

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

BÙI XUÂN BÁCH

PHÁT TRIỂN MÔ HÌNH DẦM THÀNH MỎNG COMPOSITE
DƯỚI TÁC DỤNG TẢI TRỌNG CƠ HỌC VÀ NHIỆT ĐỘ

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ
CHUYÊN NGÀNH: CƠ KỸ THUẬT

TP. HỒ CHÍ MINH, THÁNG 4 NĂM 2025

Cam kết

Tôi xin cam đoan rằng công trình này không chứa đựng bất kỳ tài liệu nào đã được sử dụng để xét duyệt và trao tặng các bằng cấp hoặc chứng chỉ khác dưới tên tôi tại bất kỳ trường đại học hoặc tổ chức giáo dục nào, và, theo sự hiểu biết tốt nhất của tôi, không bao gồm tài liệu nào đã được công bố hoặc viết bởi người khác, trừ khi có trích dẫn đúng cách trong văn bản.

Tôi xin trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ mà tôi đã nhận được từ các hướng dẫn của Giáo sư Tiến sĩ Nguyễn Trung Kiên và Tiến sĩ Đỗ Tiến Thọ.

Bùi Xuân Bách

Danh mục các bài báo công bố

Các bài báo quốc tế thuộc danh mục ISI có phản biện:

1. **Bui, X.-B.**, T.-K. Nguyen, N.-D. Nguyen, and T.P. Vo, *A general higher-order shear deformation theory for buckling and free vibration analysis of laminated thin-walled composite I-beams*. Composite Structures, 2022. 295: p. 115775.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115775>
2. **Bui, X.-B.**, T.-K. Nguyen, and P.T.T. Nguyen, *Stochastic vibration and buckling analysis of functionally graded sandwich thin-walled beams*. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2023: p. 1-23. <https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2165101>
3. **Bui, X.-B.**, T.-K. Nguyen, A. Karamanli, and T.P. Vo, *Size-dependent behaviours of functionally graded sandwich thin-walled beams based on the modified couple stress theory*. Aerospace Science and Technology, 2023. 142: p. 108664.
<https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108664>
4. **Bui, X.-B.** and T.-K. Nguyen, *Deterministic and stochastic flexural behaviors of laminated composite thin-walled I-beams using a sinusoidal higher-order shear deformation theory*. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2023: p. 1-30.
<https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2297840>
5. **Bui, X.-B.**, P.T.T. Nguyen, and T.-K. Nguyen, *Spectral projection and linear regression approaches for stochastic flexural and vibration*

analysis of laminated composite beams. Archive of Applied Mechanics, 2024 .<https://doi.org/10.1007/s00419-024-02565-x>

Các bài báo trong nước và bài báo hội thảo quốc tế có phân biên:

6. **Bui, X.B.**, T.K. Nguyen, Q.C. Le, and T.T.P. Nguyen. *A novel two-variable model for bending analysis of laminated composite beams*. in *2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*. 2020.

7. **Bui, X.-B.**, A.-C. Nguyen, N.-D. Nguyen, T.-T. Do, and T.-K. Nguyen, *Buckling analysis of laminated composite thin-walled I-beam under mechanical and thermal loads*. Vietnam Journal of Mechanics, 2023. 45(1): p. 75-90. <https://doi.org/10.15625/0866-7136/17956>

8. **Bui, X.-B.**, T.-K. Nguyen, T.T.-P. Nguyen, and V.-T. Nguyen. *Stochastic Vibration Responses of Laminated Composite Beams Based on a Quasi-3D Theory*. in *ICSCEA 2021*. 2023. Singapore: Springer Nature Singapore.

Danh mục các ký hiệu

b, h, L : Chiều rộng, chiều cao, chiều dài của dầm đặc hình chữ nhật

u, w : Chuyển vị dọc trục và ngang tại bất kỳ điểm nào trên dầm đặc hình chữ nhật

$\bar{u}, \bar{w}$: Chuyển vị dọc trục và ngang tại mặt phẳng trung hòa của dầm đặc

$\mathbf{K}$: Ma trận độ cứng

$\mathbf{M}$: Ma trận khối lượng

$\mathbf{f}$: Vector ngoại lực

b_1, b_2, b_3 : Chiều rộng của cánh trên, bụng, và cánh dưới của dầm thành mỏng chữ I hoặc chữ C

h_1, h_2, h_3 : Chiều dày của cánh trên, bụng, và cánh dưới của dầm thành mỏng chữ I hoặc chữ C

