



تکنیک بهینه‌سازی نوین بر مبنای ارتعاشات برای شناسایی توزیع ثوابت الاستیک و توان کسر حجمی ورق‌های مستطیلی مدرج تابعی

احمد قاسمی قلعه بهمن^{1*}، محمد مرادی گلستانی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان

* سمنان، صندوق پستی 19111-35131

چکیده

در تحقیق پیش رو، یک روش معکوس جدید جهت تعیین توزیع خواص مکانیکی و توان کسر حجمی صفحات مستطیلی مدرج تابعی ارائه شده است. این روش از تابع تحلیل ارتعاشی ورق‌های مدرج تابعی به همراه یک الگوریتم بهینه‌سازی فرالبتکاری کارآمد جدید تحت عنوان الگوریتم برخورد قطرات که برای اوین بار در این مقاله ارائه شده است، بهره‌مند می‌شود. الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهاد شده منکی بر جمعیت اولیه بوده و از رفاقت قطرات آب در سطوح مختلف تماس متواالی با سطح یک سیال الهام می‌گیرد. با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه دوم و اعمال اصل همیلتون، معادلات حرکت استخراج شده و در ادامه فرکانس‌های طبیعی ورق‌های مدرج تابعی مورد مطالعه، بدست آمده است. نتایج حاصل به ازای فازهای مختلف مواد مورد بررسی و برای نسبت‌های گوناگون طول به ضخامت، بدست آمده و با مقادیر موجود در مقالات مرجع مقایسه شده است. مطالعه مقایسه ای تابع بحث درست آمده با تابع حاصل از پنج الگوریتم بهینه‌سازی شناخته شده، تأیید می‌کند که الگوریتم پیشنهادی برخورد قطرات از کارآیی و عملکرد بهتری در سرعت همگرایی و دقت شناسایی مواد مدرج تابعی برخوردار می‌باشد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 فروردین 1395

پذیرش: 18 اردیبهشت 1395

ارائه در سایت: 08 تیر 1395

کلید واژگان:

مواد مدرج تابعی (FGM)

تحلیل ارتعاشی

روش معکوس

ثوابت الاستیک

الگوریتم بهینه‌سازی برخورد قطرات

A novel vibration-based optimization technique for identifying elastic constant distribution and volume fraction index in functionally graded rectangular plates

Ahmad Ghasemi-Ghalebahman^{*}, Mohammad Moradi-Golestani

Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

* P.O.B. 35131-19111 Semnan, Iran, ghasemi@semnan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 10 April 2016

Accepted 07 May 2016

Available Online 28 June 2016

Keywords:

Functionally graded materials
Vibration analysis
Inverse method
Elastic constants
Drops Contact Optimization algorithm

ABSTRACT

In this paper, a new inverse method has been presented for identifying the distribution of material properties and volume fraction index of rectangular functionally graded (FG) material plates. This method benefits from vibration analysis of FG plates accompanied by a novel and efficient meta-heuristic optimization algorithm called Drops Contact Optimization (DCO) algorithm, being proposed for the first time in this article. The presented algorithm relies on the initial population and mimics the behavior of water drops in different level of contacting successively with a fluid surface. Through using the second shear deformation theory and applying the Hamilton principle, the motion equations are derived and, subsequently, the natural frequencies of the considered FG plates are obtained. The outcomes relevant to considered different material phases and various length to thickness ratios are achieved and compared with those available in the literature. Making a comparative study of the obtained results with five well-known optimization algorithms confirms that the proposed DCO algorithm produces better performance in convergent speed and accurate characterization of FG materials.

دسته از سازه‌ها در روند کلی طراحی این قطعات در یک سازه اهمیت پیدا می‌کند. با افزایش استفاده از ورق‌ها در صنعت و نیاز به بالا بودن کارایی و اطمینان از عملکرد صحیح آنها استفاده از مواد نو مانند مواد مدرج تابعی (FGM)¹ افزایش یافته است. به کارگیری مواد کامپوزیت، آلیاژهای حافظه‌دار و مواد پیزوالکتریک و غیره، گسترش دامنه استفاده از این مواد منجر به افزایش تلاش‌های محققان جهت نیل به ساخت و طراحی سازه‌ها و قطعات با

۱- مقدمه

در مهندسی نوین به طور پیوسته از ورق‌ها به عنوان ساختارهای اساسی استفاده می‌شود. ورق‌ها و پوسته‌ها سازه‌های هستند که شکل اولیه آنها به ترتیب، تخت یا خمیده است و ضخامت آنها بسیار کوچکتر از دو بعد دیگر است. مأموریت‌ترین مثال‌ها برای ورق‌ها عبارتند از بدنه ماشین‌ها، پانل‌های جانبی و سقف ساختمان‌ها، دیسک‌های توربین، دیواره‌ها و کف مخازن ذخیره. بنابراین با توجه به کاربرد فراوان این مواد در صنعت، تحلیل این

¹ Functionally Graded Materials

ورق‌های مدرج تابعی توسط ناتارجان و همکاران [7] بررسی شده است. رفتار ارتعاشات آزاد ورق‌های مدرج تابعی بر مبنای تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر ورق، توسط سیدا ردی و همکاران [8] بررسی شده است. در مطالعه انجام شده، فرمول بندی تحلیلی برای حل ارتعاشات آزاد ورق‌های مدرج تابعی با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالاتر و بافرض صفر بودن تنش برشی عرضی در موقعیت سطوح بالائی و پایینی ورق، ارائه شده است.

تحلیل ارتعاش، کمانش و خمش ورق‌های مدرج تابعی ساندوبیچی و همسانگرد، با استفاده از تئوری برشی مرتبه بالاتر و بدون استفاده از تکنیک شبکه بندی توسط فریرا و همکاران [9] مطالعه شده است. معادلات حاکم، صریح و شرایط مرزی با استفاده از اصل جابجایی مجازی استخراج شده است. بهینه‌سازی دو بعدی ترکیب مواد، در مواد مدرج تابعی با استفاده از تحلیل بدون المان و یک الگوریتم ژنتیک توسط گوپه و همکاران [10] انجام شده است. روش پیشنهادی روی مواد مدرج تابعی فلز-سرامیک تمرکز دارد. بهینه‌سازی محل سنسور و محرك پیزاولکتریک برای کنترل ارتعاشات با استفاده از الگوریتم ژنتیک، توسط بروآنت و همکاران [11] انجام شده است.

بهینه‌سازی جرم ورق‌های مدرج تابعی تحت بارگذاری‌های مکانیکی در حضور قیدهای تنش و خیز توسط اشجاری و همکاران [12] ارائه شده است. در این کار، یک روش برای بهینه‌سازی تک هدفه ورق‌های همسانگرد مدرج تابعی با تکیه‌گاه ساده ارائه شده است.

از تئوری مرتبه بالا برای تحلیل ارتعاشی ورق‌های مدرج تابعی مستطیلی، توسط کمار و همکاران [13] استفاده شده است. آنها بدون لحاظ نمودن تنش برشی عرضی در سطوح بالا و پایین، یک حل تحلیلی برای ارتعاشات ورق مدرج تابعی با استفاده از تئوری مرتبه بالای برشی توسعه داده اند. خواص ماده در راستای ضخامت ورق بر اساس تابع توانی، متغیر فرض شده و معادلات حاکم بر اساس اصل کار مجازی استخراج و با استفاده از روش ناویر حل شده اند.

تحلیل استاتیکی و ارتعاشات آزاد ورق ساندوبیچی مدرج تابعی با استفاده از تئوری الاستیسیته سه بعدی توسط بیگلو و علیزاده [14] ارائه گردیده است. در این پژوهش به بررسی رفتار استاتیکی و ارتعاشات آزاد ورق‌های ساندوبیچی مستطیلی مشکل از هسته مدرج تابعی و رویهای همگن یا رویهای از جنس مواد مدرج تابعی و هسته همگن پرداخته شده است. تحلیل ارتعاش آزاد پوسته استوانه ای مدرج تابعی دو بعدی روی بستر الاستیک توسط ابراهیمی و نجفی زاده ارائه شده است [15].

یک روش تحلیلی دقیق برای ارتعاش آزاد ورق‌های مدرج تابعی مستطیلی رایسنر- میندلین، توسط حسینی‌هاشمی و همکاران [16] ارائه شده است. خواص مواد در راستای ضخامت ورق بر اساس تابع توانی از کسر حجمی ترکیبات، تغییر می‌کند. نتایج برای فرکانس طبیعی ورق مدرج تابعی مستطیلی با شش شرط تکیه‌گاهی ترکیبی مختلف و برای نسبت‌های طول به عرض، ضخامت به طول و شاخص گرادیان مواد، ارائه شده است.

