

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH**

**PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH TẮM COMPOSITE NGẪU NHIÊN
DƯỚI TÁC DỤNG TẢI TRỌNG CƠ HỌC VÀ NHIỆT ĐỘ**

Ngành: Cơ kỹ thuật
Mã ngành: 9520101

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – 2025

Luận án được hoàn thành tại Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh

Hướng dẫn 1:

Hướng dẫn 2:

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

DANH MỤC BÀI BÁO

Tạp chí quốc tế

1. Stochastic vibration and buckling analysis of functionally graded microplates with a unified higher-order shear deformation theory, Thin-Walled Structures, vol.177, p.109473,8/ 2022, SCIE (Q1). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109473>
2. Vibration and buckling optimization of porous functionally graded microplates using BCMO-ANN algorithm, Thin-Walled Structures, Thin-Walled Structures, vol. 182, p. 110267, 01/2023, SCIE (Q1). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110267>
3. Stochastic collocation method for thermal buckling and vibration analysis of functionally graded sandwich microplates, Journal of Thermal Stresses, vol. 46, p. 909-934, 6/2023, SCIE (Q2). <https://doi.org/10.1080/01495739.2023.2217243>
4. An intelligent computational iBCMO-DNN algorithm for stochastic thermal buckling analysis of functionally graded porous microplates using modified strain gradient theory, Journal of Thermal Stresses, online, 7/2024, SCIE (Q2). <https://doi.org/10.1080/01495739.2024.2368054>
5. Meta-heuristic optimization algorithms for vibration and buckling analysis of laminated composite plates, Engineering Analysis with Boundary Elements, vol.169, Part A, 12/ 2024, 105974, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105974>. SCI (Q1).
6. Novel computational algorithms for vibration, buckling, and transient analysis of porous metal foam microplates, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 13, 203 (2025). <https://doi.org/10.1007/s42417-024-01748-8>

Tạp chí quốc gia

1. Static and vibration analysis of functionally graded microplate with porosities based on higher-order shear deformation and modified strain gradient theory, Vietnam Journal of Mechanics, 2023, ACI. <https://doi.org/10.15625/0866-7136/17552>

Hội nghị quốc tế

1. A general framework of higher-order shear deformation theory for free vibration analysis of functionally graded microplates, Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Civil Engineering and Architecture (ICSCEA-2021), Lecture Notes in Civil Engineering, vol.268, 713–727 2023, index scopus_Q4. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3303-5_64
2. An Efficient Size-Dependent Computational Approach for Functionally Graded Porous Sandwich Microplates Based on Modified Couple Stress Theory, International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD 2022), Lecture Notes in Networks and Systems, vol 567, 82-96, 2023, index scopus_Q4 https://doi.org/10.1007/978-3-031-19694-2_8

Hội nghị quốc gia

1. A BCMO-DNN algorithm for vibration optimization of functionally graded porous microplates, Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ XI (NACOME2 022), Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, Tập 1, 577-588, 2022.

CHAPTER 1 TỔNG QUAN

Do độ cứng và độ nhẹ vượt trội, vật liệu composite nhiều lớp được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như kỹ thuật cơ khí, hàng không vũ trụ và xây dựng. Tuy nhiên, cấu trúc nhiều lớp của chúng dẫn đến sự tập trung ứng suất và khả năng tách lớp tại điểm giao nhau giữa các lớp. Do đó, vật liệu phân loại chức năng (FGM) đã được phát triển để giải quyết vấn đề này, vật liệu thay đổi liên tục về các đặc tính vật liệu theo các hướng cụ thể. Những tiến bộ gần đây cũng cho phép sản xuất vật liệu xốp phân loại chức năng và vật liệu bột kim loại xốp, giúp tăng cường khả năng giảm âm và giảm trọng lượng kết cấu, khiến chúng trở nên rất có giá trị đối với các ứng dụng hiện đại. Tuy nhiên, sự phát triển của các vật liệu như vậy đi kèm với các phương pháp và mô hình tính toán hiệu quả để dự đoán chính xác phản ứng của chúng ở các tỉ lệ kết cấu khác nhau. Vì vậy, luận án này thực hiện đề tài “**Phát triển mô hình tấm composite ngẫu nhiên dưới tác dụng tải trọng cơ học và nhiệt độ**”.

CHƯƠNG 2 TỔNG QUAN CÁC LÝ THUYẾT CƠ BẢN

2.1 Vật liệu composite tiến tiến cho phân tích tấm

2.1.1 Vật liệu composite phân lớp

Do có nhiều ưu điểm về độ cứng và độ nhẹ, vật liệu composite nhiều lớp đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật, chẳng hạn như hàng không và xây dựng, kỹ thuật cơ khí, v.v. Cấu trúc LC được tạo thành từ hai hoặc nhiều lớp vật liệu composite thành phần được liên kết với nhau tại điểm giao nhau giữa các lớp.

2.1.2 Vật liệu phân lớp chức năng

Đặc trưng vật liệu như mô đun Young's E , mật độ khối lượng ρ , hệ số Poisson's ν của vật liệu FGP material có thể được xấp xỉ như sau:

$$P(x_3) = (P_c - P_m)V_c(x_3) + P_m - 0.5\beta(P_c + P_m) \quad (2.1)$$

2.1.3 Vật liệu sandwich phân lớp chức năng

Cấu trúc sandwich cung cấp nhiều lợi thế, chẳng hạn như nhẹ và có độ cứng uốn cong cao, khiến chúng trở nên lý tưởng để sử dụng trong máy bay, hàng không vũ trụ, thiết bị điện tử linh hoạt và các ứng dụng y sinh. Một cấu trúc sandwich điển hình bao gồm hai tấm mặt FGM với lõi đồng nhất ở giữa.

2.1.4 Vật liệu bột kim loại xốp

Đặc trưng vật liệu hiệu quả của vật liệu bột kim loại xốp: Phân bố độ xốp đồng đều; Phân bố độ xốp không đối xứng; Phân bố độ xốp đối xứng

2.2 Lý thuyết tấm

Trường chuyển vị của lý thuyết tấm được thể hiện bởi các hàm chưa biết ϕ_i^j bao gồm tọa độ bề mặt (x_1, x_2) và thời gian t .

$$u_i(x_1, x_2, x_3, t) = \sum_{j=0}^N (x_3)^j \phi_i^j(x_1, x_2, t) \quad (2.12)$$

Dạng rõ ràng của Phương trình (2.12) thay đổi tùy thuộc vào động học của biến dạng được xem xét bao gồm CPT, FSDT, HSDT, Quasi-3D và lý thuyết ba chiều.

2.3 Phân tích hiệu ứng kích thước tấm-micro

Lý thuyết MST được đề xuất bởi Lam chỉnh sửa từ lý thuyết độ dốc cổ điển của Mindlin và Eshel để đưa ra các số liệu bậc cao mới, trong đó tổng MLSP được giảm từ năm xuống ba.

$$\delta \Pi_{UB} = \int_A (\sigma \delta \varepsilon + \mathbf{p} \delta \xi + \tau \delta \eta + \mathbf{m} \delta \chi) dA \quad (2.20)$$

Trong đó $\varepsilon, \chi, \xi, \eta$ lần lượt là biến dạng, độ dốc góc quay đối xứng, độ dốc giãn nở, độ dốc deviation stretch; σ is ứng suất Cauchy; $\mathbf{m}, \mathbf{p}, \tau$ tương ứng là các ứng suất bậc cao tương ứng với độ dốc biến dạng χ, ξ, η .

2.4 Phương pháp Ritz

Phương pháp Ritz được Walter Ritz giới thiệu để phân tích dao động tự do của kết cấu.

$$\{u_1^0(x_1, x_2, t), \varphi_1(x_1, x_2, t)\} = \sum_{j=1}^{N_1} \sum_{i=1}^{N_2} \{u_{1ji}(t), x_{ji}(t)\} F_{j,1}(x_1) P_i(x_2) \quad (2.24a)$$

$$\{u_2^0(x_1, x_2, t), \varphi_2(x_1, x_2, t)\} = \sum_{j=1}^{N_1} \sum_{i=1}^{N_2} \{u_{2ji}(t), y_{ji}(t)\} F_j(x_1) P_{i,2}(x_2) \quad (2.24b)$$

$$u_3^0(x_1, x_2, t) = \sum_{j=1}^{N_1} \sum_{i=1}^{N_2} u_{3ji}(t) F_j(x_1) P_i(x_2) \quad (2.24c)$$

trong đó $u_{1ji}, u_{2ji}, u_{3ji}, x_{ji}, y_{ji}$ là các biến cần được xác định; các hàm dạng theo các hướng x_1 - và x_2 - là $F_j(x_1), P_i(x_2)$.

2.5 Phương pháp ngẫu nhiên

Phương pháp mô phỏng Monte Carlo (MCS) là phương pháp đơn giản và phổ biến nhất để giải quyết vấn đề phức tạp này. Một cách tiếp cận khác là sử dụng khai triển hỗn loạn đa thức (PCE) giúp tăng tốc quá trình tính toán trong khi vẫn duy trì độ chính xác. Phương pháp sắp xếp ngẫu nhiên (SC) được biết đến là một trong những phương pháp khai triển ngẫu nhiên tương tự như PCE.