ϕ : Góc xoay quanh trục cực

E_1, E_2 : Mô đun đàn hồi Young

G_{12}, G_{23}, G_{13} : Mô đun cắt

$\nu, \nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$: Hệ số Poisson

ρ : Khối lượng riêng

$F_\omega(s)$: Hàm warping của dầm thành mỏng

Table of Contents

Cam kết	1
Danh mục các bài báo công bố	2
Danh mục các ký hiệu	4
Tóm tắt	6
1. Phạm vi nghiên cứu	7
1.1 Vật liệu composite	7
1.2 Thin-walled beams	7
1.3 Định lượng bất định	8
2. Lý thuyết tổng quan	9
2.1 Lý thuyết dầm đặc	Error! Bookmark not defined.
2.2 Lý thuyết dầm thành mỏng	9
2.3 Quan hệ cấu tạo của vật liệu composite	12
3. Mục tiêu nghiên cứu	20
4. Research method	22
5. Kết luận	22
6. Hướng nghiên cứu trong tương lai	24
Tài liệu tham khảo	25

Tóm tắt

Dầm thành mỏng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực kỹ thuật như xây dựng, hàng không, và ô tô nhờ khả năng chịu tải lớn và trọng lượng nhẹ. Luận án này nghiên cứu phản ứng kết cấu của chúng, tập trung vào các hình dạng mặt cắt ngang, phân tích tĩnh (độ võng, ổn định uốn dưới tải trọng cơ học và nhiệt), và phân tích dao động (tần số cơ bản và dạng dao động, đặc biệt là dạng xoắn đối với các mặt cắt mở). Mục tiêu của luận án là cải thiện thiết kế, tối ưu hóa, và đảm bảo an toàn trong việc sử dụng các vật liệu composite tiên tiến bằng cách dự đoán phản ứng của dầm dưới các dạng tải trọng khác nhau, bất định vật liệu, biến dạng trượt và hiệu ứng kích thước. Các mô hình trước đây như lý thuyết dầm của Vlasov và lý thuyết dầm biến dạng trượt bậc nhất đã được mở rộng bằng cách đề xuất một lý thuyết bậc cao cho dầm composite. Mô hình này hỗ trợ phân tích ngẫu nhiên (xem xét sự thay đổi trong tính chất vật liệu) và phân tích hiệu ứng kích thước (sử dụng lý thuyết ứng suất cặp biến đổi cho các dầm vi mô). Các kỹ thuật bao gồm lời giải dầm mới, khai triển hỗn loạn đa thức (Polynomial Chaos Expansion), và mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để đánh giá phản ứng một cách hiệu quả và chính xác. Phân tích độ nhạy được sử dụng để đánh giá tác động của sự bất định trong tính chất vật liệu. Kết quả nghiên cứu cung cấp dữ liệu so sánh cho các nghiên cứu trong tương lai. Trước khi tiến hành các phân tích này, mô hình đã được kiểm nghiệm, và tất cả tính toán được thực hiện trên MATLAB, tập trung vào độ chính xác và hiệu quả.

1. Phạm vi nghiên cứu

1.1 Vật liệu composite

Vật liệu composite đã trở thành một yếu tố cốt lõi trong kỹ thuật hiện đại và khoa học vật liệu, cách mạng hóa phương pháp thiết kế và sản xuất của nhiều loại cấu trúc và sản phẩm. Không giống như các vật liệu đồng nhất, composite được tạo ra bằng cách kết hợp hai hoặc nhiều vật liệu khác nhau, mỗi loại mang lại những tính chất đặc trưng riêng, tạo thành một vật liệu tổng hợp với các đặc tính vượt trội. Quá trình kết hợp này cho phép tạo ra các vật liệu vượt qua giới hạn của từng thành phần, mang lại sự cân bằng tuyệt vời về độ bền, độ cứng và tính linh hoạt. Với các kỹ thuật sản xuất tiên tiến, các kỹ sư có thể tạo ra nhiều loại vật liệu composite khác nhau.

Trong các phần sau, luận án phân tích sâu về các loại composite như vật liệu composite phân lớp (LC), vật liệu composite phân cấp (FGC), và vật liệu xốp kim loại. Các vật liệu này được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, bao gồm hàng không, ô tô, dụng cụ thể thao, và kỹ thuật kết cấu. Chúng đặc biệt hữu ích trong các thành phần chịu các điều kiện khắc nghiệt hoặc tải trọng biến đổi, nơi mà các vật liệu đồng nhất không thể đảm bảo hiệu suất tối ưu.