تحلیل دو بعدی ارتعاشات صفحات دایروی با در نظر گرفتن اثر ترکیب مواد در دو جهت شعاعی و ضخامت و با استفاده از روش مربعات تفاضلی، توسط نجاتی و همکاران [17] ارائه گردیده است. حل تحلیلی ارتعاشات یک نانو ورق ناهمسانگرد دو لایه تقویت شده با نانولوله‌های کربنی در بستر الاستیک توسط حیدری رارانی و همکاران ارائه شده است [18]. در این

کارابی و کیفیت بهتر شده است. از طرفی استفاده از روش‌هایی مبتنی بر آزمایش‌های استاتیکی مرسوم مانند آزمایش کشش ساده برای این دست از مواد با مشکلاتی از قبیل تأثیرات تکیه‌گاهی، وابستگی به اندازه نمونه و وجود میدان‌های غیر یکنواخت نتش- کرنش همراه می‌باشد که معمولاً باعث ایجاد پراکندگی‌ها و خطاهای گسترشده‌ای در نتایج حاصل از آزمایش‌ها می‌شوند. همچنین، مخرب بودن این گونه آزمایش‌ها و عدم تکرار آن‌ها برای یک نمونه خاص از دیگر معایب این روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین خواص مواد به شمار می‌آیند.

حل دقیق سه بعدی برای ارتعاش ورق‌های مستطیلی مدرج تابعی توسط سنتهیل و همکاران [1] مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها یک حل دقیق سه بعدی برای ارتعاشات آزاد و اجرایی ورق‌های مدرج تابعی مستطیلی با تکیه‌گاه ساده ارائه نمودند. حل دقیق ارائه شده برای ورق‌های ضخیم و نازک و همچنین برای تغییرات دلخواه خواص مواد در راستای ضخامت ورق معتبر می‌باشد. نتایج برای ماده دو فازی فلز - سرامیک ورق‌های مدرج تابعی که دارای تغییرات خواص با استفاده از قانون توانی کسر حجمی ترکیبات و در راستای ضخامت ورق، ارائه شده است.

یک حل دقیق ارتعاشات آزاد برای ورق‌های مدرج تابعی مستطیلی توسط حسینی بافانی و همکاران [2] ارائه شده است. معادلات حاکم حرکت بر اساس تئوری کلاسیک ورق استخراج شده است. با استفاده از یک روش تحلیلی، سه معادله دیفرانسیل جزئی حرکت به دو معادله جدید مجزا دوباره فرمول بندی شده است. بر اساس حل ناویر، یک حل فرم بسته برای فرکانس‌های طبیعی ورق‌های مدرج تابعی مستطیلی با تکیه‌گاه ساده ارائه شده است.

تحلیل کمانش و ارتعاشات سازه‌های کامپوزیتی مدرج تابعی با استفاده از روش المان محدود توسط اویکویا و همکاران [3] دنبال شده است. در این کار المانی از نوع ماندلین و المانی از نوع رایسنر برای مدل کردن ورق تحت کمانش و ارتعاش آزاد توسعه داده شده اند. فرمول بندی المان نوع ماندلین بر اساس میانگین توزیع برشی عرضی در ضخامت ورق و با استفاده از درون یابی لاگرانژ انجام شده است. فرمول بندی المان نوع رایسنر نیز بر اساس توزیع برشی عرضی سهمی وار در ضخامت ورق و با استفاده از درون یابی لاگرانژ و هرمیت انجام شده است.

تحلیل رفتار ارتعاشی صفحات استوانه ای مدرج تابعی توسط ایسفندرزیوایی و همکاران [4] انجام گردیده است. در تحقیق آن‌ها صفحات تحت تأثیر فشار داخلی و تکیه‌گاه حلقه‌ای قرار داشته اند و از تئوری لاو- کیرشهوف^۱ تحت شرایط مرزی مختلف استفاده گردیده است.

ارتعاشات آزاد سه پارامتر ورق‌های مدرج تابعی، در بستر الاستیک پاسترناک توسط جم و همکاران [5] ارائه شده است. در این کار، بر اساس تئوری الاستیسیته سه بعدی و بر اساس روش مربعات دیفرانسیلی پارامترهای ارتعاش آزاد ورق‌های مستطیلی مدرج تابعی در بستر الاستیک پاسترناک بررسی شده است.

تحلیل ارتعاشات آزاد ورق مستطیلی مدرج تابعی ضخیم با استفاده از تئوری ورق اصلاح شده متغیر توسط رضا علی بخشی و همکاران [6] انجام شده است. ورق مورد بررسی دارای تکیه‌گاه ساده می‌باشد. مدول الاستیسیته، چگالی و جرم ورق بر اساس یک قانون ساده توانی، توزیع شده است اما ضریب پواسون ثابت می‌باشد. رفتار ارتعاش خمشی وابسته به اندازه در نانو

¹ Love-kirchhoff

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن ε_{ij} معرف مؤلفه‌های سفتی بوده که در پیوست (ب) تعریف شده است. در نهایت معادلات حرکت سیستم از طریق اصل همیلتون (رابطه (6)) به دست می‌آید:

$$0 = \int_0^T (\delta u + \delta v - \delta k) dt \quad (6)$$

که در آن δu , δv و δk به ترتیب بیانگر تغییرات انرژی کرنشی سیستم، تغییرات انرژی پتانسیل ناشی از کار نیروهای خارجی (که در ارتعاشات آزاد صفر است) و تغییرات انرژی جنبشی ورق بوده و از طریق روابط (8,7) بدست می‌آیند:

$$\delta u = \int_{\Omega} \left(\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (\sigma_{11} \delta \varepsilon_{11} + \sigma_{22} \delta \varepsilon_{22} + \sigma_{12} \delta \gamma_{12} + \sigma_{23} \delta \varepsilon_{13} + \sigma_{13} \delta \gamma_{13}) dz \right) dx dy \quad (7)$$

$$\delta k = \int_{\Omega} \left(\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho (\dot{u}_x \delta \dot{u}_x + \dot{u}_y \delta \dot{u}_y + \dot{u}_z \delta \dot{u}_z) dz \right) dx dy \quad (8)$$

پس از ساده‌سازی روابط (9-15) حاصل خواهد شد:

$$\delta u: \frac{\partial N_{11}}{\partial x} + \frac{\partial N_{12}}{\partial y} = I_0 + I_1 \ddot{\phi}_1 + I_2 \ddot{\phi}_2 \quad (9)$$

$$\delta v: \frac{\partial N_{22}}{\partial y} + \frac{\partial N_{12}}{\partial x} = I_0 \ddot{v} + I_1 \ddot{\psi}_1 + I_2 \ddot{\psi}_2 \quad (10)$$

$$\delta w: \frac{\partial Q_{13}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{23}}{\partial y} = I_0 \ddot{w} \quad (11)$$

$$\delta \phi_1: \frac{\partial M_{11}}{\partial x} + \frac{\partial M_{12}}{\partial y} - Q_{13} = I_1 \ddot{u} + I_2 \ddot{\phi}_1 + I_3 \ddot{\phi}_2 \quad (12)$$

$$\delta \phi_2: \frac{\partial L_{11}}{\partial x} + \frac{\partial L_{12}}{\partial y} - 2R_{13} = I_2 \ddot{u} + I_3 \ddot{\phi}_1 + I_4 \ddot{\phi}_2 \quad (13)$$

$$\delta \psi_1: \frac{\partial M_{22}}{\partial y} + \frac{\partial M_{12}}{\partial x} - Q_{23} = I_1 \ddot{v} + I_2 \ddot{\psi}_1 + I_3 \ddot{\psi}_2 \quad (14)$$

$$\delta \psi_2: \frac{\partial L_{22}}{\partial y} + \frac{\partial L_{12}}{\partial x} - 2R_{23} = I_2 \ddot{v} + I_3 \ddot{\psi}_1 + I_4 \ddot{\psi}_2 \quad (15)$$

که در آن N_{ij} , M_{ij} , L_{ij} , Q_{ij} , R_{ij} به ترتیب معرف منتجه‌های تنش، ممان، ممان مرتبه دوم، نیروی برشی و نیروی برشی مرتبه دوم و I_i ($i = 0, \dots, 4$) معرف مؤلفه‌های مرتب مختلط ممان اینترسی می‌باشند که روابط نظری آن‌ها در پیوست (ج) آمده است. شرایط تکیه‌گاهی از نوع تکیه‌گاه ساده بوده که به همراه مشخصات ورق در شکل 1 آمده است.

شرایط مرزی مسئله برای حل ناوی بر به صورت روابط (16) و (17) می‌باشد.

