



Semnan University



Research Article

Inverse Calculation of the Modulus of Elasticity of Pavement Layers Using the GWO Metaheuristic Optimization Algorithm

Mahmoud Malakouti Olounabadi ^{a*} , Milad Jahangiri ^a

^a Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-02-10

Revised: 2025-03-02

Accepted: 2025-03-09

Keywords:

Pavement;
Differential quadrature;
GWO algorithm;
Inverse calculations;
Modulus of elasticity.

ABSTRACT

In pavement engineering, determining the structural properties of the pavement, including the elastic coefficients and layer thicknesses, is highly significant. These properties determine the performance of the pavement and have a direct impact on the pavement life. Using commercial software for numerical simulation engines to calculate pavement surface changes increases calculations cost due to the complexity of integrating it into the optimization engine. In these methods, there is a need for a pre-generated artificial database using the software, as well as the use of a neural network and an optimization algorithm. Therefore, to generate the analysis population, the software must be run with a set of different estimation modules to provide the necessary population for inverse analysis, which increases the need for computational costs. The main goal of the current research is to combine the quadrature differential numerical method as an accurate, efficient, and high-speed numerical method with the Gray Wolf Optimization (GWO) metaheuristic optimization algorithm in order to inversely calculate the redundant values of the elastic modulus of pavement layers without using an artificial neural network and reducing the computational time. Results of the analysis with five independent runs showed that this method is able to achieve the desired response with a small number of populations and iterations.

* Corresponding author.

E-mail address: malakooti@pgu.ac.ir

How to cite this article: Malakouti Oloun Abadi, M. and Jahangiri, M. (2025). Inverse calculation of the modulus of elasticity of pavement layers using the GWO metaheuristic optimization algorithm. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(1), 83-96. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36872.1716>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

محاسبه معکوس مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری GWO

محمود ملکوتی علون‌آبادی^{۱*}، میلاد جهانگیری^۱

^۱ استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲	در مهندسی روسازی، تعیین خصوصیات سازه‌ای روسازی، از جمله ضرایب ارتجاعی و ضخامت لایه‌ها، حائز اهمیت است. این خصوصیات، عملکرد روسازی را تعیین می‌کنند و تأثیر مستقیم بر عمر روسازی دارند. استفاده از نرم‌افزارهای تجاری به منظور شبیه‌سازی محاسبات عددی برای محاسبه تغییرات سطح روسازی به دلیل پیچیدگی تلفیق آن با تکنیک بهینه‌سازی، هزینه محاسبات را افزایش می‌دهد. در این روش‌ها، نیاز به پایگاه داده مصنوعی از پیش تولیدشده با استفاده از نرم‌افزار و همچنین استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی وجود دارد. بنابراین، برای تولید جمعیت اولیه، بایستی با دسته مدول‌های تخمینی متفاوت، نرم‌افزار را اجرا کرد تا جمعیت لازم برای تحلیل معکوس فراهم شود که هزینه محاسبات را افزایش می‌دهد. هدف اصلی این تحقیق، تلفیق روش عددی دیفرانسیل کوادرچر به عنوان یک روش عددی دقیق و کارآمد و با سرعت بالا با الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری گرگ خاکستری (GWO)، به منظور محاسبات معکوس مقادیر مجهول مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی بدون استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و کاهش زمان محاسبات می‌باشد. نتایج تحلیل با پنج اجرای مستقل نشان داد که این روش قادر است با تعداد جمعیت و تکرارهای کم، به پاسخ مطلوب دست یابد.
واژه‌های کلیدی: روسازی، دیفرانسیل کوادرچر، الگوریتم بهینه‌سازی GWO، محاسبات معکوس، مدول الاستیسیته.	

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: malakooti@pgu.ac.ir

استناد به این مقاله: ملکوتی علون‌آبادی، محمود و جهانگیری، میلاد. (۱۴۰۴). محاسبه معکوس مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی فرا ابتکاری GWO. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۱)، ۹۶-۸۳. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36872.1716>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

درک و تخمین مشخصات سازه‌ای لایه‌های روسازی، مانند ضریب ارتجاعی، ضخامت لایه‌های روسازی و نسبت پواسون لایه‌ها در طول دوره بهره‌برداری، از عوامل اساسی در کاهش هزینه‌های نگهداری، تعمیرات و برآورد عمر مفید باقی‌مانده سازه روسازی است. این مشخصات می‌توانند به بهینه‌سازی عملکرد روسازی کمک کنند و همچنین منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات شوند. محاسبات بازگشتی، یک روش معکوس برای تخمین مشخصات سازه‌ای روسازی است که با مقایسه تغییر مکان‌های اندازه‌گیری شده در روسازی با تغییر مکان‌های حاصل از یک روش عددی به همراه روش‌های بهینه‌سازی، انجام می‌شود. برای اندازه‌گیری این جابه‌جایی‌ها در میدان، با توجه به طول گستردگی شبکه راه‌ها، از روش‌های غیرمخرب به طور متداول استفاده می‌شود. این روش، با توجه به کاربرد گسترده و اثربخشی آن در کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات، به یکی از روش‌های پرکاربرد در علم مدیریت روسازی تبدیل شده است. سرعت بالای انجام آزمایش، دقت زیاد تجهیزات اندازه‌گیری، غیرمخرب بودن و پوشش نقاط بیشتر در سطح راه، عمده دلایل استقبال از آزمایش‌های غیرمخرب است. آزمایش FWD بار ترافیکی وارده به روسازی را به صورت افتادن یک وزنه به جرم مشخص به سطح روسازی شبیه‌سازی می‌کند، که معادل تنش وارد شده توسط چرخ وسیله نقلیه بر روسازی است. افت و خیز ناشی از ضربه به کمک ژئوفن‌های تعبیه شده در دستگاه که به فواصل مشخص از صفحه بارگذاری و در امتداد محور راه قرار دارند ثبت و سپس قرائت می‌شود (علی و خوسلا، ۱۹۸۷). تحلیل پاسخ‌های روسازی از جمله تنش و کرنش و جابه‌جایی ناشی از بارهای آنی وارده، یکی از مسائل مهم مهندسی روسازی است. برای تحلیل عددی این مسئله می‌توان روش‌های عددی متعددی را به کار گرفت (دآرائوخو و همکاران، ۲۰۱۰؛