1.2 Dầm thành mỏng

Dầm thành mỏng là các phần tử kết cấu đặc trưng bởi tỷ lệ chiều dày thành so với các kích thước khác (như chiều dài và chiều rộng) tương đối nhỏ, khác biệt với các dầm đặc hoặc dầm thành dày.

Việc sử dụng và thiết kế các dầm thành mỏng thường được thúc đẩy bởi nhu cầu về hiệu quả kết cấu, nhờ sử dụng lượng vật liệu tối thiểu trong khi vẫn đảm bảo độ bền và độ cứng phù hợp. Trong nhiều thế kỷ, các dầm thành mỏng bằng thép đã được sử dụng trong các công trình xây dựng và cầu. Hành vi và thiết kế của chúng đã được nghiên cứu kỹ lưỡng khi các công trình thép ngày càng cao hơn và cầu ngày càng dài hơn. Tuy nhiên, khi vật liệu composite mới được áp dụng cho các kết cấu thành mỏng và nhu cầu về hiệu quả kết cấu ngày càng tăng, vẫn còn nhiều khoảng trống trong nghiên cứu về các kết cấu thành mỏng composite. Luận án này phân tích các mặt cắt dầm thành mỏng composite dưới tác động của tải trọng cơ học và nhiệt..

1.3 Định lượng bất định

Trong các tình huống thực tế, sự biến động của các vật liệu thành phần do quá trình sản xuất hoặc các yếu tố không lường trước đòi hỏi phải tính đến sự bất định để cải thiện độ tin cậy trong việc dự đoán phản ứng của dầm. Định lượng bất định (Uncertainty quantification) giúp giải quyết vấn đề biến thiên và sự không chính xác trong các mô hình kỹ thuật. Ba phương pháp định lượng bất định được sử dụng trong nghiên cứu này gồm: Mô phỏng Monte Carlo (MCS), Khai triển hỗn loạn đa thức (PCE), và Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN).

- Mô phỏng Monte Carlo (MCS): MCS thực hiện nhiều lần mô phỏng với các thông số đầu vào được tạo ngẫu nhiên,

cung cấp phân phối các kết quả phản ứng của dầm. Mặc dù chính xác, MCS có thể đòi hỏi tài nguyên tính toán lớn.

- Khai triển hỗn loạn đa thức (PCE): PCE cho phép dự đoán phản ứng hiệu quả hơn bằng cách biểu diễn các thông số bất định dưới dạng chuỗi đa thức.
- Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN): ANN, dựa trên mô phỏng não người, cung cấp một phương pháp hiện đại, hiệu quả để dự đoán phản ứng của dầm thành mỏng.

Ngoài ra, phân tích độ nhạy được tiến hành để đánh giá tác động của từng thông số đầu vào đối với phản ứng của dầm. Các so sánh giữa MCS, PCE, và ANN được thực hiện dựa trên các chỉ số Sobol của các mô phỏng dầm.

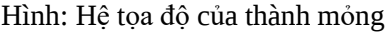
2. Lý thuyết tổng quan

2.1 Lý thuyết dầm thành mỏng

Theo định nghĩa của Vlasov [23], dầm thành mỏng là dầm có

$$\frac{h}{l} \leq 0.1 \text{ và } \frac{l}{L} \leq 0.1, \text{ trong đó } h \text{ là chiều dày thành, } l \text{ là bất kỳ kích}$$

thước đặc trưng nào của mặt cắt, và L chiều dài dầm. Chiều dày thành chỉ được phép thay đổi dọc theo đường bao của mặt cắt ngang nhưng không thay đổi dọc theo chiều dài dầm. Một hệ tọa độ chung được sử dụng để phân tích dầm thành mỏng trong luận án này. hệ tọa độ Descartes (x, y, z) , hệ tọa độ (n, s, z) và hệ tọa độ đường bao s .