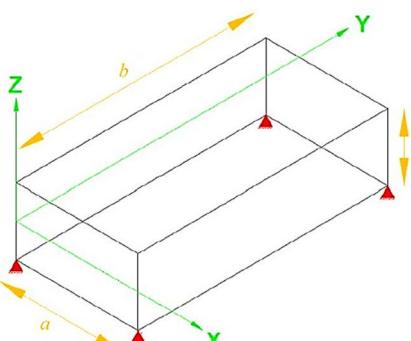


Fig. 1 Boundary conditions, coordinates and sheet geometry

شکل 1 شرایط تکیه‌گاهی، محورهای مختصات و هندسه ورق

تحقیق اثرات غیر محلی منظور شده و توزیع نانولوله‌های کربنی در راستای ضخامت ورق بصورت مدرج تابعی با دو فرم یکنواخت و کاهشی-افراشی در نظر گرفته شده است.

یک تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالا برای تحلیل خمش و ارتعاشات ورقهای مدرج تابعی، توسط تای و همکاران [19] ارائه شده است. معادلات حرکت بر اساس اصل همیلتون استخراج شده است. حل‌های تحلیلی برای تحلیل خمش و ارتعاش ورق مدرج تابعی با تکیه‌گاه ساده به دست آمده است. در مطالعه حاضر، پس از استخراج معادلات حرکت، الگوریتم بهینه‌سازی برخورد قطرات ارائه خواهد شد. سپس مجموع مربعات اختلاف مقادیر فرکانس طبیعی موجود در مقالات یا نتایج تجربی در دسترس و نیز مقادیر فرکانس طبیعی به دست آمده از حل الگوریتم بهینه‌سازی، به عنوان تابع هدف منظور می‌شود. سپس الگوریتم مورد بررسی به کمینه کردن تابع هدف پرداخته و در نهایت ثبات الاستیک، چگالی مواد و توان درصد حجمی به صورت معکوس ارائه می‌شود. در انتها، نتایج بدست آمده با مقادیر موجود در مراجع مقایسه گردیده، میزان همگرایی حل و درصد خطای آن گزارش خواهد شد.

2- حل مستقیم

در این مقاله خواص ماده در دو جهت x (راستای طولی) و z (راستای فازلی) در سطح فوقانی ورق در نظر گرفته شده و تغییر خواص بر اساس تابع توانی و بصورت روابط (1) و (2) انتخاب می‌گردد:

$$p = P_{c1}V_{c1} + P_{c2}V_{c2} + P_{m1}V_{m1} + P_{m2}V_{m2} \quad (1)$$

$$V_{c_1} = (1-f)(1-g), V_{c_2} = f(1-g), \quad (2)$$

$$V_{m_1} = (1-f)g, V_{m_2} = fg \quad (2)$$

که در آن P و $p = (x/a)^{n_x}$ و $f = (z/h)^{n_y}$ می‌باشند. پارامترهای نیز به ترتیب نماینده خاصیت موردنظر برای فاز و خاصیت منتجه و کلی حاصل شده برای ماده مدرج تابعی می‌باشند. نمادهای c_1 و c_2 معرف فاز دوگانه سرامیکی در سطح تحتانی ورق و m_1 و m_2 نیز معرف فاز دوگانه فلزی در سطح فوقانی ورق می‌باشند. با توجه به رابطه (2)، تغییر خواص ماده هم در راستای طولی و هم در راستای ضخامت منظور شده است. میدان جابجایی بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه دوم به صورت رابطه (3) منظور می‌شود:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(x, y, t) \\ v(x, y, t) \\ w(x, y, t) \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \phi_1(x, y, t) \\ \psi_1(x, y, t) \\ 0 \end{bmatrix} + z^2 \begin{bmatrix} \phi_2(x, y, t) \\ \psi_2(x, y, t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن u , v و w معرف مؤلفه‌های جابجایی صفحه میانی می‌باشند.

همچنین تابع ϕ_1 و ψ_1 بیان کننده مؤلفه‌های شبصفه میانی و ϕ_2 و ψ_2 نیز معرف مؤلفه‌های انحنای صفحه میانی می‌باشند. لذا در مجموع تئوری مرتبه دوم بر بشی شامل 7 تابع مجھول جابجایی، شبصفه و انحنای می‌باشد. با فرض خطی بودن روابط کرنش-جابجایی، میدان کرنش به صورت رابطه (4) بدست خواهد آمد:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} \\ \dot{\varepsilon}_{22} \\ \dot{\varepsilon}_{12} \\ \dot{\varepsilon}_{23} \\ \dot{\varepsilon}_{13} \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{22} \\ k_{12} \\ \gamma'_{23} \\ \gamma'_{13} \end{bmatrix} + z^2 \begin{bmatrix} \dot{k}_{11} \\ \dot{k}_{22} \\ \dot{k}_{12} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

پارامترهای این رابطه در پیوست (الف) توضیح داده شده است. همچنین معادله ساختاری ماده به صورت روابط (5) تعریف خواهد شد:

واسطه این برخورد حاصل می‌شود. البته این برخورد به اینجا ختم نشده، بلکه کشش سطحی آب اجزا حل شدن قطره را در آب نمی‌دهد و دوباره قطره را به بالا پرتاب می‌نماید اما با انرژی کمتر نسبت به حالت قبل و طبیعتاً ارتفاع کمتر، دوباره برخورد صورت می‌گیرد و موج دیگری حاصل می‌شود. این عمل تا جایی ادامه می‌یابد که انرژی قطره به مینیمم مقدار خود رسیده و عملیات برخورد متوقف شود.

چیزی که در عمل اتفاق می‌افتد برخاست قطره در هر مرحله از همان نقطه برخورد می‌باشد. اما کاری که در این روش پیشنهاد شده این است که محل برخاست قطره را جابجا کنیم. این جابجایی به شرح زیر انجام می‌شود:

در اولین برخورد موجی در سطح آب ایجاد می‌شود. در واقع دامنه موج حاصل همان فضای جستجوی اولیه می‌باشد. در گام اول در این فضای جستجو یک جمعیت اولیه ایجاد شده و مقادیر اولیه تابع هدف بدست می‌آید. از این مقادیر، بهترین مقدار انتخاب شده و برخاست قطره گام دوم از آن نقطه جدید ادامه می‌یابد. این بار قطره از این نقطه جدید بلند شده و دوباره به سمت سطح بازگشته و برخورد دوم رخ می‌دهد و دوباره شعاع جدید حاصل از برخورد دوم ایجاد می‌شود. طبیعتاً شعاع حاصله از شعاع حاصله برخورد اول کمتر خواهد بود. در این گام دوباره در شعاع جدید جمعیت جدید ایجاد می‌شود و مقدار بهترین تابع حاصل می‌شود و این فرایند آنقدر تکرار می‌شود که شعاع حاصله به صفر برسد. وقتی شعاع به صفر برسد یعنی دیگر برخوردی نخواهیم داشت و نقطه پهنه بدهد بدست آمده است. این مراحل به صورت مختصر به ترتیب زیر می‌باشد:

- 1- ایجاد قطره اولیه و اولین برخورد با سطح آب.
- 2- ایجاد اولین شعاع حاصل از اولین برخورد.
- 3- ایجاد جمعیت اولیه در اولین شعاع و محاسبه مقدار تابع در هر یک از نقاط.

4- پیداکردن بهترین مقدار حاصله و پرتاب قطره دوم از این نقطه.
5- برخورد قطره پرتاب شده مرحله دوم به سطح و ایجاد شعاع کاشه شفته ثانویه.
6- تکرار مراحل فوق تا صفر شدن شعاع.
شماتیک مراحل فوق مطابق شکل 4 می‌باشد.

این نکته قابل ذکر است که مراحل گفته شده تنها برای یک قطره می‌باشد و جمعیت اولیه ما برخورد قطره‌های متعدد آب به سطح آب (فضای جستجو) می‌باشد. پس به اندازه جمعیت اولیه قطرات آب را بوجود می‌آوریم. با این کار تقریباً تمام فضای جواب اولیه ما پوشش داده می‌شود و تمام فضای جواب بررسی می‌شود.

