌شود.

در نهایت هارمونی‌های ایجاد شده با جمعیت حافظه‌ی هارمونی مقایسه می‌شوند و بهترین‌ها، حافظه‌ی هارمونی جدید را تشکیل خواهند داد. این عمل تا جایی ادامه می‌یابد که تابع هدف (تابع خطا) تا حد قابل قبول کمینه شده باشد. مراحل اجرای الگوریتم جستجوی هارمونی به این صورت است:

- ۱- تولید پاسخ‌های اولیه، ارزیابی آنها و پرکردن حافظه‌ی هارمونی،
- ۲- تکرار مراحل اخیر تا هنگامی که شرایط خاتمه محقق نشده‌اند:

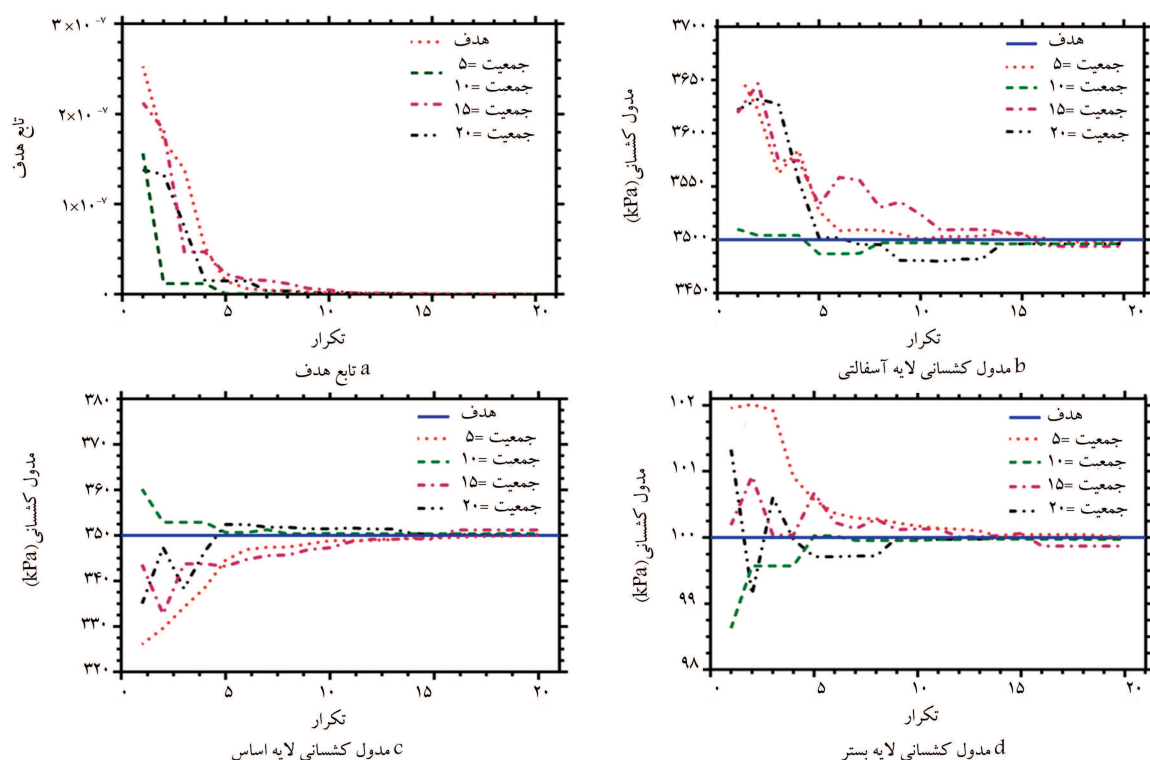
 - تولید هارمونی جدید با احتمال استفاده از حافظه‌ی هارمونی برابر با HCMR،
 - تغییر بسامد با احتمال PAR و ارزیابی پاسخ جدید،
 - مقایسه‌ی هارمونی جدید و اضافه کردن آن به حافظه‌ی هارمونی در صورت بهتر بودن.

- ۳- بهترین پاسخی که تا کنون پیدا شده است، به عنوان خروجی برگردانده می‌شود. فلوجارت حل ترکیبی DQ-HS در شکل ۵ نشان داده شده است.