ملکوتی و همکاران، ۲۰۱۴؛ اسلامی‌نیا و گوداتی، ۲۰۱۶؛ رامش‌خواه و همکاران، ۲۰۱۸؛ نجفی و همکاران، ۲۰۲۰؛ رامش‌خواه و همکاران، ۲۰۲۰؛ ملکوتی علون‌آبادی و همکاران، ۲۰۲۴). اما از آنجایی که در همه مسائل، دقت بیشتر و زمان کمتر در رسیدن به پاسخ، هدف اصلی است، در این پژوهش از یک روش عددی قدرتمند برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم به نام روش دیفرانسیل کوادرچر استفاده شده است. امروزه، این روش به عنوان یک ابزار قدرتمند با سرعت تحلیل زیاد برای حل معادلات دیفرانسیل استفاده می‌شود. روش عددی دیفرانسیل کوادرچر به طور موفقیت‌آمیزی برای تحلیل ساختارهای چندلایه روسازی استفاده شده است. نرخ همگرایی سریع، سرعت زیاد و دقت آن در تحقیقات متعدد تأیید شده است (کرمی و ملک‌زاده، ۲۰۰۲؛ کرمی و ملک‌زاده، ۲۰۰۳؛ ملکوتی و همکاران، ۲۰۱۴؛ وثوقی و همکاران، ۲۰۱۸؛ خالقی و همکاران، ۲۰۲۲؛ ملکوتی علون‌آبادی و همکاران، ۲۰۲۴). الگوریتم‌های بهینه‌سازی که در فرایند محاسبات معکوس مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل دسته‌بندی‌های متنوعی هستند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر تکامل جوامع (الگوریتم ژنتیک، تکامل تفاضلی و...)، الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر فیزیک (الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، نیروی مرکزی و...)، الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر هوش جمعی (الگوریتم ازدحام ذرات، کلونی مورچه و...)، الگوریتم‌های مبتنی بر بشر (الگوریتم مبتنی بر آموزش و یادگیری و جستجوی هارمونی و...) و الگوریتم‌های ترکیبی که از ادغام دو یا چند مورد از الگوریتم‌های فوق به وجود می‌آیند. الگوریتم‌های مذکور، همگی با هدف رسیدن به پاسخ بهینه عمل می‌کنند. ابتدا، از محدوده تعریف‌شده، جامعه‌ای را به صورت تصادفی انتخاب می‌کنند. سپس، با استفاده از فرایندهای اختصاصی برای هر الگوریتم، پاسخ‌های بهینه را به عنوان خروجی به کاربر ارائه می‌دهند. استفاده از روش اجزای محدود برای ایجاد

هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی مصنوعی و محاسبات معکوس و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی برای محاسبه معکوس مدول لایه‌های روسازی توسط محققین مختلفی مورد پژوهش قرار گرفته است (گوپالاکریشنان، ۲۰۰۹؛ سالتن و همکاران، ۲۰۱۱؛ گوپالاکریشنان و پاپادوپولوس، ۲۰۱۱؛ ترنر و همکاران، ۲۰۱۵؛ کارگاه- استادی و استوفلس، ۲۰۱۵؛ سیممی و همکاران، ۲۰۱۶؛ گاربوسکی و پوزاریکی، ۲۰۱۷). اغلب این روش‌ها از تئوری لایه‌های الاستیک و یا از نرم‌افزارهای تجاری موجود نظیر آباکوس، انسیس و کنلایر برای تحلیل روسازی انعطاف-پذیر استفاده می‌کنند (لی و وانگ، ۲۰۱۷؛ حمیم و همکاران، ۲۰۱۸؛ یو و همکاران، ۲۰۱۸؛ لی و همکاران، ۲۰۱۸). استفاده از نرم‌افزارهای تجاری به منظور تکنیک شبیه‌سازی عددی برای محاسبه تغییر سطح روسازی به دلیل پیچیده بودن ترکیب آنها به تکنیک بهینه‌سازی منجر به افزایش هزینه محاسبات می‌شود. زیرا در این روش‌ها نیاز به پایگاه داده مصنوعی از پیش تولیدشده با استفاده از نرم‌افزار و همچنین استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم بهینه‌سازی می‌باشد. بنابراین، برای تولید جمعیت تحلیل بایستی با دسته مدول‌های تخمینی متفاوت نرم‌افزار را اجرا نمود تا جمعیت لازم برای تحلیل معکوس فراهم گردد. این فرایند، هزینه محاسبات را افزایش می‌دهد (اگورچف و تیومنستف، ۲۰۱۸). هدف اصلی این تحقیق، استفاده از یک مدل محاسباتی کارآمد است که ضمن تلفیق آن با الگوریتم‌های بهینه‌سازی، بتواند تغییر مکان بستر روسازی را با دقت زیاد محاسبه کند و در عین حال، زمان محاسبات را به طور قابل توجهی کاهش دهد. برای دستیابی به این هدف، از روش عددی دیفرانسیل کوادرچر به‌عنوان تکنیک شبیه‌سازی استفاده شده است. این روش قادر است تغییر مکان روسازی چندلایه با رفتار الاستیک را با سرعت و دقت زیاد محاسبه کند. با تلفیق این روش عددی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، محاسبات بازگشتی ویژگی‌های سازه‌های روسازی قابل