این تعداد جمعیت اولیه (قطرات آب اولیه) به صورت اتفاقی ایجاد و در



Fig. 3 Rising drop after a collision with fluid surface [22]

شکل ۳ برخاست قطره پس از برخورد با سطح سیال [22]

$$x = 0, a \rightarrow \begin{cases} v(0, y, t) = 0 \\ v(a, y, t) = 0 \\ \psi_1(0, y, t) = 0 \\ \psi_1(a, y, t) = 0 \\ \psi_2(0, y, t) = 0 \\ \psi_2(a, y, t) = 0 \\ w(0, y, t) = 0 \\ w(a, y, t) = 0 \end{cases}, \begin{cases} M_{11}(0, y, t) = 0 \\ M_{11}(a, y, t) = 0 \\ N_{11}(0, y, t) = 0 \\ N_{11}(a, y, t) = 0 \end{cases}, \quad (16)$$

$$y = 0, b \rightarrow \begin{cases} u(x, 0, t) = 0 \\ u(x, b, t) = 0 \\ \phi_1(x, 0, t) = 0 \\ \phi_1(x, b, t) = 0 \\ \phi_2(x, 0, t) = 0 \\ \phi_2(x, b, t) = 0 \\ w(x, 0, t) = 0 \\ w(x, b, t) = 0 \end{cases}, \begin{cases} M_{22}(x, 0, t) = 0 \\ N_{22}(x, 0, t) = 0 \\ N_{22}(x, b, t) = 0 \\ M_{22}(x, b, t) = 0 \end{cases}, \quad (17)$$

از حل ناویر، میدان جابجایی بصورت رابطه (18) در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ \emptyset_1 \\ \emptyset_2 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \begin{bmatrix} u_{mn} \cos ax \sin \beta y \\ v_{mn} \sin ax \cos \beta y \\ w_{mn} \sin ax \sin \beta y \\ \emptyset_{mn} \cos ax \sin \beta y \\ \emptyset_{2mn} \cos ax \sin \beta y \\ \psi_{1mn} \sin ax \cos \beta y \\ \psi_{2mn} \sin ax \cos \beta y \end{bmatrix} e^{-i\omega t} \quad (18)$$

که در آن $\alpha = m\pi/a$ و $\beta = n\pi/b$ می‌باشد. در نهایت معادله حرکت به مسئله ویژه زیر منجر خواهد شد که از حل آن فرکانس‌های طبیعی سیستم بدست خواهد آمد (رابطه 19):

$$([k] - \omega^2[M]) \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ \emptyset_1 \\ \emptyset_2 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

3- طراحی بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم برخورد قطرات

3-1- الگوریتم برخورد قطرات

الگوریتم پیشنهادی برخورد قطرات^۱ یک الگوریتم فرالتکاری [20] و مبتنی بر جمعیت اولیه می‌باشد. این روش الهام گرفته از رفتار قطرات آب هنگام برخورد با سطح آب می‌باشد (شکل 2)، که برای اولین بار در این مقاله ارائه شده است. لازم به ذکر است برخلاف روش‌های ابتکاری که برای حل مسائل خاص طراحی شده اند، از روش‌های فرا ابتکاری برای حل دامنه وسیعی از مسائل و اغلب بدون توجه به شکل مسئله مورد نظر استفاده می‌شود. مطابق شکل 3، این رفتار در طبیعت به این گونه است که وقتی یک قطره از ارتفاعی خاص به سطح آب برخورد می‌کند، موجی در سطح آب به

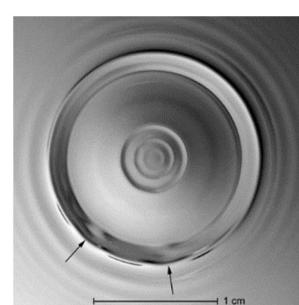


Fig. 2 Droplet collision and creating wave at its surrounding [21]

شکل ۲ برخورد قطره با سطح سیال و ایجاد موج پیرامون خودش [21]

گرفته می‌شود:

$$l_{i+1} = \frac{1}{S} l_i \quad (22)$$

که l_i طول موج حاصل از تکرار قبل و l_{i+1} طول موج حاصل از تکرار جاری می‌باشدند. همچنین متغیر S نیز در رابطه (22) همچون متغیر T وابسته به شرایط ذکر شده فوق می‌باشد. مقدار این متغیر نیز برابر 2 در نظر گرفته شده است.

از طرفی به دلیل اینکه رابطه ۱ سرعت، مناسب با طول موج می‌باشد با کاهش طول موج، سرعت نیز کاهش پیدا می‌کند. به این ترتیب شاعع که با سرعت رابطه دارد (رابطه (23))، در هر تکرار، با کاهش طول موج و بر اساس آن، سرعت موج، کاهش پیدا می‌کند:

$$\text{Radius} = 5v \quad (23)$$

مشابه شاعع که در هر تکرار مقدار جدید می‌باشد، میزان تولید جمعیت اولیه را هم در هر تکرار به روز می‌کنیم. از آنجایی که در تکرارهای آخر شاعع بسیار کوچک می‌شود، جمعیت تولیدی نیز کاهش می‌باشد. با این کار انجام محاسبات کاهش و در نتیجه سرعت اجرای الگوریتم نیز افزایش پیدا خواهد

کرد. میزان جمعیت از رابطه (24) به دست می‌آید:

$$\text{pop}_i = \frac{1}{2(\text{Radius}_{i+1} - \text{Radius}_i)} \quad (24)$$

که pop_i میزان جمعیت در تکرار قبل، pop_{i+1} میزان جمعیت در تکرار جاری، i مقدار شاعع در تکرار قبل و $i+1$ مقدار شاعع در تکرار جاری می‌باشدند.

3-2-1-3- روش تکمیلی برای گریز از مینیمم‌های محلی^۱:

به منظور گریز از مینیمم‌های محلی در این روش دو راهکار پیشنهاد می‌شود. راهکار اول پاشش اولیه نقاط اتفاقی در تمام فضای جواب و ایجاد جستجو از تمام آن نقاط می‌باشد. در راهکار دوم، از رفتار قطرات هنگام برخورد و برگشت آنها الهام می‌گیرد. اگر قطره و سیال مورد اصابت، تحت شرایط خاصی (چگالی، پیوند بین مولکولی، لزجت و دیگر موارد ذکر شده) قرار بگیرند، به جای برگشت یک قطره، مقدابر بیشتری از قطرات از سطح آب باز می‌گردد [24]. شکل ایجاد شده به تاج آب^۲ موسوم می‌باشد (شکل ۵).

رفته رفته با کاهش انرژی قطره بازگشتی، شانس ایجاد تاج آب کاهش یافته و در نهایت این پدیده از بین خواهد رفت. حال به جای اینکه پیرامون یک قطره بازگشتی بررسی شود، پیرامون چندین قطره بررسی می‌گردد. با این روش عملکرد دور تر از مینیمم واقعی نیز بررسی می‌گردد.

همان طور که ذکر گردید این پدیده فقط در شرایطی رخ می‌دهد که انرژی قطره بازگشتی زیاد باشد (تکرارهای اول الگوریتم). در این روش، جواب



Fig. 5 Water Crown [22]

شکل 5 تاج آب [22]

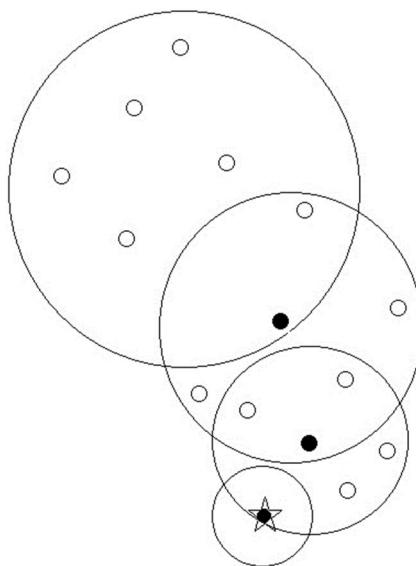


Fig. 4 The schematic of algorithm procedure

شکل 4 شماتیک مراحل انجام الگوریتم

فضای جستجو پاشیده می‌شود و سپس مراحل جستجو آغاز می‌گردد. با توجه به اینکه نقاط اولیه تقریباً در تمام فضا ایجاد شده‌اند تا حد زیادی از به دام افتادن در نقاط بهینه محلی جلوگیری می‌شود. روش تکمیلی دیگری نیز برای رفع این مشکل وجود دارد که در ادامه به تفضیل به شرح آن پرداخته می‌شود.

3-1-1- روابط مورد استفاده در الگوریتم
فرمول ارائه شده برای سرعت ایجاد شده موج در سطح آب به صورت رابطه (20) می‌باشد [23]:

$$V = \sqrt{\frac{gl \tanh\left(\frac{2\pi d}{l}\right)}{2\pi}} \quad (20)$$

که در رابطه فوق، g شتاب گرانش زمین، d عمق سیال زیرین محل برخورد و l طول موج حاصل از برخورد قطره به سطح سیال می‌باشدند. این مسئله در شرایط ایده آل ($g=9.81$) و عمق آب متوسط 2 متر در نظر گرفته شده است.