2.6 Hệ thống mạng nơ-ron

Bên cạnh đó, sự kết hợp giữa thuật toán BCMO và ANN để xác định đáp ứng tối ưu cho các tấm vi cấu trúc FG với các tính chất vật liệu không chắc chắn vẫn chưa được phát triển, chủ đề thú vị này cần được nghiên cứu. Hơn nữa, một thuật toán tính toán thông minh mới iBCMO-DNN để giải quyết các vấn đề uốn cong nhiệt ngẫu nhiên của các tấm vi cấu trúc FGP bằng cách sử dụng phương pháp MST, HSDT thống nhất và phương pháp Ritz sẽ được đề xuất.

2.7 Thuật toán meta-heuristic

Ba thuật toán bao gồm tiến hóa khác biệt (DE), thuật toán tìm kiếm liên kết tôm và cá bồng (SGA) và tối ưu hóa chuyển động tổng hợp cân bằng (BCMO) được sử dụng để giải quyết vấn đề trên.

2.8 Kết luận

Tổng quan tài liệu cho thấy cần phải phát triển các mô hình tấm composite ngẫu nhiên chịu tải trọng cơ học và nhiệt. Với mục đích này, luận án sẽ tập trung vào các nội dung:

- Phát triển các hàm hình dạng lai mới cho phương pháp Ritz.
- Phát triển các mô hình ngẫu nhiên để nghiên cứu ứng xử của các tấm vi mô có đặc tính vật liệu không chắc chắn.
- Phát triển các thuật toán tính toán mới sử dụng trí tuệ nhân tạo để giải quyết các vấn đề ngẫu nhiên của các tấm vi cấu trúc.
- Áp dụng các phương pháp tối ưu hóa để tìm kiếm các hướng sợi tối ưu của các tấm composite nhiều lớp.

CHƯƠNG 3 PHƯƠNG PHÁP RITZ CHO PHÂN TÍCH HIỆU ỨNG KÍCH THƯỚC CỦA TẤM VI CẤU TRÚC COMPOSITE TIỀN TIẾN DƯỚI TÁC DỤNG TẢI NHIỆT-CƠ HỌC

3.1 Tổng quan

Chương này trình bày đa dạng cách tiếp cận mới về phương pháp tính toán, trong đó các hàm hình dạng mới cho lời giải Ritz sẽ được kết hợp với lý thuyết biến dạng cắt bậc cao thống nhất và lý thuyết độ dốc biến dạng sửa đổi (MST) cho phân tích tấm vi cấu trúc. Phương trình đặc trưng được suy ra từ nguyên lý Hamilton và được tính toán bằng lời giải Ritz.

3.2 Lý thuyết cơ bản

3.2.1 Vật liệu phân lớp chức năng tiến tiến

3.2.1.1 Vật liệu bột kim loại xốp

Xem xét một tấm vi cấu trúc hình chữ nhật với vật liệu bột kim loại xốp (PMF). Tấm có bề dày h và kích thước cạnh $a \times b$. Hình. 3.1 mô tả đặc tính vật liệu

của ba loại phân phối độ xấp thông qua bề dày của tấm vì cấu trúc PMF. Mỗi liên hệ giữa mật độ khối lượng ρ và modun Youngs E được thể hiện như sau:

- Phân phối độ xấp đồng đều

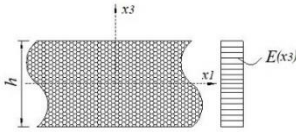
$$\rho(z) = \rho_{\max} \sqrt{(1 - \beta v)}; E(z) = E_{\max} (1 - \beta v) \quad (3.1)$$

- Phân phối độ xấp bất đối xứng

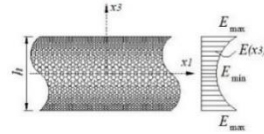
$$\rho(z) = \rho_{\max} \left[1 - \beta_m \cos\left(\frac{\pi z}{2h} + \frac{\pi}{4}\right) \right]; E(z) = E_{\max} \left[1 - \beta \cos\left(\frac{\pi z}{2h} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (3.2)$$

- Phân phối độ xấp đối xứng

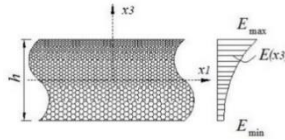
$$\rho(z) = \rho_{\max} \left(1 - \beta_m \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right); E(z) = E_{\max} \left(1 - \beta \cos\left(\frac{\pi z}{h}\right) \right) \quad (3.3)$$



(a) Phân phối độ xấp đồng đều



(b) Phân phối độ xấp đối xứng



(c) Phân phối độ xấp bất đối xứng

Hình 3.1: Ba loại đóng góp vật liệu bột kim loại xấp

trong đó $E_{\max}$ và $\rho_{\max}$ tương ứng là giá trị lớn nhất của modun Young và mật độ khối lượng; β và β_m biểu thị các thông số độ xấp và mật độ khối lượng, được xác định:

$$\beta = 1 - E_{\min} / E_{\max}, 0 < \beta < 1; \beta_m = 1 - \rho_{\min} / \rho_{\max}, 0 < \beta_m < 1 \quad (3.4)$$

trong đó $E_{\min}$ và $\rho_{\min}$ tương ứng là giá trị nhỏ nhất của modun Young và mật độ khối lượng.

với

$$\beta_m = 1 - \sqrt{1 - \beta} \quad (3.5)$$

Các đặc tính vật liệu trong trường hợp phân bố độ xấp đồng đều vẫn không đổi theo hướng độ dày và chỉ phụ thuộc vào hệ số độ xấp β . Hệ số ν được viết như sau:

$$\nu = 1 / \beta - \left(\left(2\sqrt{1 - \beta} \right) / \pi - 2 / \pi + 1 \right)^2 / \beta \quad (3.6)$$

3.2.1.2 Vật liệu sandwich phân lớp chức năng

Các công thức sau đây có thể được sử dụng để đánh giá các đặc tính vật liệu hiệu dụng của tấm vi cấu trúc FG sandwich:

$$P(x_3) = (P_c - P_m)V_c(x_3) + P_m \quad (3.7)$$

trong đó thể tích đóng góp của vật liệu ceramic $V_c(x_3)$ xuyên qua bề dày tấm được xác định bởi công thức (3.8).

với chỉ số power-law p , P_c và P_m tương ứng là các đặc trưng vật liệu của ceramic và kim loại như modun Young E , mật độ khối lượng ρ , và hệ số Poisson ν .

$$V_c(x_3) = \begin{cases} \left(\frac{z_4 - x_3}{z_4 - z_3} \right)^p, & z_3 \leq x_3 \leq z_4 & \text{FG} & \text{top} & \text{layer} \\ 1 & z_2 \leq x_3 \leq z_3 & \text{ceramic} & \text{core} & \text{layer} \\ \left(\frac{x_3 - z_1}{z_2 - z_1} \right)^p & z_1 \leq x_3 \leq z_2 & \text{FG} & \text{bottom} & \text{layer} \end{cases} \quad (3.8)$$

3.2.1.3 Vật liệu xếp phân lớp chức năng

The effective material properties of FGP microplates are given by:

$$P(x_3) = (P_c - P_m) \left(\frac{2x_3 + h}{2h} \right)^p + P_m - \frac{\beta}{2} (P_c + P_m) \quad (3.9)$$

where P_c and P_m are the Poisson's ratio ν , Young's moduli E of ceramic and metal materials, respectively; p is the power-law index; $0 \leq \beta \ll 1$ is the porosity volume fraction; $x_3 \in [-h/2, h/2]$.

3.2.1.4 Đặc trưng vật liệu và phân phối nhiệt độ

Ảnh hưởng của trường nhiệt độ, có ba loại phân phối nhiệt độ được xem xét trong tính toán như sau:

- Phân phối đồng đều (UTR): $T(z) = T_o + \Delta T$, nhiệt độ bên dưới bề mặt T_o .
- Đối với phân phối tuyến tính (LTR): $T(z) = (T_t - T_b)(z/h + 0.5) + T_b$, Nhiệt độ tương ứng ở trên và dưới cùng của bề mặt tấm được biểu thị bằng T_t and T_b .
- Phân phối nhiệt độ phi tuyến (NLTR):

$$T(z) = T(b) + \left((T_t - T_b) / \int_{-h/2}^{h/2} 1/k(z) dz \right) \int_{-h/2}^z 1/(k(\xi)) d\xi$$

Trong đó $k(z)$ là hệ số dẫn nhiệt.