- Lý thuyết dầm thành mỏng cổ điển (CTWBT): là một trong những phương pháp sớm nhất để phân tích các kết cấu thành mỏng. Lý thuyết này dựa trên các giả định cơ bản của lý thuyết dầm Euler-Bernoulli, trong đó các mặt cắt ngang vẫn phẳng và vuông góc với trục trung tâm sau khi biến dạng. Trong CTWBT, ảnh hưởng của biến dạng xoắn qua, và dầm chủ yếu được phân tích dưới tác dụng của uốn và xoắn, với các giả thiết đơn giản hóa về warping. Mặc dù lý thuyết này cho kết quả khá tốt khi phân tích dầm thành mỏng mảnh, nó trở nên không chính xác trong các trường hợp có biến dạng cắt đáng kể hoặc các kết cấu xoắn phức tạp, đặc biệt là đối với các kết cấu không đồng nhất như kết cấu composite.

- Lý thuyết dầm thành mỏng bậc nhất (FTWBT): Để khắc phục những hạn chế của CTWBT, lý thuyết dầm thành mỏng bậc nhất (FTWBT) đưa vào ảnh hưởng của biến dạng cắt bằng cách sử dụng giả thuyết dầm Timoshenko. Lý thuyết này xét đến độ mềm dẻo do biến dạng cắt ngang, giúp nó phù hợp hơn với các dầm có bề dày vừa phải và tiết diện không đồng nhất. FTWBT cung cấp cách tiếp cận tinh vi hơn đối với biến dạng xoắn, cho phép dự đoán chính xác hơn ứng suất và chuyển vị của dầm dưới tác dụng của uốn, xoắn và lực dọc trục. Tuy nhiên, lý thuyết này vẫn giả định sự phân bố tuyến tính của biến dạng cắt theo chiều dày, điều này có thể không đủ chính xác đối với các vật liệu không đồng nhất hoặc các điều kiện tải phức tạp.

- Lý thuyết dầm thành mỏng bậc cao (HTWBT): tiếp tục cải tiến phân tích bằng cách đưa vào các trường dịch chuyển bậc cao và ảnh hưởng của biến dạng cắt. Khác với FTWBT – vốn giả định sự phân bố tuyến tính của biến dạng cắt – HTWBT cho phép biến dạng warping phi tuyến và mô tả chính xác hơn sự thay đổi biến dạng theo chiều dày. Cách tiếp cận này đặc biệt hữu ích đối với vật liệu composite và vật liệu biến tính theo chức năng (FGM), nơi mà sự thay đổi độ cứng theo chiều dày đóng vai trò quan trọng trong hành vi kết cấu.

Sự phát triển từ CTWBT đến HTWBT phản ánh nhu cầu ngày càng cao về độ chính xác trong mô hình hóa các kết cấu thành mỏng, đặc biệt trong các ứng dụng kỹ thuật hiện đại liên quan đến vật liệu composite, vật liệu không đồng nhất và cấu trúc vi mô. Trong khi

CTWBT cung cấp cái nhìn nền tảng, FTWBT bổ sung hiệu chỉnh cần thiết về biến dạng cắt, thì HTWBT mang đến cách tiếp cận tinh vi hơn để mô tả các biến dạng phức tạp. Việc lựa chọn lý thuyết phù hợp phụ thuộc vào cấu hình kết cấu, đặc tính vật liệu và mức độ chính xác cần thiết cho ứng dụng cụ thể.

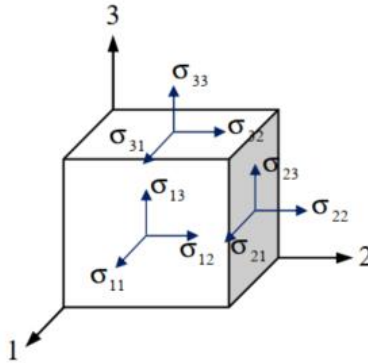
2.2 Vật liệu

Có ba loại vật liệu composite chính được sử dụng trong luận án này: vật liệu composite phân lớp, vật liệu composite phân cấp chức năng, và vật liệu bột kim loại xốp. Tác động của tính chất bất đẳng hướng trong các vật liệu composite này cho phép nhà thiết kế tối ưu hóa cấu trúc vật liệu theo các đường truyền tải, từ đó giảm trọng lượng của kết cấu mà không làm giảm độ bền. Các tác động này được mô tả thông qua phương trình quan hệ được trình bày dưới đây.

Dựa trên định luật Hooke, mối quan hệ ứng suất-biến dạng cho vật liệu bất đẳng hướng có thể được biểu diễn dưới dạng ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

trong đó σ_{ij} là vector thành phần ứng suất, ε_{ij} là vector thành phần biến dạng dọc trục, và γ_{ij} là vector thành phần biến dạng cắt.