انجام خواهد بود. این ترکیب باعث می‌شود تا تغییرات در خصوصیات سازه‌ای روسازی در طول زمان به دقت بررسی شود و بر اساس نتایج حاصل، تصمیمات مناسب برای نگهداری و تعمیرات اتخاذ شود. در این تحقیق، از الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری برای محاسبات معکوس مدول الاستیسیته لایه‌های یک روسازی سه‌لایه انعطاف‌پذیر استفاده شده است. مسئله مورد بررسی در این پژوهش نیز به‌دست آوردن مدول الاستیک لایه‌های یک روسازی سه‌لایه انعطاف‌پذیر با استفاده از محاسبات بازگشتی و تلفیق روش عددی دیفرانسیل کوادرچر و الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری است. با تلفیق روش دیفرانسیل کوادرچر با تکنیک بهینه‌سازی گرگ خاکستری، برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار MATLAB فراهم شده است که قادر است مدول الاستیسیته یک روسازی چندلایه با رفتار الاستیک را به شکل معکوس و با دقت و حجم محاسباتی کم تخمین بزند. برای ترکیب خواص سازه‌ای لایه‌های مختلف نظیر ضریب ارتجاعی لایه‌ها، جمعیت و فضای جستجو در محدوده منطقی در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روش تلفیقی الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری و مدل‌سازی عددی به‌صورت تکراری، میزان خطای نتایج حاصل با استفاده از تابع هدف و کمینه‌کردن آن محاسبه می‌گردد. اگر میزان خطای حاصل از مقایسه داده‌های به‌دست‌آمده از جابجایی‌های آزمایش سقوط وزنه و محاسبه شده از تکنیک شبیه‌ساز عددی از حد قابل پذیرش تعیین شده در مسئله کمتر باشد، نتیجه حاصل به‌عنوان جواب مسئله و خروجی محاسبات بازگشتی در نظر گرفته خواهد شد. این تحقیق گامی جدید در حل چالش‌های موجود در زمینه تحلیل عددی روسازی و محاسبات معکوس در روسازی است. استفاده از مدل مذکور این امکان را به مهندسين روسازی می‌دهد تا با تخمین مشخصات مکانیکی و هندسی لایه-های مختلف روسازی (به صورت غیرمخرب) ظرفیت سازه‌ای روسازی در حال خدمت را بررسی و کمک

شایانی به تصمیم‌گیری‌های لازم در سیستم مدیریت روسازی نماید.

۲. روش دیفرانسیل کوادرچر

در حالت سه‌بعدی، با فرض تقارن محوری، معادلات حاکم بر حسب جابجایی برای یک روسازی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

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

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

که در اینجا:

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

در روابط بالا، E مدول الاستیسیته و ν نسبت پواسون می‌باشد. 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 (کرمی و همکاران، ۲۰۰۳) فرم گسسته معادلات حاکم (روابط ۱ و ۲) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

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

$$\begin{aligned} & \beta E \sum_{m=1}^{N_r} B_{im}^r w_{mj} + \\ & (\alpha + 2\beta)E \sum_{n=1}^{N_z} B_{jn}^z w_{in} + \\ & (\alpha + \beta)E \sum_{m=1}^{N_r} \sum_{n=1}^{N_z} A_{im}^r A_{jn}^z u_{mn} + \\ & \frac{\beta E}{r_i} \sum_{m=1}^{N_r} A_{im}^r w_{mj} + \\ & \frac{(\alpha + \beta)E}{r_i} \sum_{n=1}^{N_z} A_{jn}^z u_{in} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

در این روابط، A_{ij}^α ، B_{ij}^α ضرایب وزنی مشتق مراتب اول و دوم و همچنین N_r و N_z تعداد نقاط شبکه در راستاهای r و z می‌باشند. همچنین، $i = 2, 3, \dots, N_r - 1$ و $j = 2, 3, \dots, N_z - 1$ می‌باشد.

با استفاده از معادلات حاکم گسسته شده و شرایط مرزی مرتبط در هر مسئله، دستگاه معادلات حاصل را می‌توان به فرم ماتریسی زیر بیان کرد:

$$[K]\{U\} = \{q\} \quad (6)$$

که در این رابطه، $[K]$ ، $\{U\}$ و $\{q\}$ به ترتیب ماتریس مربعی سختی کل، ماتریس ستونی درجات آزادی (جابجایی) و ماتریس ستونی بار خارجی مسئله می‌باشند. بر اساس فرمولاسیون ارائه شده، یک برنامه کامپیوتری در محیط نرم‌افزار MATLAB تهیه شده است و معادله (۶) با استفاده از آن حل شده و مؤلفه‌های بردار $\{U\}$

۱۲ گرگ را شامل می‌شود و دارای یک سلسله مراتب اجتماعی غالب بسیار سخت می‌باشند که به ترتیب در چهار زیرگروه Alpha, Beta, Delta و Omega جای می‌گیرند. فرمانده گروه می‌تواند یک گرگ نر یا ماده باشد که Alpha نامیده می‌شود و لزوماً قوی‌ترین گرگ گروه نمی‌باشد. در رده پایین‌تر، گرگ‌های Beta قرار می‌گیرند که تابع دستورات و در تقویت دستورات گرگ Alpha عمل می‌کنند و نقش مشاور را دارند و می‌توانند یکی از بهترین گزینه‌ها برای فرماندهی بعدی باشند. در پایین‌ترین سطح در این سلسله مراتب، گرگ‌های Omega قرار دارند که نقش محافظ را داشته و آخر از همه غذا می‌خورند. هر یک از گرگ‌هایی که در این سه گروه جای نگیرند، به عنوان گرگ Delta شناخته می‌شوند که معمولاً شامل سالمندان و یا سرپرستان و ... می‌باشند.

شکار دسته‌جمعی گرگ‌های خاکستری علاوه بر سلسله مراتب اجتماعی بین آنها یکی دیگر از رفتارهای جالب اجتماعی آنها است که اساس ساختار الگوریتم گرگ خاکستری نیز بر اساس همین موضوع شکل گرفته است.

۴. مدل‌سازی ریاضی الگوریتم بهینه‌سازی

فراابتکاری GWO

سلسله مراتب اجتماعی گرگ‌های خاکستری به صورت زیر تعریف می‌شود:

بهترین موقعیت (راه‌حل) آلفا (α) نامیده می‌شود. سپس، به ترتیب بهترین راه‌حل دوم و سوم را بتا (β) و دلتا (δ) نام‌گذاری می‌کنیم و سایر راه‌حل‌ها امگا (ω) خواهند بود. معادلات ریاضی محاسبه موقعیت شکار:

$$x(t+1) = x_p(t) - A * D(t) \quad (8)$$

$$D(t) = |C * x_p(t) - x(t)|; t = 1, 2, \dots, tM \quad (9)$$

$$A = a(2r_1 - 1); C = 2r_2; \quad (10)$$

به دست می‌آید. جزییات بیشتر روش دیفرانسیل کوادرچر را در مرجع رامش‌خواه و همکاران (۲۰۲۰) می‌توان یافت.