3.2.2 Lý thuyết độ dốc biến dạng sửa đổi dựa vào lý thuyết biến dạng cắt bậc cao thống nhất

Cho mục đích đơn giản, bỏ qua ảnh hưởng của biến dạng ngang, i.e. $u_3(x_1, x_2, x_3) = u_3^0(x_1, x_2)$ trong đó $u_3^0(x_1, x_2)$ là chuyển vị ngang tại chính giữa bề mặt của tấm. Hơn nữa, ứng suất cắt ngang được thể hiện theo lực cắt ngang như sau:

$$\sigma_{13} = f_{,3}(x_3)Q_1(x_1, x_2); \quad \sigma_{23} = f_{,3}(x_3)Q_2(x_1, x_2) \quad (3.10)$$

Trong đó $f(x_3)$ là hàm cắt bậc cao có đạo hàm đầu tiên thỏa mãn điều kiện biên tự do ứng suất tại mặt trên và mặt dưới của tấm, tức là $f_{,3}(x_3 = \pm 0.5h) = 0$; $Q_1(x_1, x_2), Q_2(x_1, x_2)$ là lực cắt ngang. Ngoài ra, các biến dạng cắt ngang có quan hệ tuyến tính với chuyển vị màng $u_1(x_1, x_2, x_3), u_2(x_1, x_2, x_3)$ và chuyển vị ngang $u_3^0(x_1, x_2)$:

$$\gamma_{13} = u_{1,3} + u_{3,1}^0 = \frac{\sigma_{13}}{\mu} = \frac{f_{,3}Q_1}{\mu}; \quad \gamma_{23} = u_{2,3} + u_{3,2}^0 = \frac{\sigma_{23}}{\mu} = \frac{f_{,3}Q_2}{\mu} \quad (3.11)$$

trong đó $\mu(x_3) = E(x_3)/(2(1+\nu))$ là modun cắt. Hơn nữa, nội suy từ Phương trình (3.11) theo hướng x_3 – dẫn đến trường chuyển vị thống nhất cho tấm như sau:

$$u_1(x_1, x_2, x_3) = u_1^0(x_1, x_2) - x_3 u_{3,1}^0 + \Psi(x_3)Q_1(x_1, x_2) \quad (3.12a)$$

$$u_2(x_1, x_2, x_3) = u_2^0(x_1, x_2) - x_3 u_{3,2}^0 + \Psi(x_3)Q_2(x_1, x_2) \quad (3.12b)$$

$$u_3(x_1, x_2, x_3) = u_3^0(x_1, x_2) \quad (3.12c)$$

trong đó $\Psi(x_3) = \int_0^{x_3} \frac{f_{,3}}{\mu(x_3)} dx_3$. Hơn nữa, lực cắt ngang có thể được trình bày ở

dạng góc xoay (φ_1, φ_2) và độ dốc của chuyển vị ngang được thể hiện như sau:

$$Q_1(x_1, x_2) = H^s(\varphi_1 + u_{3,1}^0); \quad Q_2(x_1, x_2) = H^s(\varphi_2 + u_{3,2}^0) \quad (3.13)$$

trong đó $H^s = k^s \int_{-h/2}^{h/2} \mu(x_3) dx_3$ là độ cứng cắt ngang của tấm; $k^s = 5/6$ là hệ số hệ số cắt.

Thay thế Phương trình (3.13) bên trong Phương trình (3.12) dẫn đến HSDT chung như sau:

$$u_1(x_1, x_2, x_3) = u_1^0(x_1, x_2) + \Phi_1(x_3)u_{3,1}^0 + \Phi_2(x_3)\varphi_1(x_1, x_2) \quad (3.14a)$$

$$u_2(x_1, x_2, x_3) = u_2^0(x_1, x_2) + \Phi_1(x_3)u_{3,2}^0 + \Phi_2(x_3)\varphi_2(x_1, x_2) \quad (3.14b)$$

$$u_3(x_1, x_2, x_3) = u_3^0(x_1, x_2) \quad (3.14c)$$

trong đó $\Phi_1(x_3) = H^s \Psi(x_3) - x_3, \Phi_2(x_3) = H^s \Psi(x_3)$.

Tổng năng lượng của tấm vi cấu trúc được tính toán bằng cách sử dụng nguyên lý Hamilton như sau:

$$\int_{t_1}^{t_2} (\delta \Pi_{UB} + \delta \Pi_{VB} + \delta \Pi_{FB} - \delta \Pi_{KB}) dt = 0 \quad (3.15)$$

Trong đó $\delta \Pi_{VB}$, $\delta \Pi_{UB}$, $\delta \Pi_{FB}$ and $\delta \Pi_{KB}$ tương ứng là công được thực hiện bởi lực nén màng, năng lượng biến dạng, tải trọng ngoài và động năng. Năng lượng biến dạng của hệ thống $\delta \Pi_{UB}$ thu được từ lý thuyết độ dốc biến dạng sửa đổi (MST):

$$\delta \Pi_{UB} = \int_A (\sigma \delta \varepsilon + \mathbf{p} \delta \xi + \tau \delta \eta + \mathbf{m} \delta \chi) dA \quad (3.16)$$

trong đó $\varepsilon, \chi, \xi, \eta$ lần lượt là biến dạng, độ dốc góc quay đối xứng, độ dốc giãn nở và độ dốc lệch giãn nở; σ là ứng suất Cauchy; $\mathbf{m}, \mathbf{p}, \tau$ tương ứng là các ứng suất bậc cao kết nối với các độ dốc biến dạng χ, ξ, η . Các thành phần của biến dạng ε_{ij} và độ dốc biến dạng $\xi_i, \eta_{ijk}, \chi_{ij}$ được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2; \quad \xi_i = \varepsilon_{mm,i}; \quad \chi_{ij} = (u_{n,mj} e_{imn} + u_{n,mi} e_{jmn}) / 4 \\ \eta_{ijk} &= (\varepsilon_{jk,i} + \varepsilon_{ki,j} + \varepsilon_{ij,k}) / 3 - \left[(\xi_i + 2\varepsilon_{mi,m}) \delta_{jk} + (\xi_k + 2\varepsilon_{mk,m}) \delta_{ij} \right. \\ &\quad \left. + (\xi_j + 2\varepsilon_{mj,m}) \delta_{ki} \right] / 15 \end{aligned} \quad (3.17)$$

với δ_{ij} is Knonecker delta; e_{imn} is permutation symbol. Các phương trình cấu thành được sử dụng để xác định các thành phần ứng suất như sau:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}; \quad m_{ij} = 2\mu l_1^2 \chi_{ij}; \quad p_j = 2\mu l_2^2 \xi_j; \quad \tau_{ijk} = 2\mu l_3^2 \eta_{ijk} \quad (3.18a)$$

$$p_j = 2\mu l_2^2 \xi_j; \quad \tau_{ijk} = 2\mu l_3^2 \eta_{ijk} \quad (3.18b)$$

trong đó λ, μ là Lamé constants; l_1, l_2, l_3 là ba thông số tỉ lệ chiều dài vật liệu MLSP) thực tế cần được xác định bằng các công trình thực nghiệm.

3.2.3 Lời giải Ritz

Dựa trên cách tiếp cận Ritz, một chuỗi hàm xấp xỉ và các giá trị liên quan có thể được sử dụng để mô tả chuyển vị màng và chuyển vị ngang $(\varphi_1, \varphi_2, u_1^0, u_2^0, u_3^0)$ của tấm vi cấu trúc như sau:

$$\begin{aligned} u_1^0(x_1, x_2) &= \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} u_{1ij} R_i(x_1) P_j(x_2); \quad u_2^0(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} u_{2ij} R_i(x_1) P_{j,2}(x_2) \\ u_3^0(x_1, x_2) &= \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} u_{3ij} R_i(x_1) P_j(x_2); \quad \varphi_2(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} y_{ij} R_i(x_1) P_{j,2}(x_2) \\ \varphi_1(x_1, x_2) &= \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} x_{ij} R_i(x_1) P_j(x_2) \end{aligned} \quad (3.36)$$

Trong đó $u_{1ij}, u_{2ij}, u_{3ij}, x_{ij}, y_{ij}$ là các biến chưa biết cần xác định; Cần chú ý rằng chỉ cần hai hàm hình dạng theo hướng x_1 - and x_2 -, $R_i(x_1)$ và $P_j(x_2)$ là đủ để kể hết năm biến chưa biết của tấm vi cấu trúc.

Trong nghiên cứu này, đa thức Hermite, đa thức Laguerre và đa thức trực giao được xây dựng từ qui trình Gram Schmidt được xác định bởi công thức đệ quy, được sử dụng để phát triển các hàm hình dạng mới của phương pháp Ritz.