۵. نتایج عددی

بر اساس فرمولاسیون ارائه شده و موتور شبیه‌ساز تهیه شده در بخش قبل و ترکیب آن با الگوریتم بهینه‌سازی HS و تابع هدف در نظر گرفته شده، یک برنامه‌ی رایانه‌ی جامع در محیط متلب جهت برآورد مقادیر پارامترهای مجهول روسازی تهیه شده است. این تذکر لازم است که سرعت، صحت و کارایی روش DQ در نوشتار مملکتی و همکاران (۱۸، ۲۰)^[۲۶] نشان داده شده است. در ادامه، صحت، هم‌گرایی سریع و دقت روش DQ-HS برای مقادیر مدول کشسانی یک روسازی سه لایه با مشخصات ارائه شده در جدول ۱ با مقادیر محاسبه شده با استفاده از روش DQ-HS بررسی شده است.

صحت‌سنجی روش محاسبات بازگشتی به وسیله‌ی تحلیل معکوس انجام می‌گیرد. بدین صورت که ابتدا با استفاده از مقادیر مندرج در جدول ۱، مقادیر تغییرمکان نقاط مختلف سطح روسازی (متناظر با فواصل حسگرهای FWD) با استفاده از موتور شبیه‌ساز DQ محاسبه و فرض می‌شود که مقادیر تغییرمکان ذکر شده، توسط دستگاه FWD برداشت شده است. سپس مقادیر تغییرمکان‌های ذکر شده، به عنوان ورودی به روش محاسبات بازگشتی برگردانده می‌شود و مقادیر مدول کشسانی مجدداً محاسبه می‌شوند. بنابراین، روش اخیر باید همان ضریب‌های



شکل ۶. نتایج تحلیل معکوس برای محاسبه‌ی سختی لایه‌های روسازی با استفاده از روش DQ-HS.

نیز ارائه شده است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که روش محاسبات بازگشتی با روش ترکیبی حاضر با پایین‌ترین مقدار خطا در کمترین زمان ممکن به پاسخ‌های مورد نظر نزدیک شده است. با توجه به بزرگ بودن محدوده‌ی پاسخ مدول لایه‌ی آسفالتی نسبت به سایر مدول‌ها، درصد خطای نسبی آن تقریباً در بیشتر موارد بالاتر از سایر نتایج بوده است. در تحلیل با جمعیت ۱۰٪ با توجه به این‌که مدول لایه‌ی آسفالتی به طور کاملاً تصادفی نزدیک به جواب مورد نظر در اولین تکرار انتخاب شده است، خطای نسبی در لایه‌ی اساس بیشتر از سایر لایه‌ها بوده است. این نتایج به دلیل تصادفی بودن روند اجرای محاسبات بازگشتی است. برای نشان دادن کارایی الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی و استقلال هم‌گرایی جواب‌های بهینه، مسئله با تعداد جمعیت ۱۰٪ و تکرار ۲۰٪ به تعداد ۱۰ بار با سری اعداد تصادفی مختلف اجرا شد. نتایج آماری حاصل، شامل مقدار میانگین، کمیته و بیشینه‌ی مقادیر تابع هدف و مدول کشسانی هر لایه در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پس از گذشت ۵۰٪ کل تکرارها، تقریباً جواب‌های هر ۱۰ تکرار، مشابه همدیگر شده‌اند، که نشان‌دهنده‌ی استقلال روش بهینه‌سازی از اعداد تصادفی و کارایی بالای روش مذکور است.

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک روش ترکیبی DQ-HS بر اساس تئوری کشسانی و با فرض تقارن محوری برای تحلیل معکوس روسازی به منظور تخمین مدول کشسان لایه‌های روسازی توسعه یافته است. روش عددی قدرتمند DQ که پایداری، دقت و سرعت بالا در تحلیل دارد، به عنوان موتور شبیه‌سازی عددی استفاده و با الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی برای کمیته‌سازی تابع هدف و محاسبه‌ی

جدول ۲. جابجایی‌های خروجی موتور شبیه‌ساز DQ استفاده شده به عنوان ورودی برای تحلیل معکوس.

جابجایی‌های نظیر ژئوفن‌های آزمایش FED						
D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
۰٫۳۹	۰٫۳۳	۰٫۲۱	۰٫۱۷	۰٫۱۲	۰٫۰۷	۰٫۰۴

روش محاسبات بازگشتی با استفاده از روش تلفیقی دیفرانسیل کوادریچر و الگوریتم جستجوی هارمونی در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