۳. الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری GWO

برای تخمین مشخصات مجهول هر لایه، تابع خطای بین تغییر مکان سطح روسازی با تغییر مکان محاسبه شده از تکنیک شبیه‌ساز عددی باید به حداقل برسد. به همین منظور، از روش‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در این روش، با کمینه کردن تابع هدف زیر، می‌توان پارامترهای مجهول را محاسبه نمود:

$$O.F = \min \left(\sum_{i=1}^m (D_i - d_i)^2 \right) \quad (7)$$

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

که در این رابطه، m تعداد تغییر مکان‌های اندازه‌گیری شده توسط ژئوفن‌ها در نقاط مشخص در امتداد روسازی است، D_i و d_i نیز به ترتیب تغییر مکان‌های محاسبه شده با استفاده از تکنیک شبیه‌ساز عددی و تغییر مکان‌های اندازه‌گیری شده حسگر i ام در امتداد محور بارگذاری سطح روسازی هستند. E_{\min_i} ، E_i ، E_{\max_i} مقادیر مدول الاستیسیته و حد بالا و پایین آن در هر لایه هستند.

الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) برای اولین بار توسط میرجلیلی و همکاران (۲۰۱۴) ارائه گردید. ساختار این الگوریتم بر مبنای زندگی اجتماعی گرگ خاکستری و نحوه شکار آنها استوار است و در دسته الگوریتم‌های فراابتکاری قرار می‌گیرد که از هوش اجتماعی و مبتنی بر جمعیت بهره می‌برد (فاریس و همکاران، ۲۰۱۸). استفاده از این الگوریتم در زمینه مهندسی روسازی و مهندسی حمل‌ونقل توسط محققین متعدد مورد تحقیق قرار گرفته است (محمدی گل‌افشانی و همکاران، ۲۰۲۳؛ فرشچیان یزدی و همکاران، ۲۰۲۳؛ ربانی و همکاران، ۲۰۲۳؛ لیو و همکاران، ۲۰۲۴). گرگ‌های خاکستری متعلق به خانواده کانید هستند که به صورت گروهی زندگی و شکار می‌کنند. تعداد جمعیت هر گروه به طور متوسط بین ۵ تا

r_1 and r_2 are random vectors $\in [-1,1]$

یافت.

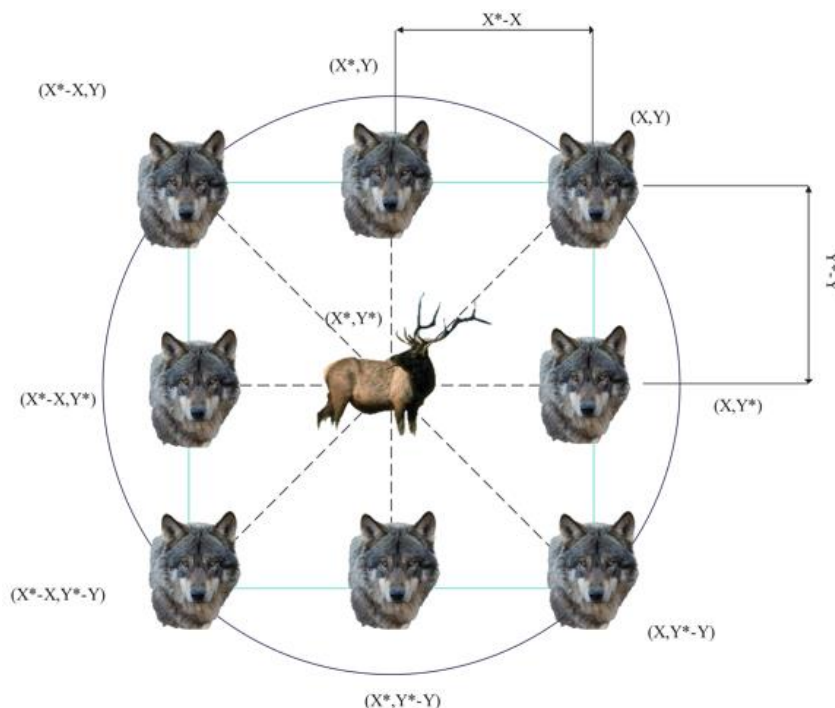
همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، گرگ خاکستری در موقعیت (X, Y) می‌تواند موقعیت خود را با توجه به موقعیت شکار (X^*, Y^*) به روز رسانی کند.

در روابط بالا داریم:

$x(t)$: موقعیت گرگ خاکستری در تکرار t ام

$x_p(t)$: موقعیت شکار در تکرار t ام

مؤلفه a به صورت خطی از ۲ تا صفر کاهش خواهد



شکل ۱. بردار موقعیت دوبعدی و مکان در فضای جستجو

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، برای به-روزرسانی موقعیت جدید یک گرگ خاکستری از موقعیت گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا استفاده می‌شود و می-دانیم که موقعیت گرگ آلفا از گرگ بتا و همچنین موقعیت گرگ بتا از گرگ دلتا بهتر است. بنابراین، حتی می‌توان در به‌روزرسانی جدید موقعیت، از یک ضریب وزنی برای گرگ‌های خاکستری نیز استفاده کرد. اما در اینجا سهم هر گرگ را برابر در نظر گرفته‌ایم (میرجیلی و همکاران، ۲۰۱۴؛ فاریس و همکاران، ۲۰۱۸).

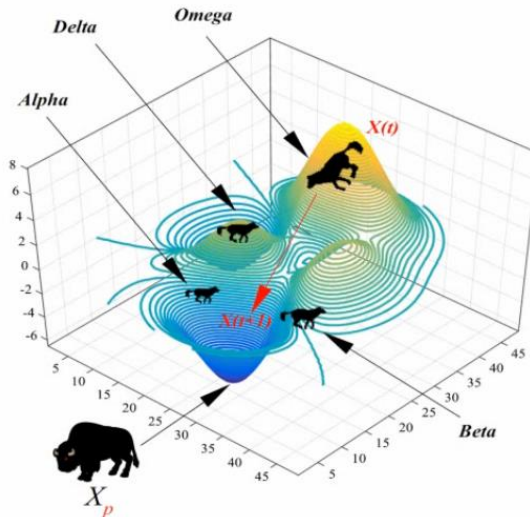
ما هیچ دانشی نسبت به موقعیت شکار (جواب مسئله) یا همان $X_p(t)$ را نداریم. بنابراین موقعیت شکار را برابر بهترین موقعیت موجود یعنی موقعیت گرگ α در نظر می‌گیریم و معادلات آن را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$X_1(t) = X_\alpha(t) - A_1 * D_\alpha(t), \quad D_\alpha(t) = |C_1 * X_\alpha(t) - X(t)| \quad (11)$$