Hermite polynomial:

Đa thức Hermite được đặc trưng bởi công thức đệ quy sau:

$$\begin{cases} He_0(x) = 1, & He_1(x) = 2x, \\ He_n(x) = 2xHe_{n-1}(x) - 2(n-1)He_{n-2}(x) \end{cases} \quad (3.37)$$

Đa thức Hermite thỏa mãn sự chuẩn hóa như sau:

$$\int_{-\infty}^{\infty} (He(x))^2 e^{-x^2} dx = 2^n \sqrt{\pi} n! \quad (3.38)$$

Laguerre polynomial:

Hàm Laguerre tổng quát được định nghĩa:

$$L(n, a, x) = \binom{n+a}{a} {}_1F_1(-n; a+1; x) \quad (3.39)$$

Hàm trả về các đa thức Laguerre tổng quát trực giao cho các giá trị số nguyên không âm của n :

$$\langle f_1, f_2 \rangle = \int_0^{\infty} e^{-x} x^a f_1(x) f_2(x) dx \quad (3.40)$$

Hơn nữa, đa thức Laguerre tổng quát đáp ứng chuẩn hóa:

$$\langle L(n, a, x), L(m, a, x) \rangle = \begin{cases} 0 & \text{if } n \neq m \\ \frac{\Gamma(a+n+1)}{n!} & \text{if } n = m \end{cases} \quad (3.41)$$

Gram-Schmidt-based orthogonal polynomials:

Tiếp theo, các hàm dạng là các đa thức trực giao (OP), được xây dựng bằng phương pháp Gram-Schmidt (GS). Các hàm này thể hiện tốc độ hội tụ nhanh, mặc dù chúng gặp khó khăn trong việc xác định hàm ban đầu. Sử dụng phương pháp GS được định nghĩa như sau:

$$\phi_1(x) = (x - A_1)\phi_0(x), \quad \phi_k(x) = (x - A_k)\phi_{k-1}(x) - D_k\phi_{k-2}(x) \quad (3.42a)$$

$$A_k = \frac{\int_c^d xw(x)\phi_{k-1}^2(x)dx}{\int_c^d w(x)\phi_{k-1}^2(x)dx}; \quad D_k = \frac{\int_c^d xw(x)\phi_{k-1}(x)\phi_{k-2}(x)dx}{\int_c^d w(x)\phi_{k-2}^2(x)dx} \quad (3.42b)$$

Trong đó $w(x)$ là hàm trọng số. . Tính trực giao được thỏa mãn bởi các đa thức $\phi_k(x)$ như sau:

$$\int_c^d w(x) \phi_k(x) \phi_l(x) dx = \begin{cases} 0 & \text{if } k \neq l \\ a_{kl} & \text{if } k = l \end{cases} \quad (3.43)$$

Với $w(x) = 1$; $\phi_0(x) = 2x + 1$ và $[c, d] \in [-1, 1]$.

Các ví dụ số sẽ bao gồm SSSS, CSCS, SCSC và CCCC trong Bảng 3.1 như sau:

Bảng 3.1: Các hàm xấp xỉ với điều kiện biên khác nhau

Điều kiện biên		Hàm xấp xỉ	
		$R_j(x_1)$	$P_j(x_2)$
SSSS	Ritz-Hermite	$x_1(a - x_1) He_j$	$x_2(b - x_2) He_j$
	Ritz-Laguerre	$x_1(a - x_1) L_j$	$x_2(b - x_2) L_j$
	Ritz-OP	$x_1(a - x_1) \phi_j$	$x_2(b - x_2) \phi_j$
SCSC	Ritz-Hermite	$x_1(a - x_1)^2 He_j$	$x_2(b - x_2)^2 He_j$
	Ritz-Laguerre	$x_1(a - x_1)^2 L_j$	$x_2(b - x_2)^2 L_j$
	Ritz-OP	$x_1(a - x_1)^2 \phi_j$	$x_2(b - x_2)^2 \phi_j$
CSCS	Ritz-Hermite	$x_1^2(a - x_1) He_j$	$x_2^2(b - x_2) He_j$
	Ritz-Laguerre	$x_1^2(a - x_1) L_j$	$x_2^2(b - x_2) L_j$
	Ritz-OP	$x_1^2(a - x_1) \phi_j$	$x_2^2(b - x_2) \phi_j$
CCCC	Ritz-Hermite	$x_1^2(a - x_1)^2 He_j$	$x_2^2(b - x_2)^2 He_j$
	Ritz-Laguerre	$x_1^2(a - x_1)^2 L_j$	$x_2^2(b - x_2)^2 L_j$
	Ritz-OP	$x_1^2(a - x_1)^2 \phi_j$	$x_2^2(b - x_2)^2 \phi_j$

Phương trình chuyển động của tấm vi cấu trúc:

$$(\mathbf{K} - N^0 \mathbf{K}^g) \mathbf{d} + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{d}} = \mathbf{F} \quad (3.44)$$

3.3 Kết quả số

3.3.1 Nghiên cứu tốc độ hội tụ

Tấm vi cấu trúc PMF được xây dựng từ vật liệu bột kim loại xốp có đặc trưng vật liệu như sau: $E_{\max} = 200$ GPa, $\rho_{\max} = 7850$ kg/m³, $\nu_{\max} = 0.33$. Để đơn giản, công thức chuẩn hóa sau đây được sử dụng: $\bar{\omega} = 100 \omega h \sqrt{\rho_{\max} / E_{\max}}$. Để đánh giá sự hội tụ và hiệu quả của phương pháp tính toán, ví dụ này sẽ so sánh tốc độ hội tụ và sự ổn định của các giải pháp đề xuất: Hermite-Ritz, Laguerre-Ritz, Exponential-Ritz, OP-Ritz với các hàm dạng khác của phương pháp Ritz. Các hàm xấp xỉ sau đây sẽ được sử dụng trong Phương trình (3.36) để tính toán:

Static Beam Functions (SBF):

$$F_j(x_2) = A_j + B_j x_2 + C_j x_2^2 + D_j x_2^3 + \sin(jx_2/b) \quad (3.47)$$

with $A_j = 0; B_j = -j\pi/b; C_j = j\pi((-1)^j + 2)/b^2; D_j = -j\pi((-1)^j + 1)/b^3$.

Non-Orthogonal Polynomials (NOP):

$$F_j(x_2) = (b - x_2)^2 x_2^{j+1} \quad (3.48)$$

Product of Trigonometric Functions (PTF):

$$F_j(x_2) = \sin(\pi x_2/b) \sin(j\pi x_2/b) \quad (3.49)$$

Characteristic Functions (CF):

$$F_j(x_2) = \sin \alpha_j x_2 - \sinh \alpha_j x_2 - \phi_j (\cos \alpha_j x_2 - \cosh \alpha_j x_2) \quad (3.50)$$

với $\phi_j = (\sin \alpha_j b - \sinh \alpha_j b) / (\cos \alpha_j b - \cosh \alpha_j b); \alpha_j = (j + 0.5)\pi/b$. Cần lưu ý rằng hàm $T_j(x_1)$ được định nghĩa một cách tương tự bằng cách thay thế biến x_2 cho x_1 , chiều dài b cho bề rộng a trong các phương trình ở trên. Để điều tra tốc độ hội tụ của các hàm xấp xỉ, khoảng cách tham chiếu được xác định như sau:

$$d_f = \omega_{i+1} - \omega_i \quad (3.51)$$

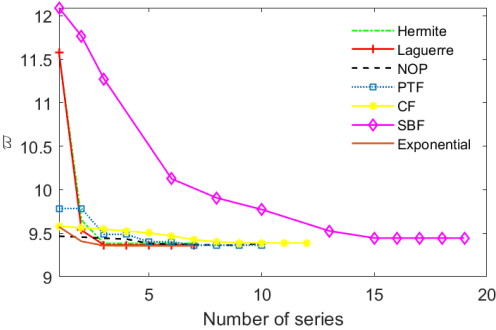
trong đó ω_i và ω_{i+1} tương tự là kết quả của tần số cơ bản của tấm bọt kim loại xấp tại n_i and n_{i+1} .

Để đánh giá tốc độ hội tụ của giải pháp Ritz, Bảng 3.2 và các Hình. 3.6 trình bày tốc độ hội tụ của tần số cơ bản của tấm vi cấu trúc PMF với biên ngàm hoàn toàn tại $a/h = 10$, $\beta = 0.3$ and $h/l = \infty$.

Bảng 3.2: So sánh tốc độ hội tụ bằng số chuỗi ($n = n_1 = n_2$) của tấm vi cấu trúc PMF với biên ngàm hoàn toàn tại ($a/h = 10$, $\beta = 0.3$, $h/l = \infty$)

Solution	Number of series $n = n_1 = n_2$							
	2	3	5	6	8	9	10	15
SBF	11.765	11.27	10.681	10.125	9.905	9.858	9.772	9.4444
NOP	9.455	9.44	9.382	9.373	9.362	9.363	9.362	9.364
PTF	9.784	9.486	9.401	9.400	9.362	9.364	9.362	9.364
CF	9.560	9.545	9.503	9.467	9.402	9.388	9.388	9.388
Hermite	9.649	9.382	9.382	9.382	9.381	9.383	9.384	9.381
Laguerre	9.5341	9.364	9.364	9.364	9.364	9.364	9.364	9.364
OP_GS	9.5571	9.381	9.373	9.373	9.373	9.373	9.373	9.373
Exponential	9.5730	9.406	9.357	9.355	9.355	9.355	9.355	9.355
IGA [174]	9.5202							

Hơn nữa, biểu đồ đường so sánh tốc độ hội tụ của bảy loại hàm dạng trong Hình 3.6. Dễ dàng nhận thấy rằng tốc độ hội tụ của các hàm hình dạng được sử dụng để tính toán tần số cơ bản của tấm vi cấu trúc là khác nhau giữa các hàm hình dạng.



Hình 3.6: So sánh tốc độ hội tụ của tấm vi cấu trúc PMF bột kim loại xốp với điều kiện biên ngàm hoàn toàn cho tần số cơ bản ($a / h = 10$, $\beta = 0.3$, $h / l = \infty$) Đa thức trực giao cho kết quả chính xác khi tính toán tần số tự nhiên.