Hình: Thành phần ứng suất và biến dạng trong hệ tọa độ

- Vật liệu composite nhiều lớp (Laminated composite material): là loại vật liệu bao gồm nhiều lớp của các composite cốt sợi gia cường bằng polymer hoặc composite nền kim loại, được xếp chồng lên nhau theo một hướng nhất định nhằm đạt được các tính chất cơ học mong muốn. Các vật liệu này có tỷ số cường độ-trọng lượng cao, độ cứng vượt trội và có thể tùy chỉnh tính chất dị hướng bằng cách thay đổi hướng sợi và trình tự sắp xếp các lớp. Ứng xử cơ học của vật liệu laminate composite bị chi phối bởi ứng suất giữa các lớp (interlaminar stresses), hiện tượng tách lớp (delamination), và các cơ chế phá hoại phức tạp như nứt ma trận và gãy sợi. Do có cấu trúc dạng lớp, các lý thuyết biến dạng cắt bậc cao thường được sử dụng để mô tả chính xác sự thay đổi ứng suất theo chiều dày.

Composite nhiều lớp được ứng dụng rộng rãi trong ngành hàng không, hàng hải và các công trình kết cấu – nơi yêu cầu vật liệu nhẹ nhưng có hiệu năng cao. Các thành phần độ cứng của dầm thành mỏng làm từ vật liệu composite nhiều lớp L_{ij} ($i, j = 1, \dots, 9$) chứa các hệ số có thể được tính toán như sau:

$$\left(A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}, E_{ij}, F_{ij}, H_{ij}, B_{sij}, H_{sij} \right) = \sum_{k=1}^{nl} \left(\int_{n_k}^{n_{k+1}} (1, n, n^2, f, nf, f^2, ng, g^2) Q_{ij} dn \right)$$

trong đó nl là số lớp laminate và k là số hiệu của lớp laminate

- Vật liệu phân lớp chức năng (Functionally Graded Materials - FGM): là các vật liệu tiên tiến có sự biến đổi dần dần về thành phần và vi cấu trúc trong toàn bộ thể tích, giúp loại bỏ các bề mặt tiếp xúc đột ngột giữa các pha vật liệu khác nhau. Khác với vật liệu composite nhiều lớp (laminated composites) có các lớp rời rạc, FGM chuyển tiếp một cách mượt mà từ vật liệu này sang vật liệu khác, nhờ đó cải thiện khả năng chịu nhiệt, giảm tập trung ứng suất và tăng khả năng chịu hư hỏng. Các vật liệu này đặc biệt hữu ích trong môi trường nhiệt độ cao, chẳng hạn như lớp phủ cách nhiệt trong động cơ phản lực và lò phản ứng hạt nhân. Việc mô hình hóa FGM thường đòi hỏi sử dụng các lý thuyết dầm có biến dạng cắt để mô tả chính xác sự biến thiên liên tục của tính chất vật liệu, khiến chúng trở thành một chủ đề quan trọng trong cơ học tính toán và phân tích kết cấu. Khối lượng riêng hữu hiệu và hệ số Young hữu hiệu được viết thành:

$\rho = \rho_c V_c + \rho_m (1 - V_c)$, $E = E_c V_c + E_m (1 - V_c)$ trong đó c và m ghi chú vật liệu sứ và kim loại, V_c là tỉ lệ thành phần thể tích vật liệu sứ. Đối với vật liệu FG thay đổi dần:

$$V_c = \left[\frac{n}{h_j} + 0.5 \right]^p, \quad -0.5h_j \leq n \leq 0.5h_j.$$

Đối với vật liệu FG sandwich:

$$V_c = \left[\frac{-|n| + 0.5h_j}{0.5(1 - \alpha_j)h_j} \right]^p, \quad -0.5h_j \leq n \leq -0.5\alpha_j h_j$$

$$0.5\alpha_j h_j \leq n \leq 0.5h_j$$

$$V_c = 1, \quad -0.5\alpha_j h_j \leq n \leq 0.5\alpha_j h_j$$

trong đó p chỉ số mũ phân phối vật liệu FG, h_j ($j=1,2,3$) chiều dày bản cánh trên, cánh dưới, bụng; α_j ($j=1,2,3$) là tỉ lệ độ dày vật liệu sứ của bản cánh trên, cánh dưới, bụng.