$$X_2(t) = X_\beta(t) - A_2 * D_\beta(t), \quad D_\beta(t) = |C_2 * X_\beta(t) - X(t)| \quad (12)$$

$$X_3(t) = X_\delta(t) - A_3 * D_\delta(t), \quad D_\delta(t) = |C_3 * X_\delta(t) - X(t)| \quad (13)$$

$$X(t+1) = \frac{(X_1(t) + X_2(t) + X_3(t))}{3} \quad (14)$$



شکل ۲. نحوه به روزرسانی موقعیت گرگ‌ها و حرکت به سمت شکار

و دلتا

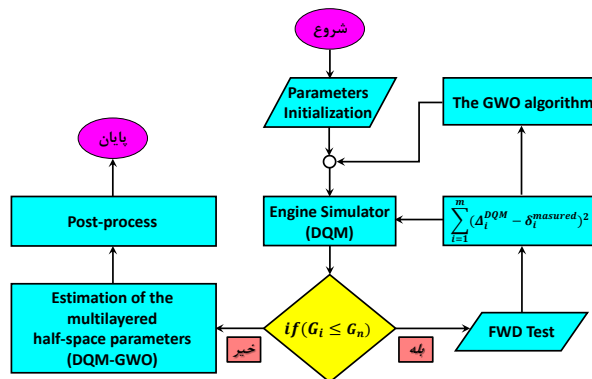
- اگر پاسخ جدید بهتر از پاسخ فعلی باشد، پاسخ جدید جایگزین پاسخ فعلی می‌شود. در غیر این صورت، پاسخ قبلی در جای خود ابقا می‌شود.
- بهترین پاسخی که تا کنون پیدا شده است به عنوان بهترین جواب گزارش می‌شود.

شکل ۳، نحوه الگوریتم پیشنهاد شده در این پژوهش را به صورت فلوجارت نمایش می‌دهد. فلوجارت روش پیشنهادی (DQM-GWO) گام‌های مختلف روند محاسباتی را تشریح می‌کند.

مراحل اجرای الگوریتم گرگ خاکستری را می‌توان به شرح زیر خلاصه نمود:

- ۱- تعریف پارامترهای مسئله و الگوریتم شامل پارامترهای a و C ، موقعیت اولیه گرگ‌ها و ...
- ۲- ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن و انتخاب گرگ‌های آلفا، بتا و دلتا
- ۳- تکرار مراحل زیر تا زمانی که شرایط خاتمه محقق نشده‌اند:

- به روزرسانی پارامترهای a و C
- به روزرسانی موقعیت گرگ‌ها
- ارزیابی موقعیت گرگ‌ها و به روزرسانی گرگ آلفا، بتا



شکل ۳. فلوجارت روش پیشنهادی (DQM-GWO)

۵. نتایج عددی

بر اساس فرمولاسیون ارائه شده و تکنیک شبیه‌سازی تهیه شده در بخش قبل و ترکیب آن با الگوریتم بهینه‌سازی GWO و تابع هدف در نظر گرفته شده، یک برنامه کامپیوتری جامع در محیط MATLAB جهت برآورد مقادیر پارامترهای مجهول روسازی تهیه شده است. لازم

به ذکر است که سرعت، صحت و کارایی روش DQ در تحقیق رامش‌خواه و همکاران (۲۰۲۰) که توسط نویسندگان مقاله انجام شده، نشان داده شده است. در ادامه، صحت، همگرایی سریع و دقت روش DQ-GWO برای مقادیر مدول الاستیسیته یک روسازی سه لایه با مشخصات بیان شده در جدول ۱، با مقادیر محاسبه شده با استفاده از روش DQ-GWO بررسی شده است.

جدول ۱. پارامترهای روسازی سه لایه (رامش‌خواه و همکاران، ۲۰۲۰)

پارامترها	لایه	
	ضخامت (m)	نسبت پواسون
مدول الاستیسیته (kPa)		
آسفالت	0.1	0.35
اساس	0.2	0.3
بستر	∞	0.4

صحت‌سنجی روش محاسبات بازگشتی به وسیله تحلیل معکوس انجام می‌گیرد. بدین صورت که ابتدا با استفاده از مقادیر مندرج در جدول ۱، مقادیر تغییر مکان نقاط مختلف سطح روسازی (متناظر با فواصل سنسورهای FWD) با استفاده از تکنیک شبیه‌سازی DQ محاسبه شده و فرض می‌شود این مقادیر تغییر مکان برداشت شده توسط دستگاه FWD می‌باشد. سپس این مقادیر تغییر مکان‌ها، به عنوان ورودی به روش محاسبات بازگشتی برگردانده می‌شود و مقادیر مدول الاستیسیته مجدداً محاسبه می‌شوند. بنابراین، این روش بایستی همان ضریب‌های ارتجاعی را که به عنوان ورودی در تکنیک شبیه‌سازی برای محاسبه تغییر مکان استفاده شده بودند را استخراج نماید. بسیاری از مقالاتی که به داده‌های میدانی FWD و ضخامت لایه‌های روسازی (جهت اعتبارسنجی) دسترسی ندارند از همین روش برای بررسی صحت و دقت مدل پیشنهادی استفاده می‌کنند

(سنسینی و همکاران، ۲۰۱۳؛ سنگ‌قلعه و همکاران، ۲۰۱۴؛ شبیر و اومنزتر، ۲۰۱۶؛ لی و وانگ، ۲۰۱۷؛ حیدری و همکاران، ۲۰۲۰). اکثر پژوهش‌ها جهت افزایش سرعت همگرایی و رسیدن به پاسخ در زمان کمتر، محدوده‌ای برای پاسخ‌ها در نظر می‌گیرند که پاسخ قطعاً در این محدوده قرار می‌گیرد و در حقیقت پاسخ خارج از این محدوده مورد پذیرش نخواهد بود. در این پژوهش، محدوده پاسخ مدول لایه آسفالتی بین ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. همچنین، محدوده مقید شده برای پاسخ مدول لایه اساس مابین ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوپاسکال و قید لایه بستر برای پاسخ مدول ارتجاعی آن بین ۵۰ تا ۱۵۰ کیلوپاسکال فرض شده است. خروجی مورد نیاز از تکنیک شبیه‌سازی DQ برای استفاده در روش محاسبات بازگشتی مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی، جابجایی در نقاط متناظر با آزمایش FWD است، که در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. جایجایی های خروجی تکنیک شبیه ساز DQ استفاده شده به عنوان ورودی برای تحلیل معکوس