3.3.2 Phân tích tấm vi cấu trúc PMF

Trong ví dụ này, dao động tự do $\bar{\omega} = \omega h \sqrt{\rho_{\max} / E_{\max}}$ and ổn định tới hạn (uniaxial compression and biaxial compression) $\bar{N}_{cr} = N_{cr} a^2 / (h^3 E_{\max})$ của tấm vuông vi cấu trúc PMF với biên tựa đơn bốn cạnh (SSSS) được phân tích. Tấm vi cấu trúc PMF được xây dựng từ vật liệu bột kim loại xốp có đặc trưng vật liệu như sau: $E_{\max} = 200 \text{ GPa}$, $\rho_{\max} = 7850 \text{ kg/m}^3$, $\nu_{\max} = 0.33$.

Bảng 3.3: Tần số cơ bản chuẩn hóa của tấm vuông vi cấu trúc PMF cho tựa đơn bốn cạnh với $a / h = 10$

Loại phân phối vật liệu	β	Lý thuyết	h / l			
			10	5	2	1
Uniform	0.1	Ritz-Hermite	0.0606	0.0715	0.1234	0.2264
		Ritz-Laguerre	0.0606	0.0715	0.1233	0.2262
		IGA [20]	0.0601	0.0706	0.1203	0.2196
	0.2	Ritz-Hermite	0.0592	0.0702	0.1218	0.2240
		Ritz-Laguerre	0.0592	0.0702	0.1218	0.2239
		IGA [20]	0.0578	0.0688	0.1201	0.2212
	0.3	Ritz-Hermite	0.0578	0.0688	0.1200	0.2211
		IGA [20]	0.0590	0.0692	0.1179	0.2153

Bảng 3.4: Ổn định tới hạn chuẩn hóa với nền đơn trục của tấm vi cấu trúc PMF cho tựa đơn bốn cạnh với $a/h = 10$

Type distribution	β	Theory	h/l			
			10	5	2	1
Uniform	0.1	Ritz-Hermite	3.6690	5.0792	14.9412	50.0314
		Ritz-Laguerre	3.6665	5.0754	14.9287	49.9844
		IGA [20]	3.7311	5.1334	14.9043	49.7140
	0.2	Ritz-Hermite	3.3772	4.7119	14.0463	47.2574
		Ritz-Laguerre	3.3748	4.7084	14.0345	47.2129
		IGA [20]	3.4694	4.7734	13.8590	46.2271

3.4 Kết luận

Chương này giới thiệu các hàm dạng mới cho lời giải Ritz để phân tích ứng xử của tấm vi cấu trúc. Lý thuyết biến dạng cắt bậc cao thống nhất nhất (HSDT) là chính xác và đáng tin cậy. Để xét ảnh hưởng của hiệu ứng kích thước, lý thuyết độ dốc biến dạng sửa đổi được ứng dụng. Phương trình chuyển động của tấm vi cấu trúc được suy ra từ nguyên lý Hamilton. Các nghiên cứu hội tụ và đánh giá được thực hiện để xác minh tính chính xác và độ tin cậy của các giải pháp được đề xuất.

CHƯƠNG 4 THUẬT TOÁN TÍNH TOÁN THÔNG MINH CHO PHÂN TÍCH NGẪU NHIÊN CỦA TẤM VI CẤU TRÚC PHÂN LỚP CHỨC NĂNG VỚI SỰ KHÔNG CHẮC CHẴN CỦA ĐẶC TRƯNG VẬT LIỆU

4.1 Tổng quan

Mục tiêu chính của chương này là phát triển mô hình ngẫu nhiên cho phân tích ứng xử của tấm vi cấu trúc sử dụng đa dạng các phương pháp hiệu quả như Monte Carlo simulation with 10,000 mẫu, polynomial chaos expansion, stochastic collocation, thuật toán BCMO-ANN and iBCMO-DNN.

4.2 Polynomial chaos expansion

Trong nghiên cứu này, $\hat{u}$ là tần số cơ bản hoặc tải trọng ổn định tới hạn của tấm vi cấu trúc FG được biểu diễn bằng một chuỗi trục giao như sau:

$$\hat{u} \approx \hat{u}_{PCE}(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^{P-1} c_i He_i(\mathbf{q}) + r \quad (4.1)$$

trong đó $\hat{u}_{PCE}$ là đáp ứng thu được từ PCE; $\mathbf{q}$ là vector các biến độc lập ngẫu nhiên trong không gian PCE kết nối với các thông số ngẫu nhiên vật lý $\mathbf{x}$; He_i là các hàm cơ sở trục giao đa biến; c_i là các hệ số cần được xác định sao cho số dư r là nhỏ nhất; P is the permutation of the qualified order of the polynomial n .

4.3 Stochastic collocation

Đối với bài toán 1-D (tức là một đầu vào ngẫu nhiên X) và n_i điểm nội suy, nó xấp xỉ phản ứng ngẫu nhiên u bằng cách hình thành các hàm Lagrange và ước tính phản ứng của mô hình tại các điểm nội suy $u(q_i)$ như sau:

$$u(X) \approx \hat{u}(X) = \sum_{i=1}^{n_i} u(q_i) L_i(q) \quad (4.9)$$

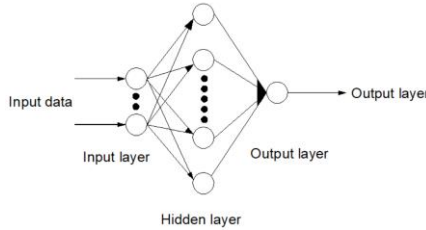
trong đó q là một biến tiêu chuẩn ánh xạ đến biến vật lý X và để tối đa hóa hiệu suất của cách tiếp cận này q_i được định nghĩa là các điểm vuông góc Gauss thích hợp tương ứng với sự phân bố của q . Nội suy 1-D Lagrange $L_i(q)$ được định nghĩa:

$$L_i(q) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_i} (q - q_j) / (q_i - q_j) \quad (4.10)$$

4.4 Thuật toán tính toán ngẫu nhiên thông minh dựa vào phương pháp tối ưu hóa và máy học

4.4.2 Hệ thống mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) và thuật toán BMCO: BCMO-ANN

Hệ thống mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) được hiển thị trong Hình 4.2 chứa ba loại lớp, đó là lớp đầu vào, lớp ẩn, lớp đầu ra, trong đó mỗi lớp bao gồm các nơ-ron được kết nối với nhau ở lớp trước.



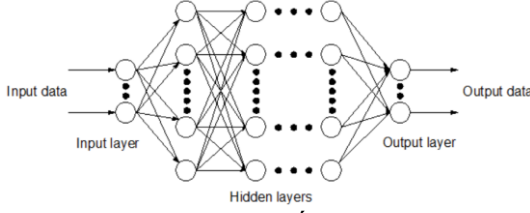
Hình 4.2: Cấu trúc của mạng nơ-ron đơn giản

Dữ liệu đầu ra của hàm kích hoạt cho tổng giá trị được biểu thị như sau:

$$y_i^n = \varphi(x_i^n) = \varphi\left(\sum_{j=1}^{lm_{n-1}} w_{ij}^{n-1} \times y_j^{n-1} + b_i^n\right) \quad (4.24)$$

trong đó y_i^n và x_i^n tương ứng là cặp dữ liệu đầu ra và đầu vào của hàm kích hoạt của nút i ; w_{ij}^{n-1} là trọng lượng giữa nút đầu ra i và nút đầu vào j ; b_i^n là độ lệch của nút j ; φ là hàm kích hoạt.

4.4.3 Hệ thống mạng nơ-ron học sâu (DNN) và thuật toán BMCO cải tiến: iBCMO-DNN



Hình 4.3: hệ thống nơ-ron học sâu

Mỗi nút trong các lớp tiếp theo sẽ nhận được tổng giá trị đầu ra của các nút trước đó nhân với trọng số tương ứng của chúng và dữ liệu đầu ra của hàm kích hoạt cho tổng giá trị được cung cấp như sau:

$$y_i^n = \varphi(x_i^n) = \varphi\left(\sum_{j=1}^{L_{n-1}} w_{ij}^{n-1} \times y_j^{n-1} + b_i^n\right) \quad (4.26)$$

4.5 Kết quả số

4.5.1 Phân tích ngẫu nhiên dao động tự do của tấm vi cấu trúc FG sử dụng polynomial chaos expansion

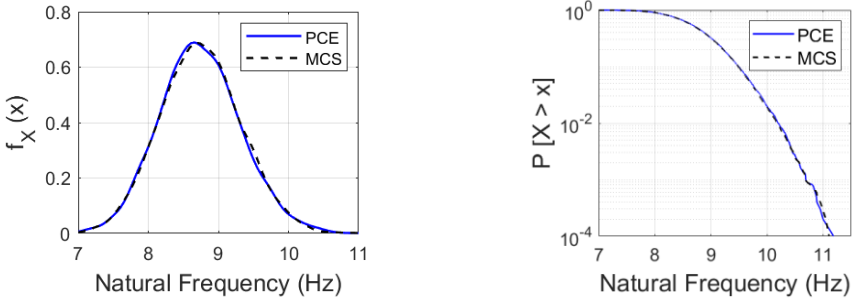
Để điều tra các đáp ứng ngẫu nhiên của tấm vi cấu trúc FG, các đặc trưng vật liệu (E_c , E_m , and ρ_c , ρ_m) được sử dụng làm biến ngẫu nhiên với phân phối lognormal, hệ số độ tin cậy (COV) của các biến ngẫu nhiên là 10%. The MCS với 10,000 mẫu được xem xét như là giải pháp chính xác để so sánh với giải pháp đề xuất. For convenience, the following non-dimensional parameters are used in the numerical examples:

$$\bar{\omega} = (\omega a^2 / h) \sqrt{\rho_c / E_c} \quad (4.28)$$

Bảng 4.2: So sánh giữa MCS (10.000 samples) và PCE (256 samples) với giá trị trung bình, độ lệch chuẩn (SD), Kurtosis and Skewness cho tần số của tấm vi cấu trúc FG ($a/h = 10$, MAT 1)