در ابتدای انجام الگوریتم، مقدار l اولیه به صورت رابطه (21) می‌باشد:

$$l = \frac{1}{T} (Ub - Lb) \quad (21)$$

متغیر T ، متغیری می‌باشد که وابسته به شرایط زیادی همچون چگالی، دما، فشار محیط، زاویه برخورد قطره با سطح سیال و مواردی دیگر است که به دست آوردن این ضرایب جای بحث دارد. به صورت تجربی بهترین مقدار به دست آمده گزارش شده در این مقاله برابر 10 می‌باشد. همچنین در رابطه (21) حدود بالا و پایین به ترتیب با علائم Ub و Lb معرفی شده‌اند.

در هر پرتاب دوباره قطره به سمت بالا، مقداری از انرژی قطره کاسته شده و این موضوع باعث می‌شود در تکرار بعدی قطره کمتر به بالا پرتاب شود. نتیجتاً در هر برخورد قطره با سطح سیال طول موج ایجاد شده کاهش خواهد یافت. کاهش انرژی قطره به عوامل مختلفی همچون شتاب گرانش، چگالی سیال، چگالی قطره، کشش سطحی سیال مورد اصابت و همچنین قطره و غیره بستگی دارد که از حوصله این مقاله خارج می‌باشد.

طول موجی که در هر مرحله ایجاد می‌شود مطابق رابطه (22) در نظر

¹ Local optima
² Water crown

شده از آزمایشگاه، انجام می‌شود. برای بدست آوردن ثوابت الاستیکی صفحه موردنظر معمولاً تابع هدف، اختلاف بین فرکانس‌های عددی و آزمایشگاهی می‌باشد که در این تحقیق به صورت رابطه (26) تعریف می‌گردد:

$$F = \sum_{i=1}^n (\bar{\omega}_i - \omega_i)^2 \quad (26)$$

که در آن $\bar{\omega}$ فرکانس‌های آزمایشگاهی و ω فرکانس‌های محاسبه شده از حل عددی است. در این رابطه n نیز معرف تعداد فرکانس‌های طبیعی انتخاب شده از سیستم ارتعاشی می‌باشد و از آنجایی که پنج فرکانس طبیعی اول در نظر گرفته شده است، مقدار n در رابطه (26) برابر 5 می‌باشد.

در حل این گونه مسائل معمولاً برای همگرا شدن جواب محدودیت‌هایی را در نظر می‌گیرند که در اینجا با بررسی محدوده‌های ارائه شده در مقالات مختلف برای ماده نوع 1 به صورت رابطه (27) و برای ماده نوع 2 به صورت رابطه (28) انتخاب می‌گردد:

$$\begin{aligned} 30 < E_M(\text{GPa}) &< 100 \\ 110 < E_C(\text{GPa}) &< 170 \\ 1000 < \rho_M &< 3000 \\ 1500 < \rho_C &< 3500 \\ 0 < n < 20 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} 30 < E_M(\text{GPa}) &< 100 \\ 110 < E_C(\text{GPa}) &< 500 \\ 1000 < \rho_M &< 3000 \\ 2000 < \rho_C &< 4000 \\ 0 < n < 20 \end{aligned} \quad (28)$$

3- الگوریتم حل

روند اجرای الگوریتم حل معکوس پیشنهادی به طور خلاصه در شکل 7 به نمایش گذاشته شده است. در ابتدا، با استفاده از فرکانس طبیعی اول آزمایشگاهی که نقش ورودی الگوریتم را دارند، خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی مورد نظر به طور تصادفی بر اساس الگوریتم برخورد قطرات تعیین می‌گردد. سپس، به کمک این خواص و با بکارگیری روش ارائه شده در این تحقیق به محاسبه فرکانس اول عددی پرداخته می‌شود. در ادامه، مقایسه‌ای میان فرکانس محاسبه شده و مقدار آزمایشگاهی صورت می‌گیرد که به دنبال آن اگر ارزیابی تابع هدف با موفقیت انجام شود یا به عبارتی تابع هدف کمینه گردد، آخرین ثوابت مکانیکی بدست آمده به عنوان نتایج نهایی ارایه می‌شوند. در غیر این صورت، دوباره الگوریتم از سر گرفته شده و خواص جدیدی با توجه به الگوریتم برخورد قطرات تولید می‌شود. این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که تابع هدف با ارزایی قیود تعریف شده کمینه گردد.

4- نتایج و اعتبار سنجی

در این قسمت، ابتدا با استفاده از روش تئوری ارتعاشات صفحات مستطیلی مدرج تابعی [25]، به تعیین فرکانس طبیعی یک صفحه مدرج تابعی پرداخته و صحت نتایج حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سپس، با استفاده از فرکانس‌های بدست آمده برای ورق و با به کارگیری شیوه معکوس پیشنهادی بر اساس روش بهینه‌سازی الگوریتم برخورد قطرات به تعیین ثوابت الاستیک و ارزیابی عملکرد این روش پرداخته می‌شود. تمام نتایج حاصل بر مبنای تحلیل ارتعاشات آزاد یک ورق کامپوزیتی مدرج تابعی با دو نوع ماده انتخابی ارائه می‌گردد که مشخصات آن‌ها بر اساس جدول 1 می‌باشد.

در ادامه سه حالت برای شرایط صفحه از نظر ابعاد و همچنین گرادیان ماده انتخاب شده است که این حالات در جدول 2 قابل مشاهده می‌باشد.

به دست آمده در هر مرحله با جواب مرحله قبل مقایسه می‌گردد. اگر اختلاف دو جواب از مقدار مشخصی (ϵ) بیشتر باشد، تاج آب رخ خواهد داد در غیر این صورت اجرای عملیات تاج آب متوقف خواهد شد. تنظیم پارامتر ϵ بستگی به نوع مسئله و دقت مورد نیاز در حل مسئله دارد. در حالت کلی $\epsilon = 0.5$ در نظر گرفته شده است. شرط اجرای تاج آب به صورت رابطه (25) می‌باشد:

$$(25) \quad (\text{Best Fitness})_{i+1} - (\text{Best Fitness})_i > \epsilon$$

که بهترین مقدار تکرار قبل و $(\text{Best Fitness})_{i+1}$ بهترین مقدار تکرار جاری می‌باشد.

3-1-3- فلوچارت الگوریتم برخورد قطرات
تمام مراحل شرح داده شده به صورت خلاصه در این قسمت و به صورت فلوچارت نشان داده شده در شکل 6 می‌باشد.

2- عملکرد روش معکوس پیشنهادی

متغیرهای طراحی در این مسئله شامل دو ثابت الاستیک، دو چگالی و توان درصد حجمی برای فاز سرامیک و فلز می‌باشد که در مجموع پنج مجھول را تشکیل می‌دهند.

تشخیص پارامترهای مکانیکی، از طریق فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری

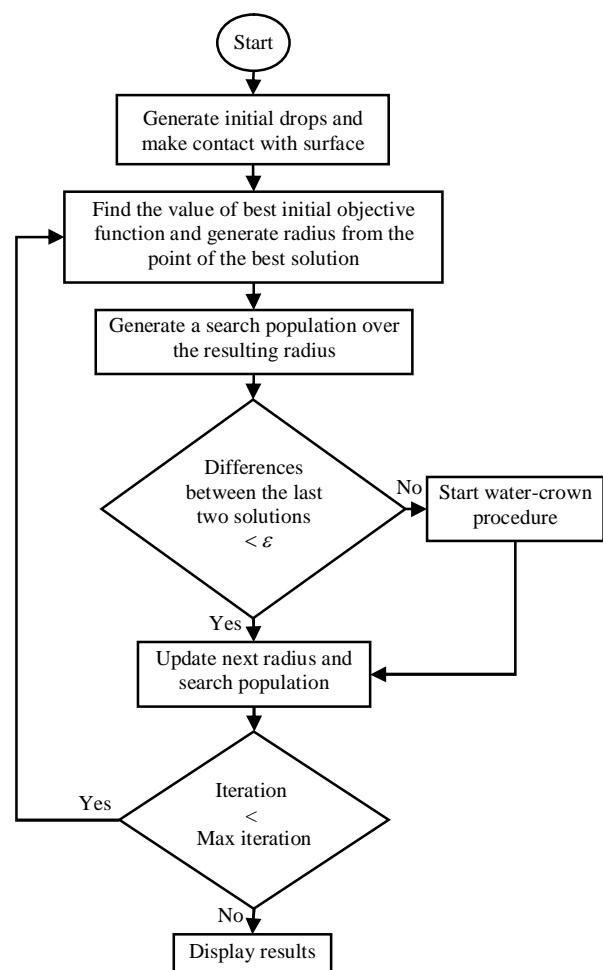


Fig. 6 Drops contact algorithm flowchart

شکل 6 فلوچارت الگوریتم برخورد قطرات

تکنیک پیوپیه‌سازی نوین بر مبنای ارتعاشات برای شناسایی توزیع قوایت الاستیک و توان کسر جرمی ورق‌های مستقیمی ...
جدول 4 پنج فرکانس طبیعی اول برای ماده نوع 2 با سه حالت مختلف