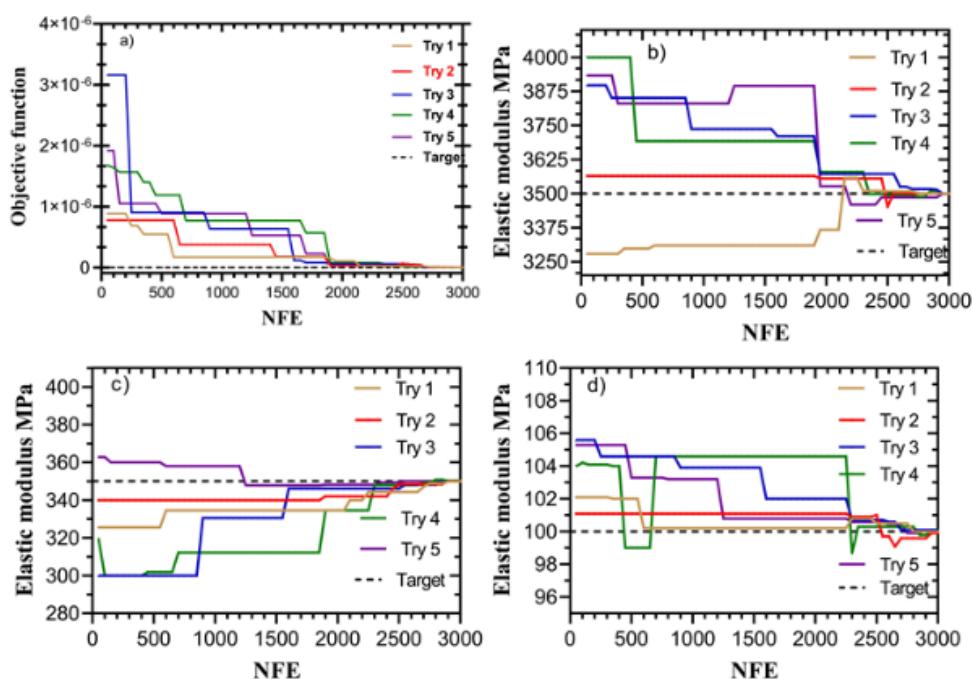
جایجایی های نظیر ژئوفن های آزمایش FWD						
D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
0.39	0.33	0.21	0.17	0.12	0.07	0.04

در این تحقیق، پارامترهای الگوریتم گرگ خاکستری مطابق آنچه در مقاله مرجع آن توسط میرجلیلی و همکاران (۲۰۱۴) توصیه گردیده بود به شرح جدول ۳ انتخاب گردیدند (فاریس و همکاران، ۲۰۱۸).

جدول ۳. پارامترهای الگوریتم گرگ خاکستری

MaxIt	npop	A	r1 & r2	C
60	50	$\alpha(2r_1 - 1)$	[-1, +1]	2r2

مؤلفه a به صورت خطی از ۲ تا صفر کاهش خواهد یافت. نتایج به دست آمده از روش محاسبات بازگشتی با استفاده از روش تلفیقی دیفرانسیل کوادرچر و الگوریتم GWO در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴. نتایج محاسبات بازگشتی برای محاسبه ضریب ارتجاعی و ضخامت لایه های روسازی با استفاده از روش DQ-GWO

جمعیت ۵۰ تایی در ۶۰ تکرار و در پنج اجرای مستقل نشان می دهند.

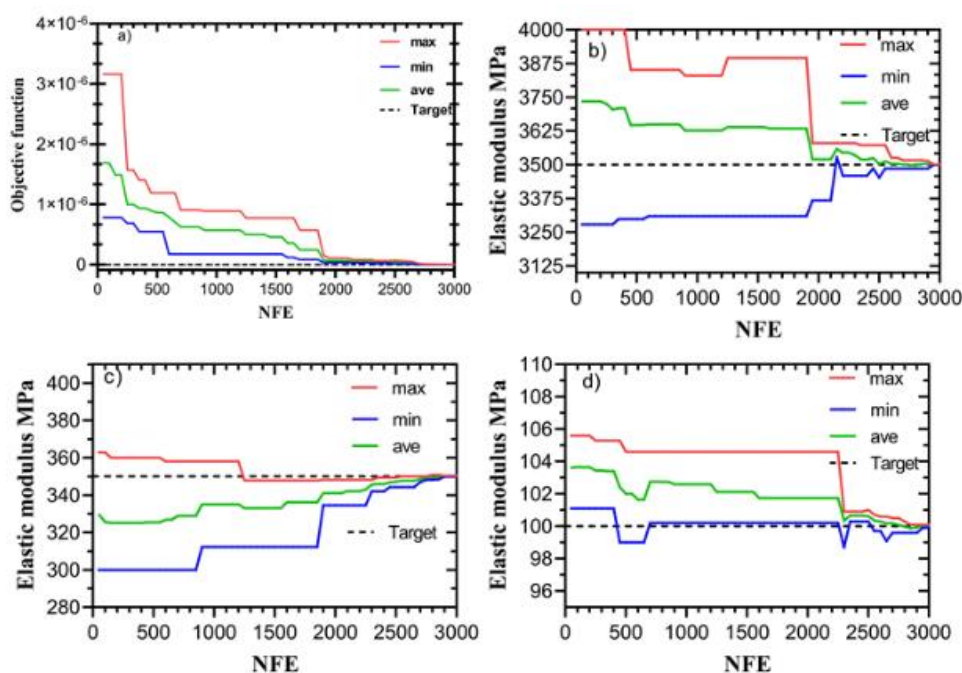
نمودار a نشان دهنده تمایل تابع هدف به حرکت به

در شکل ۴، نمودارهای چهارگانه ای ترسیم شده اند که نتایج محاسبات بازگشتی ضریب سختی و ضخامت لایه روسازی را با استفاده از روش DQ-GWO برای

مقادیر محاسبات بازگشتی است که بر اساس مقادیر شکل قبل تولید شده است. این نمودارها برای سادگی در قیاس و تحلیل داده‌ها تولید شده است.