BCs	p	Theory	Mean	SD	Kurtosis	Skewness	COV (%)	Time (s)	Present
$h/l = 1$									
SS	1	PCE	11.010	0.5087	2.4628	-0.0532	4.6	17.02	11.010
SS		MCS	11.010	0.5087	2.4633	-0.0531	4.6	814.1	
	5	PCE	8.7431	0.8313	2.6301	0.1966	9.5	18.1	8.720
		MCS	8.7456	0.8317	2.6308	0.1962	9.5	815.3	
	10	PCE	8.0719	0.8990	2.6953	0.2624	11.1	18.4	8.044
		MCS	8.0747	0.8986	2.6949	0.2629	11.1	817.0	
...									

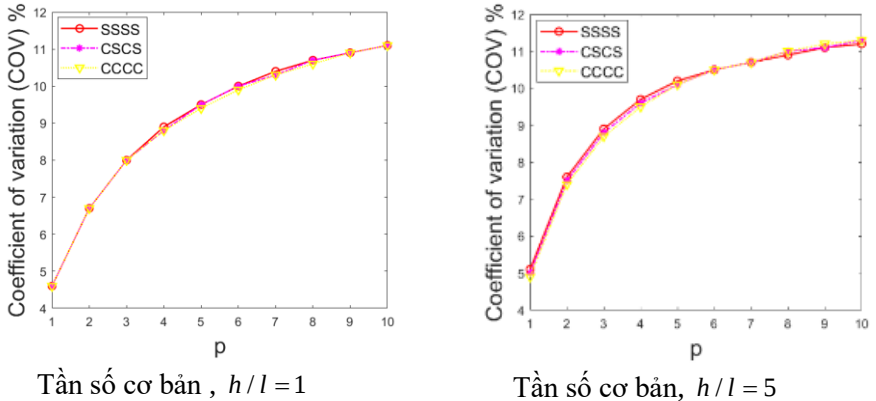
Có thể quan sát thấy rằng tất cả các trạng thái thống kê thu được từ MCS và PCE đều cho thấy sự đồng nhất tốt trong mọi trường hợp. Thời gian tính toán cần thiết của phương pháp PCE là khoảng 1/47 so với phương pháp MCS trực tiếp.



Hình 4.6a: PDF và PoE của phương pháp MCS và PCE cho tần số cơ bản của tấm vi cấu trúc FG với SSSS BC ($p = 5$, $h/l = 1$, $a/h = 10$)

Hình. 4.6a so sánh hàm mật độ xác suất (PDF) và xác suất tới hạn (PoE) của MCS và PCE cho phân tích dao động tự do của tấm vi cấu trúc với SSSS BC. Có thể quan sát thấy một lần nữa rằng kết quả của MCS phù hợp với PCE.

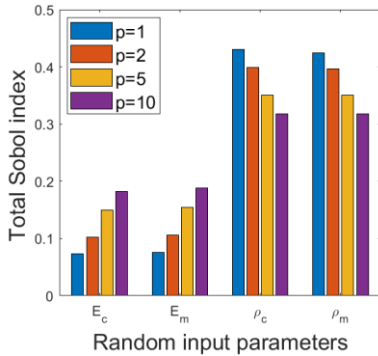
Hệ số độ tin cậy của các điều kiện biên khác nhau là giống nhau và có cùng xu hướng chung được hiển thị trong Hình 4.8



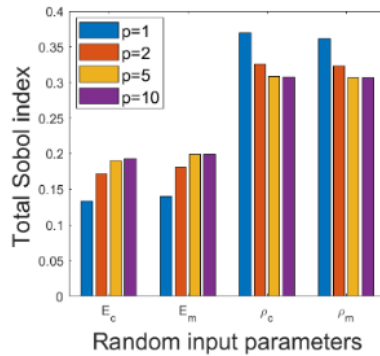
Tần số cơ bản, $h/l = 1$

Tần số cơ bản, $h/l = 5$

Hình 4.8: Hệ số độ tin cậy (COV) với trục hoành là chỉ số power-law p tấm vi cấu trúc FG ($a/h = 10$) với đa dạng BCs



Tần số cơ bản, $h/l = 1$



Tần số cơ bản, $h/l = 5$

Hình 4.11: Tổng chỉ số Sobol của các biến đầu vào ngẫu nhiên đối với tần số cơ bản của tấm vi cấu trúc FG ($a/h = 10$, $h/l = 1$), cho điều kiện biên CCCC

4.5.2 Phân tích ổn định tới hạn nhiệt độ ngẫu nhiên của tấm vi cấu trúc FG sandwich sử dụng phương pháp stochastic collocation

Đối với mô hình SC có điểm vuông góc Gauss, chỉ cần 256 mẫu. Bảng 4.3 trình bày kết quả của tấm vi cấu trúc FG sandwich với $h/l = 1$ và $h/l = 5$ cho hai loại điều kiện biên, a/h và p . Các trạng thái ổn định được tạo ra từ SC and MCS là giống nhau. Chi phí tính toán của phương SC chỉ bằng 1/10 so với phương MCS.

Bảng 4.1: Độ lệch chuẩn (SD), giá trị trung bình, Skewness, Kurtosis cho ổn định nhiệt độ nén hai chiều của tấm vi cấu trúc FG sandwich microplates (MAT 3, $a/h = 10$) dưới linear distribution of SC (256 mẫu) and MCS (10.000 mẫu), $T_b = 25^\circ\text{C}$

BCs	p	Theory	Mean	SD	Kurtosis	Skewness	COV (%)	Time (s)	Present
1-1-1									
$h/l = 1$									
SS	0.5	SC	10.023	0.8972	3.7410	0.5955	8.9	30	9.9421
SS		MCS	10.017	0.8962	3.7306	0.5927	8.9	325	
		SC	9.8862	0.8221	3.4865	0.5257	8.3	33	9.8221
		MCS	9.9028	0.8225	3.4923	0.5270	8.3	330	
CC	0.5	SC	37.498	3.3337	3.4160	0.5005	9.0	40	37.1999
CC		MCS	37.498	3.3363	3.4145	0.4994	9.0	342	
		SC	37.460	3.1073	3.4426	0.4919	8.3	41	37.2542
		MCS	37.452	3.1061	3.4461	0.4912	8.3	340	

4.5.3 Phân tích dao động tự do ngẫu nhiên của tấm vi cấu trúc FGP sử dụng thuật toán BCMO-ANN

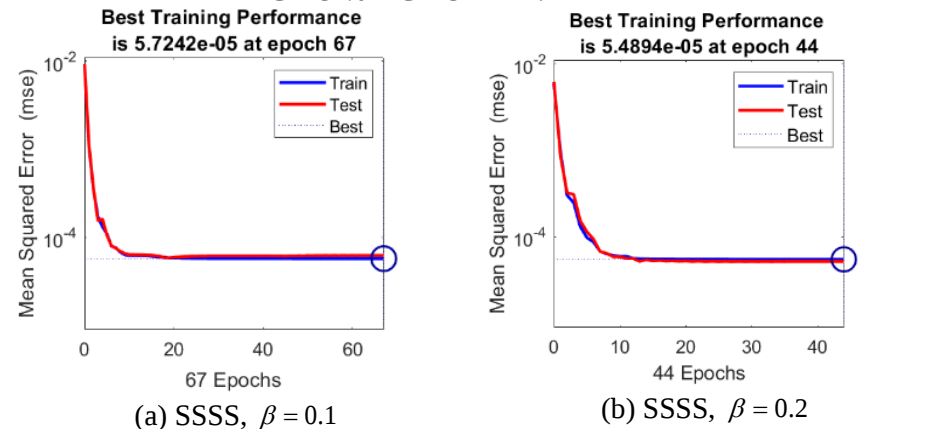
Để điều tra ứng xử ngẫu nhiên của các tấm vi cấu trúc FG, bốn biến ngẫu nhiên của đặc trưng vật liệu ($E_{m,i}$, $E_{c,i}$, $p_{m,i}$, $p_{c,i}$) được sử dụng với quy mô dân số

$NP = 500$. Cần lưu ý rằng các giá trị trọng số và độ lệch được cập nhật tự động theo tối ưu hóa Levenberg - Marquardt, số lượng nút trong mỗi lớp ẩn là 21.