Table 4 First five natural frequencies for material type 2 with three different states

پارامتر فرکانس طبیعی (λ) ماده نوع 2 (10^3)					حالت
λ_5	λ_4	λ_3	λ_2	λ_1	
1.432	1.422	0.221	0.136	0.014	I
0.640	0.625	0.227	0.140	0.049	II
3.060	3.060	0.548	0.329	0.046	III

5- تعیین ثوابت الاستیک با روش معکوس

برای حل مسئله معکوس، نیاز به داده‌های آزمایشگاهی و یا داده‌های از پیش تعیین شده می‌باشد. 5 فرکانس اول برای دو ماده خاص در بخش قبل به دست آمدند. در این قسمت، داده‌های آزمایشگاهی همان پنج فرکانس اول در نظر گرفته شده و سپس حل معکوس آن دنبال شده است. پس از محاسبه مقادیر به دست آمده، درصد خطای برای هر حالت محاسبه و ذکر شده است. مقادیر مستقیم، معکوس و درصد خطای در جداول 5 و 6 برای دو نوع ماده 1 و 2 و حالت‌های مختلف آورده شده اند. در این جداول، نتایج توسط الگوریتم برخورد قطرات با جمعیت اولیه 80 و تعداد تکرار 100 به دست آمده اند.

طبیعی است با افزایش تعداد جمعیت اولیه و تعداد تکرار، به جواب دقیق‌تر نایل شده که این کار مستلزم استفاده از سیستم‌های کامپیوترا برای حجم محاسبات بالاتر و همچنین صرف زمان بیشتر است که با مشاهده درصد خطاهای به دست آمده در جداول 5 و 6 بتوان پیشنهاد نمی‌گردد. نمودارهای همگرایی الگوریتم، در شکل‌های 8 و 9 قابل مشاهده می‌باشند. این نمودارها روند حدس اولیه تابع هدف و نوع پیشرفت به سمت بهترین جواب را نشان می‌دهند که هر دو نمودار مقدار همگرایی نهایی بسیار مناسبی را به نمایش گذاشته اند. شکستگی نمودارها به مراحل حل بستگی داشته و در هر تکرار در صورت یافتن نقطه‌ی بهینه تری نسبت به تکرار قبل، نمودار نزول می‌کند در غیر این صورت نقطه‌ی بهینه تکرار قبل مورد پذیرش قرار می‌گیرد.

جدول 5 ثوابت الاستیک به دست آمده به روش معکوس برای ورق‌های کامپوزیتی
مدرج تابعی نوع 1 توسط الگوریتم برخورد قطرات

Table 5 Inverse obtaining the elastic constants for FGM type 1 based on DCO

درصد خطای	روش معکوس پیشنهادی	مقدار مرجع [25]	مشخصه صفحه	حالت
0.998	69.301	70(GPa)	E_M	
-1.330	153.009	151 (GPa)	E_C	
0.629	2689.95	2707(kg/m ³)	ρ_M	I
-0.063	3001.901	3000(kg/m ³)	ρ_C	
10.360	4.482	5	n	
2.725	68.092	70(GPa)	E_M	
1.319	149.008	151(GPa)	E_C	
0.033	2706.098	2707(kg/m ³)	ρ_M	II
-0.236	3007.091	3000(kg/m ³)	ρ_C	
3.19	9.681	10	n	
4.145	67.098	70(GPa)	E_M	
-1.371	153.071	151(GPa)	E_C	
1.163	2675.500	2707(kg/m ³)	ρ_M	III
3.667	2889.967	3000(kg/m ³)	ρ_C	
0.585	19.883	20	n	

با توجه به جداول 1 و 2 و با ترکیب مواد نوع 1 و 2، پنج فرکانس اول برای برای صفات با حالت‌های I و II و III به صورت مستقیم به دست آمده‌اند که در جداول 3 و 4 آورده شده اند.

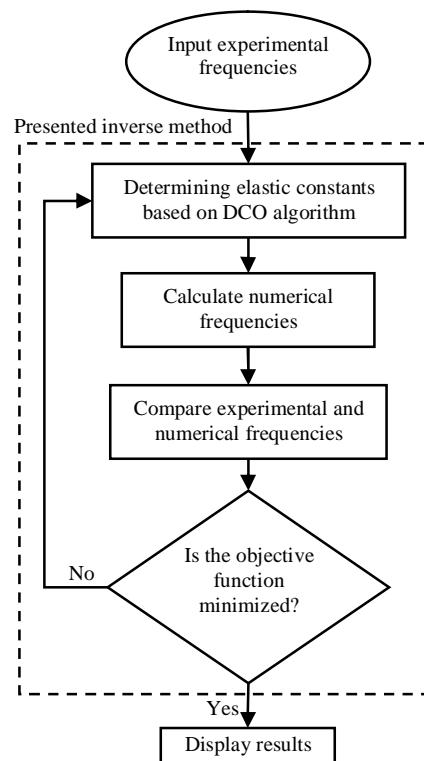


Fig. 7 Flowchart of the presented inverse algorithm

شکل 7 فلوچارت الگوریتم روش معکوس پیشنهادی

جدول 1 ثوابت الاستیک ورق کامپوزیت مدرج تابعی بر اساس نوع ماده انتخابی

Table 1 Elastic constants of functionally graded composite plate for the two types of material selection

ν	ثوابت الاستیک				نوع ماده
	ρ_C (kg/m ³)	ρ_M (kg/m ³)	E_C (Gpa)	E_M (Gpa)	
0.3	3000	2707	151	70	نوع 1 Al/Zro2
0.17	3210	2707	427	70	نوع 2 Al/SiC

جدول 2 سه حالت مختلف در نظر گرفته شده برای صفحه

Table 2 Three different cases intended for the plate

حالات	طول صفحه (a) (m)	عرض صفحه (b) (m)	ضخامت (t) (m)	گرادیان
I	2	3	0.2	5
II	3	2	0.5	10
III	1	1	0.1	20

جدول 3 پنج فرکانس طبیعی اول برای ماده نوع 1 با سه حالت مختلف

Table 3 First five natural frequencies for material type 1 with three different states

حالات	پارامتر فرکانس طبیعی (λ) ماده نوع 1 (10^3)				
	λ_5	λ_4	λ_3	λ_2	λ_1
I	0.962	0.955	0.148	0.082	0.011
II	4.234	4.100	1.514	0.843	0.348
III	1.994	1.994	0.364	0.193	0.034

6- مقایسه ی کارآبی الگوریتم ارائه شده با چند الگوریتم موجود
 برای به چالش کشیدن توانایی ارائه جواب مناسب در الگوریتم حاضر، عملکرد این الگوریتم با پنج الگوریتم قادرمند موجود، مقایسه و بررسی شده است. این پنج الگوریتم عبارت اند از: الگوریتم زنتیک [26]، الگوریتم تیرید² [27]، الگوریتم ازدحام ذرات³ [28]، الگوریتم کلونی مورچهها⁴ [29-30] و الگوریتم چرخه‌ی آب⁵ [31]. برای این قسمت دو مثال حل شده و مقایسه گردیده است. ابتدا ماده نوع 1 و حالت III و سپس ماده نوع 2 و حالت I حل و الگوریتم حاضر با پنج الگوریتم ذکر شده مقایسه شده است. مقایسه بین روش حاضر و روش‌های موجود در شکل‌های 10 و 11 قابل مشاهده می‌باشد.

همان‌طور که از مشاهده شکل‌های 10 و 11 نتیجه می‌شود، الگوریتم برخورد قطرات (DCO) پیشنهاد شده دارای دقت جواب نهایی بسیار مناسب، در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های قادرمند ارائه شده می‌باشد. همچنین همگرایی این الگوریتم بسیار بالاتر از دیگر الگوریتم‌ها می‌باشد. در شکل 10، نمودار از تکرار تقریباً پنجاه به همگرایی بسیار مناسبی رسیده است که این امر نشان دهنده‌ی این موضوع است که می‌توان تعداد تکرار را برای حل این مسئله به نصف کاهش داد که این موضوع در کاهش محاسبات و زمان حل مسئله بسیار تأثیر گذار می‌باشد. در این مورد، کاهش 50 درصدی زمان و حجم محاسبات را نشان می‌دهد. در شکل 11 نیز، نمودار از تکرار 80 به بعد همگرایی گردیده است که مشابه حالت قبل، این موضوع نشان دهنده این موضوع است که می‌توان 20 درصد در کاهش حجم و زمان محاسبات صرفه جویی نمود.