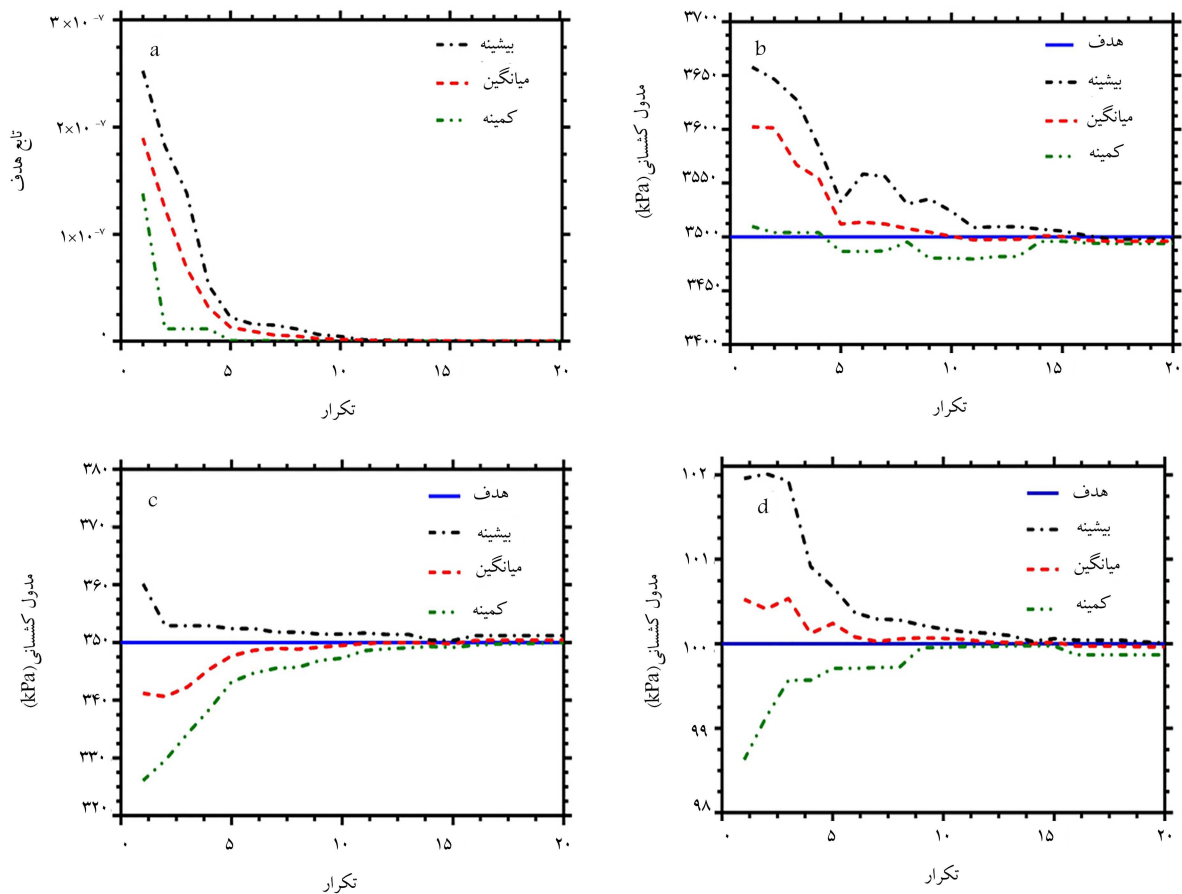
در نمودار ۶a، روند هم‌گرایی (صفر شدن تابع هدف) برای جمعیت‌های متفاوت مشاهده می‌شود. همچنین نمودارهای ۶b الی ۶d، هم‌گرایی مدول کشسانی روسازی به دست آمده با استفاده از روش محاسبات بازگشتی به روش DQ-HS را در هر ۳ لایه‌ی آسفالتی، اساس و بستر نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که روش محاسبات بازگشتی با استفاده از روش تلفیقی DQ-HS تقریباً در تکرار هشتم به پاسخ مناسب به اندازه‌ی کافی نزدیک شده است. البته پیش از رسیدن به محدوده‌ی مذکور نیز در برخی لایه‌ها، ضریب ارتجاعی مناسبی به دست آمده است، که دلیل آن را می‌توان روند تصادفی روش در جستجوی پاسخ‌ها دانست. با توجه به انتخاب مدول لایه‌ی آسفالتی مناسب و نزدیک به محدوده‌ی مورد نظر در تعداد جمعیت ۱۰٪ به صورت تصادفی توسط روش محاسبات بازگشتی، تابع خطا به سرعت به سمت صفر میل کرده است.

بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۶، دقت و سرعت هم‌گرایی مناسب الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی هارمونی و موتور شبیه‌ساز دیفرانسیل کوادریچر در محاسبات بازگشتی مدول کشسانی لایه‌های روسازی مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از محاسبات بازگشتی با روش ترکیبی DQ-HS و همچنین میزان خطای نسبی نتایج در جدول ۳

جدول ۳. نتایج حاصل از محاسبات بازگشتی با استفاده از روش ترکیبی DQ-HS و خطای نسبی پاسخ‌ها.

مقدار تابع هدف	نتیجه نهایی به ازای تکرار ۲۰ام						جمعیت
	مدول لایه آسفالتی (kPa)		مدول لایه اساس (زیر اساس) (kPa)		درصد خطای		
	نسبی	بستر (kPa)	نسبی	بستر (kPa)	نسبی	درصد خطای	
۶,۴۸E-۱۱	٪۰,۰۱	۱۰۰,۰۱	٪۰,۰۰۷	۳۵۰,۰۲	٪۰,۰۴	۳۴۹۸,۴۷	۵
۱,۵۶E-۱۲	٪۰,۰۲	۹۹,۹۷	٪۰,۱۲	۳۵۰,۴۲	٪۰,۱۱	۳۴۹۶,۱۵	۱۰
۳,۹۸E-۱۰	٪۰,۱۳	۹۹,۸۷	٪۰,۳۵	۳۵۱,۲۳	٪۰,۱۷	۳۴۹۳,۹۶	۱۵
۴,۶۸E-۱۱	٪۰,۰۰۲	۹۹,۹۹۸	٪۰,۰۶	۳۵۰,۲۳	٪۰,۱۱	۳۴۹۶,۱۸	۲۰
		۱۰۰*		۳۵۰*		۳۵۰۰*	

* مدول کشسانی واقعی لایه‌های روسازی



شکل ۷. نمودار میانگین، بیشینه و کمینه‌ی توابع هدف و ضرایب ارتجاعی لایه‌های روسازی با ۱۰ بار اجرای روش DQ-HS با جمعیت ۱۰.

انک، با تخمین مدول کشسانی لایه‌های مختلف روسازی (به صورت غیرمخرب) ظرفیت‌سازایی روسازی در حال خدمت را بررسی و همچنین کمک شایانی به تصمیم‌گیری‌های لازم در سیستم مدیریت روسازی می‌کند. جهت مطالعات آتی، استفاده از مدل‌های بدون شبکه‌ی دیفرانسیل کوادراچر جهت موتور شبیه‌ساز و همچنین استفاده از سایر الگوریتم بهینه‌سازی، نظیر TLBO و غیره پیشنهاد می‌شود.

پارامترهای مجهول (مدول کشسانی لایه‌های روسازی) ترکیب شده است. هم‌گرایی سریع، دقت بالا و هزینه محاسباتی کم از مزایای روش پیشنهادی اخیر، جهت تخمین پارامترهای مجهول است. همچنین نشان داده شد که می‌توان از روش پیشنهادی مذکور، به عنوان یک روش قابل اطمینان برای محاسبه پارامترهای مجهول یک سازه چندلایه از جمله روسازی استفاده کرد. استفاده از مدل ارائه شده این امکان را برای مهندسان روسازی فراهم می‌آورد که با زمان محاسباتی

پانوشتها

1. falling weight deflectometer
2. Senseney
3. Sangghaleh
4. Shabbir & Omenzetter
5. Gopalakrishnan
6. Papadopoulos
7. Kargah-Ostadi & Stoffels
8. Tarefder
9. Scimemi
10. MATLAB

منابع (References)