Bảng 4.4: giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của tần số đã chuẩn hóa cho tám vi cấu trúc với $a/h = 10$ và điều kiện biên SSSS

β	p	h/l	Theory	Mean	SD	Time(s)	Present
0.1	1	10	Ritz-BCMO	4.4049	0.0496	615	4.4073
			BCMO-ANN	4.4090	0.0491	10	
		5	Ritz-BCMO	4.7449	0.0517	620	4.7485
			BCMO-ANN	4.7451	0.0513	9	
		1	Ritz-BCMO	11.0692	0.1051	617	11.0673
			BCMO-ANN	11.0745	0.1059	11	
	10	10	Ritz-BCMO	3.3994	0.0953	625	3.4012
			BCMO-ANN	3.4040	0.0961	10	
		5	Ritz-BCMO	3.5922	0.0997	623	3.6001
			BCMO-ANN	3.6037	0.0993	12	
		1	Ritz-BCMO	7.5662	0.1991	627	7.5531
			BCMO-ANN	7.5376	0.1983	10	
....							

Bộ dữ liệu, bao gồm các cặp đầu vào-đầu ra và các mẫu đào tạo được tạo ngẫu nhiên thông qua các lần lặp lại trong quá trình đào tạo ANN. Ngoài ra, trong quá trình dự đoán, các mẫu đào tạo trong tập dữ liệu được chia thành hai nhóm, trong đó 80% cặp dữ liệu được sử dụng cho tập huấn luyện và 20% cho tập thử nghiệm. Bảng 4.4 trình bày giá trị trung bình và độ lệch chuẩn (SD) của các tần số cơ bản chuẩn hóa của các tấm vi cấu trúc Al/Al₂O₃ FG với các điều kiện biên khác nhau cho cả mô hình Ritz-BCMO và BCMO-ANN.



Hình 4.19: Loss function của tần số cơ bản chuẩn hóa cho các tấm vi cấu trúc FGP với các điều kiện biên khác nhau, $p = 10$, $a/h = 10$ and $h/l = 5$

4.5.4 Phân tích ổn định nhiệt độ tới hạn ngẫu nhiên của tấm vi cấu trúc FGP sử dụng thuật toán iBCMO-DNN

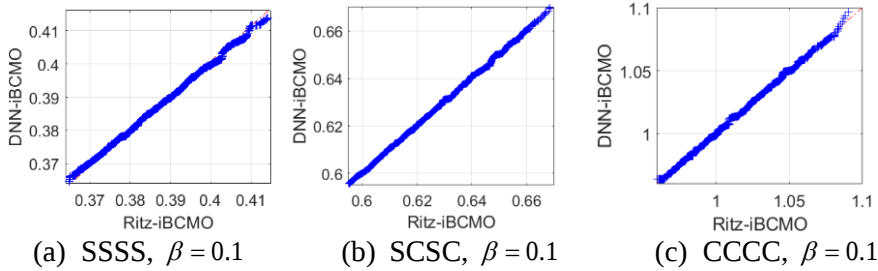
Để tính toán ổn định nhiệt độ tới hạn ngẫu nhiên của các tấm vi cấu trúc FGP, cần lưu ý rằng năm biến ngẫu nhiên về đặc trưng vật liệu $(E_{m,i}, E_{c,i}, \alpha_{t,i}, \alpha_{m,i}, \rho)$ được thiết kế với cùng quy mô dân số $NP = 2000$. Ngoài ra, việc đào tạo dữ liệu được thực hiện tiếp theo với dữ liệu được tạo ra từ phân tích trước đó của giải pháp Ritz-iBCMO.

Đối với các tấm vi cấu trúc Al/Al₂O₃ FGP có ba điều kiện biên khác nhau, độ lệch trung bình và độ lệch chuẩn của ổn định nhiệt độ tới hạn chuẩn hóa từ các mô hình Ritz-iBCMO và iBCMO-DNN được thể hiện trong Bảng 4.9. Giá trị trung bình của ổn định nhiệt độ tới hạn chuẩn hóa được tính toán cho trường hợp tỉ số cạnh trên chiều dày $a/h = 20$, hệ số độ xốp $\beta = 0.1$ và 0.3 , chỉ số power-law $p = 0.5$ và 2 , thông số vật liệu $h/l = 1$ và 10 . Rõ ràng, các trạng thái thống kê của ổn định nhiệt độ tới hạn bắt nguồn từ Ritz-iBCMO và iBCMO-DNN cho thấy sự giống nhau cho tất cả các trường hợp.

Bảng 4.9: Giá trị trung bình và độ lệch chuẩn (SD) của ổn định nhiệt độ chuẩn hóa cho tấm vi cấu trúc FGP với trường hợp nén hai chiều, $a/h = 20$, SSSS trong môi trường nhiệt độ với trạng phân phối đồng đều

β	P	h/l	Theory	Mean	SD	Time(s)	Present			
0.1	0.5	10	Ritz-iBCMO	0.3291	0.0089	2123	0.3284			
			iBCMO-DNN	0.3307	0.0091	845				
		1	Ritz-iBCMO	5.1633	0.1343	2125	5.1596			
			iBCMO-DNN	5.1688	0.1347	844				
	2	10	Ritz-iBCMO	0.2239	0.0066	2124	0.2236			
			iBCMO-DNN	0.2259	0.0071	845				
		1	Ritz-iBCMO	3.8358	0.1084	2123	3.8278			
			iBCMO-DNN	3.8315	0.1082	846				
			...							

Ngoài ra, hiệu suất của thuật toán iBCMO-DNN hiện tại trong việc dự đoán đáp ứng ổn định nhiệt độ tới hạn cũng được thể hiện trong Hình 4.24 abc.



Hình 4.24: Quantile-quantile plot của mô hình Ritz-iBCMO và mô hình DNN-iBCMO, $a/h = 20$, $p = 1$, $h/l = 5$, cho trường hợp nén hai chiều trong môi trường nhiệt phân phối đồng đều

4.6. Kết luận

Để nghiên cứu đáp ứng ngẫu nhiên của các tấm vi cấu trúc trong điều kiện không chắc chắn về đặc trưng vật liệu, phương pháp Polynomial Chaos Expansion (PCE), Phương pháp Stochastic Collocation (SC) và Phương pháp Monte Carlo được sử dụng. Hơn nữa, nghiên cứu này đề xuất một thuật toán tính toán thông minh mới, iBCMO-DNN, để phân tích ổn định nhiệt độ ngẫu nhiên của các tấm vi cấu trúc với sự không chắc chắn của đặc trưng vật liệu. Một sự kết hợp của BCMO-ANN đã được đề xuất để dự đoán ứng xử dao động tự do ngẫu nhiên của các tấm vi cấu trúc trong điều kiện bất định về đặc trưng vật liệu. DNN với mô hình long short-term memory đã được sử dụng như một phương pháp thay thế để thay thế mô hình tính toán tốn thời gian, trong khi iBCMO được sử dụng để tìm kiếm tập hợp các giải pháp tối ưu.

CHAPTER 5 THUẬT TOÁN META-HEURISTIC CHO TỐI ƯU HÓA DAO ĐỘNG TỰ DO VÀ ỔN ĐỊNH CỦA TẤM COMPOSITE PHÂN LỚP

5.1. Tổng quan

Khảo sát tài liệu ngắn gọn chỉ ra rằng các thuật toán BCMO và SGA được công nhận là phương pháp hiệu quả để tối ưu hóa cấu trúc. Tuy nhiên, không có nghiên cứu nào được xác định sử dụng các thuật toán này đặc biệt để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa liên quan đến các tấm composite nhiều lớp. Nghiên cứu này nhằm mục đích giải quyết các lỗ hổng hiện có bằng cách áp dụng các thuật toán tối ưu hóa meta-heuristic để xác định ổn định tới hạn và tần số cơ bản của các tấm composite nhiều lớp.