در جداول 7 و 8، ثابت به دست آمده توسط روش پیشنهادی با پنج الگوریتم قادرمند موجود مقایسه شده است. این جداول، خطای کژارش شده برای هر روش، میزان دقت و قدرت الگوریتم‌های ارائه شده در مقایسه با الگوریتم برخورد قطرات را به نمایش می‌گذارند.

7- نتیجه گیری

در این تحقیق روش جدیدی برای تعیین خواص مکانیکی صفحات کامپوزیتی

جدول 6 ثوابت الاستیک به دست آمده به روش معکوس برای ورقهای کامپوزیتی
 مدرج تابعی نوع 2 توسط الگوریتم برخورد قطرات

Table 6 Inverse obtaining the elastic constants for FGM type 2 based on DCO

حالت	مشخصه	مقدار مرجع	روش معکوس	درصد
	صفحه	[25]	پیشنهادی	خطا
I	E_M	70(GPa)	67.008	4.274
I	E_C	427(GPa)	411.089	3.726
I	ρ_M	2707(kg/m ³)	2699.746	0.267
I	ρ_C	3210(kg/m ³)	3220.820	-0.337
I	n	5	4.961	0.780
II	E_M	70(GPa)	73.980	-5.685
II	E_C	427(GPa)	420.881	1.433
II	ρ_M	2707(kg/m ³)	2701.921	0.187
II	ρ_C	3210(kg/m ³)	3207.836	0.067
II	n	10	9.801	1.990
III	E_M	70(GPa)	76.915	-9.878
III	E_C	427(GPa)	426.081	0.215
III	ρ_M	2707(kg/m ³)	2700.927	0.224
III	ρ_C	3210(kg/m ³)	3190.086	0.620
III	n	20	22.009	-10.045

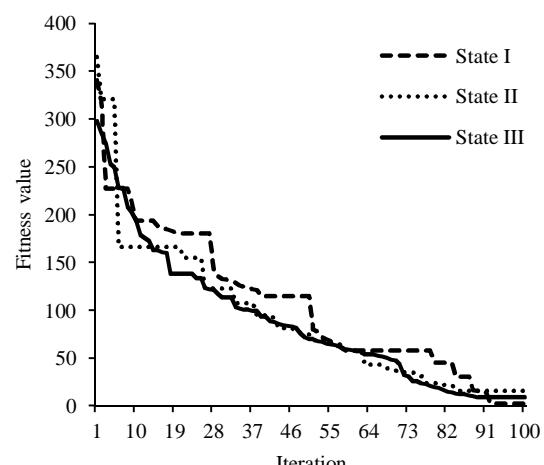


Fig. 8 Convergence study or material type 1 for three states I,II and III
 شکل 8 نمودار همگرایی ماده نوع 1 برای سه حالت I، II و III

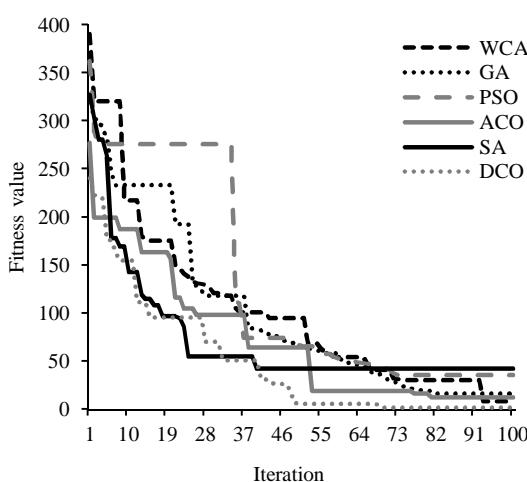


Fig. 10 Comparison of convergence rate of 6 optimization algorithms for material type 1 and state III

شکل 10 مقایسه نرخ همگرایی 6 الگوریتم بهینه‌سازی برای ماده نوع 1 و حالت III

¹ Genetic Algorithm(GA)

² Simulated Annealing (SA)

³ Particle Swarm Optimization algorithm (PSO)

⁴ Ant Colony Optimization algorithm (ACO)

⁵ Water Cycle Algorithm(WCA)

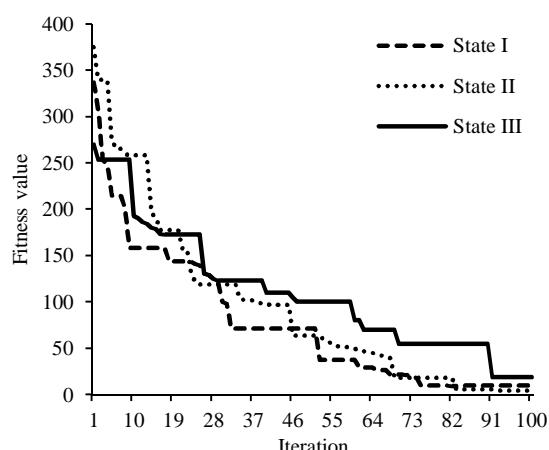


Fig. 9 Convergence study for material type 2 for three states I,II and III
 شکل 9 نمودار همگرایی ماده نوع 2 برای سه حالت I، II و III

جدول 7 مقایسه مشخصات مادی به دست آمده برای ماده نوع 1 حالت III

Table 7 Comparison of obtained material characteristics for material type 1 and state III

درصد خطای میانگین	n	ρ_c	ρ_M	E_c (GPa)	E_M (GPa)	الگوریتم حل
-	20	3000	2707	151	70	مرجع
4.722	17.900	2900.200	2694.012	146.928	65.371	زنگنه
7.023	17.300	2933.889	2680.251	143.901	60.501	تبرید
5.572	18.020	2948.251	2694.115	144.858	61.812	ازدحام ذرات
2.861	18.802	2993.011	2701.015	147.521	66.108	کلونی مورچه‌ها
2.071	19.262	2994.124	2700.852	147.851	67.235	چرخه‌ی آب
0.602	19.862	2993.215	2707.281	150.014	68.996	برخورد قطرات

جدول 8 جدول مقایسه مشخصات مادی به دست آمده برای ماده نوع 2 حالت I

Table 8 Comparison of obtained material characteristics for material type 2 and state I

درصد خطای میانگین	n	ρ_c	ρ_M	E_c (GPa)	E_M (GPa)	الگوریتم حل
-	5	3210	2707	427	70	مرجع
2.290	4.749	3201.001	2702.002	420.882	66.825	زنگنه
6.669	4.350	3170.450	2672.152	411.806	60.012	تبرید
3.361	4.797	3188.556	2700.621	421.851	62.553	ازدحام ذرات
2.150	4.738	3201.017	2704.000	423.521	66.982	کلونی مورچه‌ها
1.699	4.890	3199.808	2705.001	426.228	65.992	چرخه‌ی آب
0.312	4.999	3210.000	2705.996	426.852	70.009	برخورد قطرات

8- پیوست

پیوست الف

روابط ارجاع داده شده در متن مقاله به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11} &= \frac{\partial u_x}{\partial x} \rightarrow \dot{\varepsilon}_{11} = \frac{\partial u}{\partial x} \\ k_{11} &= \frac{\partial \phi_1}{\partial x} \rightarrow \dot{k}_{11} = \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \\ \varepsilon_{22} &= \frac{\partial u_y}{\partial y} \rightarrow \dot{\varepsilon}_{22} = \frac{\partial v}{\partial y} \\ k_{22} &= \frac{\partial \psi_1}{\partial y} \rightarrow \dot{k}_{22} = \frac{\partial \psi_2}{\partial y} \\ \varepsilon_{12} &= \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \\ \dot{\varepsilon}_{12} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ k_{12} &= \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \psi_1}{\partial x} \rightarrow \dot{k}_{12} = \frac{\partial \phi_2}{\partial y} + \frac{\partial \psi_2}{\partial x} \\ \gamma_{23} &= \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \rightarrow \dot{\gamma}_{23} = \psi_1 + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \gamma_{23}^1 &= z\psi_2 \\ \gamma_{13} &= \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \rightarrow \dot{\gamma}_{13} = \phi_1 + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \gamma_{13}^1 &= z\phi_2\end{aligned}$$

در تمام روابط، $u, v, w, \psi_1, \psi_2, \phi_1, \phi_2, \theta_1, \theta_2$ تابعی از x, y و t هستند.