با توجه به نمودارهای ترسیم شده، می‌توان دریافت که روش مورد بحث با استفاده از جمعیت اولیه‌ای ۵۰ تایی در $NFE=2000$ ، تقریباً به پاسخ مد نظر نزدیک شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که این روش قادر است با تعداد مناسبی از جمعیت و تکرارها، به پاسخ مطلوب برسد.

سمت صفر است. این نمودار می‌تواند به‌عنوان یک شاخص کلیدی در بررسی عملکرد الگوریتم در نظر گرفته شود. نمودارهای **b** تا **d** به ترتیب نتایج حاصل برای به‌دست‌آوردن ضریب ارتجاعی لایه‌های آسفالتی، اساس (زیراساس) و بستر متراکم را نشان می‌دهند. خط‌چین افقی مشکی رنگ در هر نمودار، پاسخ مدنظر برای هر لایه را به نمایش می‌گذارد. همچنین، هر خط رنگی در هر نمودار، تلاش‌های انجام شده در هر بار اجرای این روش را نشان می‌دهد. شکل ۵ شامل میانگین



شکل ۵. میانگین نتایج محاسبات بازگشتی برای محاسبه ضریب ارتجاعی و ضخامت لایه‌های روسازی با استفاده از روش DQ-GWO

نتایج حاصل از محاسبات بازگشتی با روش ترکیبی DQ-GWO و همچنین میزان خطای نسبی نتایج در جدول ۴ نیز ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج روش تلفیقی محاسبات بازگشتی با الگوریتم بهینه‌سازی GWO

		E1	E2	E3	
GWO	3000	3502.12	350.24	100.12	0.08%

۶. نتیجه گیری

مزایای این روش پیشنهادی جهت تخمین پارامترهای مجهول می‌باشد. همچنین، نشان داده شد که می‌توان از این روش پیشنهادی به عنوان یک روش قابل اطمینان برای محاسبه پارامترهای مجهول یک سازه چندلایه، از جمله روسازی، استفاده نمود. استفاده از مدل مذکور این امکان را برای مهندسين روسازی فراهم می‌آورد که با حجم محاسباتی کمتر، با تخمین مدول الاستیسیته لایه-های مختلف روسازی (به صورت غیرمخرب) ظرفیت سازه‌ای روسازی در حال خدمت را بررسی و همچنین کمک شایانی به تصمیم‌گیری‌های لازم در سیستم مدیریت روسازی می‌نماید.

در این پژوهش، یک روش ترکیبی DQ-GWO بر اساس تئوری الاستیسیته و با فرض تقارن محوری برای تحلیل معکوس روسازی به منظور تخمین مدول الاستیک لایه-های روسازی توسعه یافته است. روش عددی قدرتمند DQ که دارای پایداری، دقت و سرعت زیاد در تحلیل می‌باشد، به عنوان تکنیک شبیه‌سازی عددی به کار گرفته شده و با الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری برای حداقل نمودن تابع هدف و محاسبه پارامترهای مجهول (مدول الاستیسیته لایه‌های روسازی) ترکیب شده است. همگرایی سریع، دقت زیاد و هزینه محاسباتی کم از

۷. مراجع

- Ali, N. A. and Khosla, N. P. 1987. "Determination of layer moduli using a falling weight deflectometer". *Transport. Res. Record* 1117.
- de Araújo, P. C., Soares, J. B., de Holanda, Á. S., Parente, E., and Evangelista, F. 2010. "Dynamic viscoelastic analysis of asphalt pavements using a finite element formulation". *Road Mater. Pavement Design*, 11(2): 409-433. <https://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690282>
- Egorchev, M. and Tiumentsev, Y. 2018. "Homotopy continuation training method for semi-empirical continuous-time state-space neural network models". In *International Conference on Neuroinformatics*, pp. 115-120.
- Eslaminia, M. and Guddati, M. N. 2016. "Fourier-finite element analysis of pavements under moving vehicular loading". *Int. J. Pavement Eng.*, 17(7): 602-614. <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1007237>
- Faris, H., Aljarah, I., Al-Betar, M. A. and Mirjalili, S. 2018. "Grey wolf optimizer: A review of recent variants and applications". *Neural Comput. Appl.*, 30: 413-435. <https://doi.org/10.1007/s00521-017-3272-5>
- Farshchian Yazdi, M., Kamel, R., Seyyed Mahdavi Chabok, S. J. and Kheir Abadi, M. 2023. "Gate allocation based on a combination of gray wolf algorithm and fuzzy logic system". *Quart. J. Transport. Eng.*, 14(3): 2695-2711. doi: 10.22119/jte.2021.306086.2561. [In Persian]
- Garbowski, T. and Pożarycki, A. 2017. "Multi-level backcalculation algorithm for robust determination of pavement layers parameters". *Inverse Probl. Sci. Eng.*, 25(5): 674-693. <https://doi.org/10.1080/17415977.2016.1191073>
- Gopalakrishnan, K. 2009. "Neural network-swarm intelligence hybrid nonlinear optimization algorithm for pavement moduli back-calculation". *J. Transport. Eng.*, 136(6): 528-536. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.000012](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.000012)
- Gopalakrishnan, K. and Papadopoulos, H. 2011. "Reliable pavement backcalculation with confidence estimation". *Sci. Iran.*, 18(6): 1214-1221. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.11.018>
- Hamim, A., Yusoff, N. I. M., Ceylan, H., Rosyidi, S. A. P. and El-Shafie, A. 2018. "Comparative study on using static and dynamic finite element models to develop FWD measurement on flexible pavement structures". *Constr. Build. Mater.*, 176: 583-592. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.082>
- Heydari, A., Malakouti, M., Meraji, S. H., Malekzadeh, P. and Ramesh Khah, S. 2020. "Back-calculation of pavement layer elastic modulus using the hybrid differential quadrature method and harmony search optimization algorithm". *Sharif J. Civ. Eng.*, 36: 37-45. 10.24200/j30.2019.52331.2466. [In Persian]
- Khaleghi, F., Keshavarz, A. and Malakouti Olounabadi, M. 2022. "Seismic analysis of rigid walls retaining a cross-aniso-tropic soil by the differential quadrature method". *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 26(9): 3947-3960. <https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1827045>