1. Gopalakrishnan K. and Khaitan, S.K. "Development of an intelligent pavement analysis toolbox", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport*, **163**(4), pp. 211-221 (2010).
2. Senseney, C.T., Krahenbuhl, R.A. and Mooney, M.A. "Genetic algorithm to optimize layer parameters in light weight deflectometer backcalculation", *International Journal of Geomechanics, ASCE*, **13**(4), pp. 473-476 (2012).
3. Sangghaleh, A., Pan, E., Green, R. and et al. "Backcalculation of pavement layer elastic modulus and thickness with measurement errors", *International Journal of Pavement Engineering*, **15**(6) (2014).
4. Shabbir, F. and Omenzetter, P. "Model updating using genetic algorithms with sequential niche technique", *Engineering Structures*, **120**, pp. 166-182 (2016).
5. Li, M. and Wang, H. "Development ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD testing with viscoelastic and nonlinear parameters", *International Journal of Pavement Engineering*, **20**(4), pp. 490-498 (2017).
6. Gopalakrishnan, K. "Neural network-swarm intelligence hybrid nonlinear optimization algorithm for pavement moduli back-calculation", *Journal of Transportation Engineering*, **136**(6) (2009).
7. Saltan, M., Terzi, S. and Küçüksille, E.U. "Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining", *Expert Systems with Applications*, **38**(3), pp. 2600-2608 (2011).
8. Gopalakrishnan K. and Papadopoulos, H. "Reliable pavement backcalculation with confidence estimation", *Scientia Iranica*, **18**(6), pp. 1214-1221 (2011).
9. Kargah-Ostadi, N. and Stoffels, S.M. "Backcalculation of flexible pavement structural properties using a restart covariance matrix adaptation evolution strategy", *Journal of Computing in Civil Engineering, ASCE*, **29**(2) (2015).
10. Tarefder, R.A., Ahsan, S. and Ahmed, M.U. "Neural network-based thickness determination model to improve backcalculation of layer moduli without coring", *International Journal of Geomechanics, ASCE*, **15**(3), pp.1-13 (2015).
11. Garbowski, T. and Pozarycki, A. "Multi-level backcalculation algorithm for robust determination of pavement layers parameters", *Inverse Problems in Science and Engineering*, **25**(5), pp. 1-20 (2017).
12. Scimemi, G.F., Turetta, T. and Celauro, C. "Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the levy Ant Colony optimization algorithm", *Construction and Building Materials*, **119**, pp. 288-295 (2016).
13. Horak, E. "Surface moduli determined with the falling weight deflectometer used as benchmarking tool", *Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference* (2007).
14. Hamim, A., Yusoff, N.I.M., Ceylan, H. and et al. "Comparative study on using static and dynamic finite element models to develop FWD measurement on flexible pavement structures", *Construction and Building Materials*, **176**, pp. 583- 592 (2018).
15. Yu, Q. and Wang, J. "Experimental and FEM research on airport cement concrete direct-thickening double-deck pavement slabs under aircraft single-wheel dynamic loads", *Advances in Materials Science and Engineering* (2018).
16. Li, C., Ashlock, J.C., Lin, S. and et al. "In situ modulus reduction Characteristics of Stabilized pavement foundations by multichannel analysis of surface waves and falling weight deflectometer tests", *Construction and Building Materials*, **128**, pp. 809-819 (2018).
17. Richard, H., Nocedal, J. and Yuan, Y.X. "Global convergence of a class of quasi-newton methods on convex", *SIAM Journal on Numerical Analysis*, **24**(5), pp. 1171-1190 (1987).
18. Egorchev, M. and Timentsev, Y. "Homotopy continuation training method for semi-empirical continuous-time state-space neural network models", *International Conference on Neuroinformatics* (2018).
19. Geem, Z.W., Kim, J.H. and Loganathan, G.V. "A new heuristic optimization algorithm: harmony search", *SAGE Journals*, **76**(2), pp. 60-68 (2001).
20. Blab, R. and Harvey, J.T. "Modeling measured 3D tire contact stresses in a viscoelastic FE pavement model", *International Journal Geomechanics*, **2**(3), pp. 271-290 (2002).
21. Al-Qadi, I., Wang, S. and Zhao, S. "Non-linear optimization of GPR data to predict thin overly thickness and density", *20th EGU General Assembly, Conference of Vienna in Austria* (2018).
22. Ren, D. and Houben, L. "Modelling the effect of plastic sheet curing on early age temperature development in concrete pavement", *International Journal of Pavement Engineering*, **21**(5), pp. 559-570 (2018).
23. Li, X. and Zhang, K. "Numerical analysis of drying process of soils using finite volume method", *International Journal of Pavement Research and Technology*, pp.813-818 (2018).
24. Ameri, M., Malakouti, M. and Malekzadeh, P. "Quasi-static analysis of multilayered domains with viscoelastic layer using incremental-layerwise finite element method", *Mechanics of Time-Dependent Materials*, **18**, pp. 275-291 (2014).

25. Malakouti, M., Ameri, M. and Malekzadeh, P. "Incremental layerwise finite element formulation for viscoelastic response of multilayered pavements", *International Journal of transportation Engineering*, **1**(3), pp. 183-198 (2014).
26. "Dynamic response analysis of viscoelastic pavement using differential quadrature element method", *International Journal of Pavement Engineering* (2018).
27. dynamic analysis of floating piles under impact loads", *International Journal of Geomechanics*, **17**(2), pp.1-19 (2017).
28. differential quadrature three-dimensional static and free vibration analysis of functionally graded carbon nanotube reinforced composite laminated plates", *Meccanica*, **50**, pp. 143-167 (2015).