پیوست ب

$$\begin{aligned}C_{11} &= C_{22} = \frac{E(z)}{1 - \nu^2} \\ C_{12} &= \frac{\nu E(z)}{1 - \nu^2}\end{aligned}$$

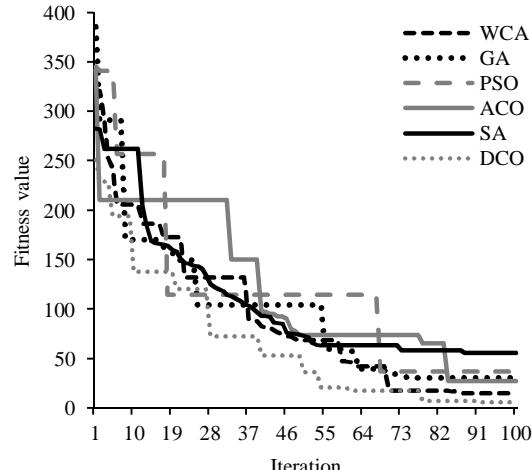


Fig. 11 Comparison of 6 optimization algorithms for present study, material type 2 and state I

شکل 11 مقایسه 6 الگوریتم بهینه‌سازی در حل مسئله حاضر ماده 2 حالت I

مدرج تابعی بر اساس فرکانس‌های طبیعی آنها و با استفاده از الگوریتم فربالبتکاری جدید، ارائه گردید. ابتدا فرکانس‌های طبیعی بر اساس روش تئوری تغییر شکل برشی مرتبه دوم محاسبه شده و با نتایج دیگر تحقیقات مقایسه گردید. برای حل معکوس، الگوریتم جدید برخورد قطرات ارائه شده و مورد استفاده قرار گرفت و نهایتاً نتایج به دست آمده از حل معکوس با نتایج آزمایشگاهی و محاسباتی مقایسه و درصد خطای قابل قبول، همگرایی مناسب الگوریتم و سرعت حل مسئله به خوبی تایید کننده عملکرد و کارایی روش ارائه شده برای تعیین خواص مکانیکی می‌باشد.

- materials with temperature-dependent material properties, *Materials and Design*, Vol. 28, No. 1, pp. 1861-1879, 2007.
- [11] I. Bruant, L. Gallimard, S. Nikoukar, Optimal piezoelectric actuator and sensor location for active vibration control, using genetic algorithm, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 28, No. 2, pp. 1861-1879, 2010.
- [12] M. Ashjari, M. R. Khoshrava, Mass optimization of functionally graded plate for mechanical loading in the presence of deflection and stress constraints, *Composite Structures*, Vol. 110, No. 3, pp. 118-132, 2014.
- [13] J. Suresh Kumar, B. Sidda Reddy, C. Eswara Reddy, K. Vijaya Kumar Reddy, Higher order theory for free vibration analysis of functionally graded material plates, *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, No. 10, pp. 105-111, 2011.
- [14] M. Alizadeh, A. Alibeigloo, Static and free vibration analyses of functionally graded sandwich plates using three dimensional theory of elasticity, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 195-204, 2014. (in Persian)
- [15] M. J. Ebrahimi, M. M. Najafizadeh, Free vibration of two-dimensional functionally graded circular cylindrical shells on elastic foundation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 27-38, 2013. (in Persian)
- [16] Sh. Hosseini-Hashemi, M. Fadaee, S. R. Atashipour, A new exact analytical approach for free vibration of Reissner-Mindlin functionally graded rectangular plates, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 53, No. 1, pp. 11-22, 2011.
- [17] M. Nejati, H. Mohsenimonfared, A. Asanjarani, Free vibration analysis of 2D functionally graded annular plate considering the effect of material composition via 2D differential quadrature method, *Mechanics of Advanced Composite Structures*, Vol. 2, No. 2, pp. 95-111, 2015.
- [18] M. Heidari-Rarani, S. Alimirzaei, K. Torabi, Analytical solution for free vibration of functionally graded carbon nanotubes (FG-CNT) reinforced double-layered nano-plates resting on elastic medium, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 3, pp. 55-66, 2015. (in Persian)
- [19] H. Thai, S. Kim, A simple higher-order shear deformation theory for bending and free vibration analysis of functionally graded plates, *Composite Structures*, Vol. 96, No. 1, pp. 165-173, 2013.
- [20] E. G. Talbi, *Metaheuristics: From Design to Implementation*, pp. 3.6-3.7, California: John Wiley and sons, 2009.
- [21] R. Krechetnikov, G.M. Homsy, Crown-forming instability phenomena in the drop splash problem, *Journal of colloid and interface science*, Vol. 331, No. 2, pp. 555-559, 2009.
- [22] M. Rein, Phenomena of liquid droplet impact, *Fluid Dynamics Research*, vol. 12, No. 2, pp. 61-93, 1993.
- [23] A. D. D. Craik, The origins of water wave theory, *Annual Review Of Fluid Mechanics*, Vol. 36, No. 1, pp. 1-28, 2013.
- [24] S. M. Khatoonabadi, M. Ashrafihaadeh, Simulation of droplet impact on a thin liquid film using the pseudopotential multiphase model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 8-16, 2016. (in Persian)
- [25] M. Talha, B. N. Singh, Static response and free vibration analysis of FGM plates using higher order shear deformation theory, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, No. 1, pp. 3991-4011, 2010.
- [26] H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, pp. 170-195, Cambridge: The MIT Press, 1992.
- [27] S. Kirkpatrick, M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680, 1983.
- [28] R. C. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, *sixth international symposium on micro machine and human science*, Nagoya, Japan, Oct 4-6, 1995.
- [29] N. Monmarché, F. Guinand, P. Siarry, *Artificial Ants*, Hardback, pp. 200-232, New York: Wiley, 2010.
- [30] M. Dorigo, *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, PhD Thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- [31] H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad, M. Hamdi, Water cycle algorithm-A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems, *Computers and Structures*, Vol. 110, No. 1, pp. 151-166, 2012.

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} = \frac{E(z)}{2(1+\nu)}$$

پیوست ج

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \end{bmatrix} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} dZ \\ \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \end{bmatrix} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} Z dZ \\ \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{22} \\ L_{12} \end{bmatrix} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} Z^2 dZ \\ \begin{bmatrix} Q_{13} \\ Q_{23} \end{bmatrix} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} dZ \\ \begin{bmatrix} R_{13} \\ R_{23} \end{bmatrix} &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} Z dZ \\ I_i &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \rho(Z)^i dZ \quad Z = 0, 1, \dots, 6 \end{aligned}$$

۹- مراجع

- S. Senthil Vela, R. C. Batra, Three-dimensional exact solution for the vibration of Functionally graded rectangular plates, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 272, No. 3, pp. 703-730, 2004.
- A. Hasani Baferani, A.R. Saidi, E. Jomehzadeh, An exact solution for free vibration of thin functionally graded rectangular plates, *Mechanical Engineering Science*, Vol. 225, No. 3, pp. 526-536, 2010.
- O. O. Oyekoya, D. U. Mba & A. M. El-Zafraeny, Buckling and vibration analysis of functionally graded, *Composite Structures*, Vol. 89, No. 1, pp. 134-142, 2009.
- M. R. Isvandzibaei, H. Jamaluddin, R. I. Raja Hamzah, Analysis of the vibration behavior of FGM cylindrical shells including internal pressure and ring support effects based on Love-Kirchhoff theory with various boundary conditions, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 7, pp. 2759-2768, 2014.
- J. E. Jam, S. Kamarian, A. Pourasghar, J. Seidi, Free Vibrations of three-parameter functionally graded plates resting on pasternak foundations, *Journal of Solid Mechanics*, Vol. 4, No. 1, pp. 59-74, 2012.
- R. Alibakhshi, A. Khavvaji, Free vibration analysis of thick functionally graded rectangular plates using variable refined plate theory, *Mechanical Research and Application*, Vol. 3, No. 1, pp. 65-73, 2011.
- S. Natarajan, S. Chakraborty, M. Thangavel, S. Bordas, T. Rabczuk, Size-dependent free flexural vibration behavior of functionally graded nanoplates, *Computational Materials Science*, Vol. 65, No. 2, pp. 74-80, 2012.
- B. Sidda Reddy, J. Suresh Kumar, C. Eswara Reddy, K. Vijaya Kumar Reddy, Free vibration behaviour of functionally graded plates using higher-order shear deformation theory, *Applied Science and Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 231-241, 2014.
- A. J. M. Ferreira, R. C. Batra, C. M. C. Roque, L. F. Qian, R. M. N. Jorge, Natural frequencies of functionally graded plates by a meshless method, *Composite Structures*, Vol. 75, No. 1, pp. 593-600, 2006.
- J. Goupee, S. Vel, Multi-objective optimization of functionally graded