- Karami, G. and Malekzadeh, P. 2002. "A new differential quadrature methodology for beam analysis and the associated differential quadrature element method". *Comput. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 191(32): 3509-3526. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00289-X](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00289-X)
- Karami, G. and Malekzadeh, P. 2003. "Application of a new differential quadrature methodology for free vibration analysis of plates". *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 56(6): 847-868. <https://doi.org/10.1002/nme.590>
- Karami, G., Malekzadeh, P. and Shahpari, S. A. 2003. "A DQEM for vibration of shear deformable nonuniform beams with general boundary conditions". *Eng. Struct.*, 25(9): 1169-1178. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00065-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00065-8)
- Kargah-Ostadi, N. and Stoffels, S. M. 2015. "Backcalculation of flexible pavement structural properties using a restart covariance matrix adaptation evolution strategy". *J. Comput. Civ. Eng.*, 29(2): 04014035. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000309](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000309)
- Li, M. and Wang, H. 2017. "Development of ANN-GA program for backcalculation of pavement moduli under FWD testing with viscoelastic and nonlinear parameters". *Int. J. Pavement Eng.*, 20(4): 490-498. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1309197>
- Li, C., Ashlock, J. C., Lin, S. and Vennapusa, P. K. 2018. "In situ modulus reduction characteristics of stabilized pavement foundations by multichannel analysis of surface waves and falling weight deflectometer tests". *Constr. Build. Mater.*, 188: 809-819. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.163>
- Liu, J., Liu, F., and Wang, L. 2024. "Automated, economical, and environmentally-friendly asphalt mix design based on machine learning and multi-objective grey wolf optimization". *J. Traffic Transport. Eng.*, 11(3): 381-405. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.10.002>
- Malakouti, M., Ameri, M. and Malekzadeh, P. 2014. "Incremental layerwise finite element formulation for viscoelastic response of multilayered pavements". *Int. J. Transport. Eng.*, 1(3): 183-198. doi:10.22119/IJTE.2014.4788. 10.22119/ijte.2014.4788
- Malakouti M., Ameri M., Malekzadeh P. 2014. "Dynamic viscoelastic incremental-layerwise finite element method for multilayered structure analysis based on relaxation approach". *J. Mech.*, 30: 593-602. <https://doi.org/10.1017/jmech.2014.42>
- Malakouti Olounabadi, M., Jahangiri, M., Ghazi, M. and Keshavarz, A. 2024. "A versatile deformation-oriented criterion for optimisation-based backcalculation of the pavement moduli and thickness". *Int. J. Pavement Eng.*, 25(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2433608>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M. and Lewis, A. 2014. "Grey wolf optimizer". *Adv. Eng. Software*, 69: 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Mohammadi Golafshani, E., Behnood, A. and Karimi, M. M. 2023. "Predicting the dynamic modulus of asphalt mixture using hybridized artificial neural network and grey wolf optimizer". *Int. J. Pavement Eng.*, 24(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.2005056>
- Najafi, F., Malakouti Olounabadi, M., Soroush, M. and Fazeli, A. 2020. "Investigation on influence of temperature and moving load speed on flexible pavement response with viscoelastic behavior using 3D finite element model". *Quart. J. Transport. Eng.*, 11(4): 971-987. doi: 10.22119/jte.2020.88168. [In Persian]
- Rabbani, A., Samui, P. and Kumari, S. 2023. "A novel hybrid model of augmented grey wolf optimizer and artificial neural network for predicting shear strength of soil". *Model. Earth Syst. Environ.*, 9(2): 2327-2347. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01610-4>
- Rameshkhah, S., Malakouti Olounabadi, M., Malekzadeh, P. and Meraji, S. H. 2018. "Quasi-static response analysis of viscoelastic flexible pavement using differential quadrature element method". *Quart. J. Transport. Eng.*, 10(2): 311-334. doi:10.1001.1.20086598.1397.10.2.7.2. [In Persian]
- Rameshkhah, S., Malakouti Olounabadi, M., Malekzadeh, P. and Meraji, S. H., 2020. "Dynamic response analysis of viscoelastic pavement using differential quadrature element method". *Int. J. Pavement Eng.*, 21(11): 1321-1335. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1545091>
- Saltan, M., Terzi, S. and Küçükşille, E. U. 2011. "Backcalculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining". *Expert Syst. Appl.*, 38: 2600-2608. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.050>
- Scimemi, G. F., Turetta, T. and Celauro, C. 2016. "Backcalculation of airport pavement moduli and thickness using the Lévy Ant Colony Optimization Algorithm". *Constr. Build. Mater.*, 119: 288-295. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.072>
- Sangghaleh, A., Pan, E., Green, R., Wang, R., Liu, X. and Cai, Y. 2014. "Backcalculation of pavement layer elastic modulus and thickness with measurement errors". *Int. J. Pavement Eng.*, 15(6): 521-531. <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.786078>

- Senseneey, C. T., Krahenbuhl, R. A. and Mooney, M. A. 2013. "Genetic algorithm to optimize layer parameters in light weight deflectometer backcalculation". *Int. J. Geomech.*, 13(4): 473-476. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000222](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000222)
- Shabbir, F. and Omenzetter, P. 2016. "Model updating using genetic algorithms with sequential niche technique". *Eng. Struct.*, 120: 166-182. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.028>
- Tarefder, R. A., Ahsan, S., and Ahmed, M. U. 2015. "Neural network-based thickness determination model to improve backcalculation of layer moduli without coring". *Int. J. Geomech.*, 15(3): 04014058. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000407](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000407)
- Vosoughi, A. R., Malekzadeh, P., Topal, U. and Dede, T. 2018. "A hybrid DQ-TLBO technique for maximizing first frequency of laminated composite skew plates". *Steel Compos. Struct., An Int. J.*, 28(4): 509-516. doi:10.12989/scs.2018.28.4.509.
- Yu, Q., Cai, L. and Wang, J. 2018. "Experimental and FEM research on airport cement concrete direct-thickening double-deck pavement slabs under aircraft single-wheel dynamic loads". *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018(1): 1952671. <https://doi.org/10.1155/2018/1952671>