5.2. Theoretical formulation

Lý thuyết HSDT cho tấm phân lớp composite:

$$\begin{aligned} u_1(x_1, x_2, x_3, t) &= \phi_1(x_1, x_2) \Psi_2(x_3) + u_{3,1}^0 \Psi_1(x_3) + u_1^0(x_1, x_2) \\ u_2(x_1, x_2, x_3, t) &= \phi_2(x_1, x_2) \Psi_2(x_3) + u_{3,2}^0 \Psi_1(x_3) + u_2^0(x_1, x_2) \\ u_3(x_1, x_2, x_3, t) &= u_3^0(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (5.1)$$

trong đó $\Psi_2(x_3) = H^s \Phi(x_3)$, $\Psi_1(x_3) = H^s \Phi(x_3) - x_3$; Mối liên hệ giữa ứng suất và biến dạng cho lớp thứ k được thể hiện như sau:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11}^{(k)} & \bar{Q}_{12}^{(k)} & \bar{Q}_{16}^{(k)} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{12}^{(k)} & \bar{Q}_{22}^{(k)} & \bar{Q}_{26}^{(k)} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{16}^{(k)} & \bar{Q}_{22}^{(k)} & \bar{Q}_{66}^{(k)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{55}^{(k)} & \bar{Q}_{45}^{(k)} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{45}^{(k)} & \bar{Q}_{44}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \bar{\mathbf{Q}}_k \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5.4)$$

Trong đó

$$\bar{Q}_{11}^{(k)} = Q_{22}^{(k)} \sin^4 \alpha + Q_{11}^{(k)} \cos^4 \alpha + 2(2Q_{66}^{(k)} + Q_{12}^{(k)}) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \quad (5.5a)$$

$$\bar{Q}_{12}^{(k)} = Q_{12}^{(k)} (\cos^4 \alpha + \sin^4 \alpha) + (Q_{11}^{(k)} - 4Q_{66}^{(k)} + Q_{22}^{(k)}) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha \quad (5.5b)$$

$$\bar{Q}_{22}^{(k)} = 2(2Q_{66}^{(k)} + Q_{12}^{(k)}) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha + Q_{11}^{(k)} \sin^4 \alpha + Q_{22}^{(k)} \cos^4 \alpha \quad (5.5c)$$

$$\bar{Q}_{16}^{(k)} = (2Q_{66}^{(k)} + Q_{12}^{(k)} - Q_{22}^{(k)}) \sin^3 \alpha \cos \alpha + (Q_{11}^{(k)} - (Q_{12}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)})) \sin \alpha \cos^3 \alpha \quad (5.5d)$$

$$\bar{Q}_{26}^{(k)} = (2Q_{66}^{(k)} + Q_{12}^{(k)} - Q_{22}^{(k)}) \sin \alpha \cos^3 \alpha + (Q_{11}^{(k)} - (Q_{12}^{(k)} + 2Q_{66}^{(k)})) \sin^3 \alpha \cos \alpha \quad (5.5e)$$

$$\bar{Q}_{66}^{(k)} = (Q_{22}^{(k)} + Q_{11}^{(k)} - 2(Q_{12}^{(k)} + Q_{66}^{(k)})) \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha + Q_{66}^{(k)} (\cos^4 \alpha + \sin^4 \alpha) \quad (5.5f)$$

$$\bar{Q}_{44}^{(k)} = Q_{44}^{(k)} \cos^2 \alpha + Q_{55}^{(k)} \sin^2 \alpha; \quad \bar{Q}_{55}^{(k)} = Q_{44}^{(k)} \sin^2 \alpha + Q_{55}^{(k)} \cos^2 \alpha \quad (5.5g)$$

$$\bar{Q}_{45}^{(k)} = (Q_{55}^{(k)} - Q_{44}^{(k)}) \cos \alpha \sin \alpha \quad (5.5k)$$

với α là góc hướng sợi của mỗi lớp, $Q_{ij}^{(k)}$ của các tấm composite trục hướng trong hệ tọa độ cục bộ được cho bởi:

$$Q_{11}^{(k)} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}, Q_{12}^{(k)} = \frac{\nu_{12} E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}, Q_{22}^{(k)} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \nu_{21}}, \quad Q_{66}^{(k)} = G_{12}, Q_{44}^{(k)} = G_{23}, Q_{55}^{(k)} = G_{13} \quad (5.6b)$$

5.3. Ritz method

Chuyển vị màng và chuyển vị ngang cũng như góc quay $(u_1^0, u_2^0, u_3^0, \phi_1, \phi_2)$ có thể được trình bày thông qua chuỗi số của hàm dạng theo hướng $x_1 - , x_2 - (X_i(x_1)$ and $Y_j(x_2))$ và năm biến chưa biết $(u_{1ij}, u_{2ij}, u_{3ij}, x_{ij}, y_{ij})$ được thể hiện như sau:

$$u_2^0(x_1, x_2, t) = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} u_{2ij}(t) Y_{j,2}(x_2) X_i(x_1) \quad (5.15a)$$

$$u_1^0(x_1, x_2, t) = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} u_{1ij}(t) Y_j(x_2) X_{i,1}(x_1) \quad (5.15b)$$

$$\phi_2(x_1, x_2, t) = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} y_{ij}(t) Y_{j,2}(x_2) X_i(x_1) \quad (5.15c)$$

$$\phi_1(x_1, x_2, t) = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} x_{ij}(t) Y_j(x_2) X_{i,1}(x_1) \quad (5.15d)$$

$$u_3^0(x_1, x_2, t) = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} u_{3ij}(t) Y_j(x_2) X_i(x_1) \quad (5.15e)$$

5.4. Optimization algorithm

Trong phần này, ba thuật toán được trình bày để xác định góc sợi α để xác định giá trị lớn nhất của tần số và tải trọng vĩnh tối hạn của các tấm composite nhiều lớp, với hàm mục tiêu như sau.

Maximum $\bar{\omega} = f(\alpha_i^d)$ or $\bar{N}_{cr} = f(\alpha_i^d)$

$$\text{Subjected to } -90^\circ \leq \alpha_i^d \leq 90^\circ \quad (5.23)$$

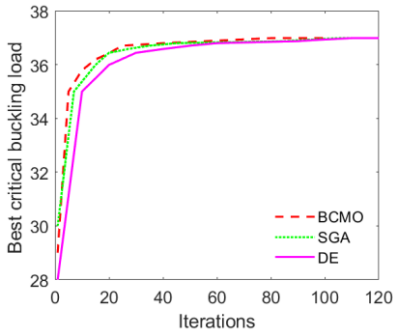
với d là số lớp.

Ba thuật toán bao gồm differential evolution (DE), shrimp and goby association search algorithm (SGA) and balancing composite motion optimization (BCMO) được sử dụng để tính toán thiết kế tối ưu các mục tiêu trên.

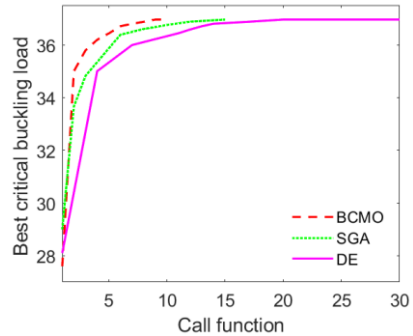
5.5. Kết quả số

5.5.2. Nghiên cứu tối ưu

Để so sánh hiệu quả của các meta-heuristics khác nhau, Hình 5.4 cho thấy lịch sử hội tụ của tần số tự nhiên và tải trọng vĩnh của các tấm SSSS bằng ba giải pháp khác nhau (DE, SGA và BCMO). Có thể thấy rằng các thuật toán SGA và BCMO hội tụ nhanh hơn thuật toán DE.



a) Symmetric layers



b) Arbitrary layers

Hình 5.4: So sánh tải trọng vênh tối đa (nén một trục) của các tấm composite nhiều lớp vuông SSSS với kích thước dân số $NP = 20$ ($E_1 / E_2 = 40$)

5.6. Kết luận

Chương này nghiên cứu các thuật toán tối ưu hóa meta-heuristic để phân tích dao động tự do và ổn định tới hạn của các tấm composite nhiều lớp. Khung lý thuyết kết hợp HSDT, phương pháp Ritz, BCMO và SGA. Kết quả số thu được cho thấy hiệu quả và độ chính xác của lý thuyết hiện tại trong việc dự đoán phản ứng của các tấm composite nhiều lớp.

CHƯƠNG 6 KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

6.1 Kết luận

Luận án đã phát triển các hàm xấp xỉ mới cho phương pháp Ritz; phát triển các mô hình ngẫu nhiên cho phân tích ứng xử của tấm vi cấu trúc FG, FG sandwich, FGP, PMF; phát triển hai thuật toán tính toán thông minh mới để giải quyết các vấn đề ngẫu nhiên của các tấm vi mô; áp dụng hai phương pháp tối ưu hóa để tìm kiếm hướng sợi tối ưu của các tấm composite nhiều lớp.

Mặc dù các hàm hình dạng hiện tại đã chứng minh hiệu quả trên các tấm vi cấu trúc hai chiều, nhưng ứng dụng của chúng trên các tấm ba chiều dạng macro và micro đặt ra những thách thức nhất định. Hơn nữa, luận án hiện tại không tính đến các đặc điểm ứng xử của các tấm vi cấu trúc composite nhiều lớp trong các tình huống mà hướng sợi trải qua các biến thể không chắc chắn. Phương pháp hiện tại gặp phải những thách thức khi xử lý các tấm có điều kiện biên tùy ý. Ngoài ra, luận án hiện không đề cập đến vấn đề tấm vi cấu trúc có điều kiện biên tuần hoàn.

6.2. Khuyến nghị

Sau đây là một số khuyến nghị về hướng nghiên cứu dự kiến được mở rộng trong tương lai:

- Các hàm hình dạng mới có thể được phát triển để phân tích ứng xử của các tấm vi mô composite nhiều lớp cho hai chiều và ba chiều.
- Phân tích các tấm vi cấu trúc composite / FG lệch có thể được phát triển bằng cách mở rộng các phương pháp hiện tại.
- Một mô hình phi tuyến dựa trên biến dạng lớn, góc xoay và phương pháp Ritz nên được xem xét để phân tích các tấm vi cấu trúc composite và FGP trong các điều kiện biên tùy ý.
- Giải quyết vấn đề tấm vi cấu trúc với điều kiện biên tuần hoàn.