- Vật liệu xốp kim loại (Porous Metal Foam - PMF): là những cấu trúc nhẹ, có độ rỗng cao với khả năng hấp thụ năng lượng, cách nhiệt và giảm chấn rất tốt. Các vật liệu này thường được sản xuất bằng các quy trình tạo bọt có kiểm soát hoặc công nghệ in 3D (gia công cộng thêm), tạo ra một cấu trúc tổ ong với các lỗ rỗng liên kết nhau. Ứng xử cơ học của kim loại xốp phụ thuộc vào sự phân bố độ rỗng, hình dạng lỗ rỗng và thành phần vật liệu. Do tính nén cao và vi cấu trúc phức tạp,

các mô hình vật liệu tiên tiến cùng với kỹ thuật đồng nhất hóa (homogenization) thường được sử dụng để dự đoán khả năng làm việc của chúng dưới tải trọng cơ học và nhiệt.

Phân bố lỗ rỗng đối xứng (Kiểu A – Type A)

$$E(n) = E_{\max} \left(1 - e_0 \cos \left(\frac{\pi n}{h} \right) \right)$$

$$\rho(n) = \rho_{\max} \left(1 - e_m \cos \left(\frac{\pi n}{h} \right) \right)$$

Phân bố lỗ rỗng bất đối xứng (Kiểu B – Type B)

$$E(n) = E_{\max} \left[1 - e_0 \cos \left(\frac{\pi n}{2h} + \frac{\pi}{4} \right) \right]$$

$$\rho(n) = \rho_{\max} \left[1 - e_m \cos \left(\frac{\pi n}{2h} + \frac{\pi}{4} \right) \right]$$

trong đó: $E_{\max}$ và $\rho_{\max}$ lần lượt là các giá trị cực đại của mô đun Young và mật độ khối lượng; e_0 và $e_m = 1 - \sqrt{1 - e_0}$ là các thông số độ xốp; $\rho(n)$ là mật độ khối lượng của dầm thành mỏng PMF.

2.3 Phương pháp chuỗi hybrid kiểu Ritz

Phương pháp Ritz là một phương pháp tiếp cận dựa trên năng lượng được sử dụng rộng rãi để giải các bài toán cơ học kết cấu phức tạp, đặc biệt là trong các lý thuyết dầm, tấm và vỏ. Bằng cách xấp xỉ các trường dịch chuyển sử dụng một loạt các hàm dạng, phương pháp này chuyển đổi các phương trình chi phối thành dạng biến phân tương

đương, tạo điều kiện cho các giải pháp số hiệu quả. Các giải pháp Ritz truyền thống thường sử dụng các hàm hình dạng đa thức hoặc lượng giác; tuy nhiên, luận án này trình bày các công thức chuỗi hybrid kết hợp các hàm lượng giác và hàm mũ. Giải pháp thu được bằng cách giảm thiểu hàm năng lượng tổng của hệ thống bằng cách sử dụng phương trình Lagrange.

BC	Hàm dạng $\varphi_j(z)$	
	Exponential	Trigonometric
S-S	$(z-L)\left(1-\frac{z}{L}\right)e^{\frac{-jz}{L}}$	$\sin\left(\frac{\pi z}{L}\right)e^{\frac{-jz}{L}}$
C-F	$\left(\frac{z}{L}\right)^2 e^{\frac{-jz}{L}}$	$\sin^2\left(\frac{\pi z}{2L}\right)e^{\frac{-jz}{L}}$
C-C	$\left(\frac{z}{L}\right)^2 \left(1-\frac{z}{L}\right)^2 e^{\frac{-jz}{L}}$	$\sin^2\left(\frac{\pi z}{L}\right)e^{\frac{-jz}{L}}$

Bảng: Hàm dạng của phương pháp Ritz

2.4 Phân tích ngẫu nhiên

Phân tích ngẫu nhiên là một nhánh của khoa học tính toán và toán học nghiên cứu sự ngẫu nhiên trong một hệ thống hoặc quá trình. Nó được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như tài chính, vật lý, sinh học, và kỹ thuật. Nền tảng lý thuyết của lĩnh vực này có từ công trình của Norbert Wiener vào những năm 1940, được gọi là quá trình Wiener, nghiên cứu chuyển động Brownian một chiều. Lý thuyết này giới thiệu ý tưởng rằng một quá trình ngẫu nhiên có thể được phân tích thành chuỗi các hàm đa thức trực giao của các biến ngẫu nhiên, và đã được Szabados [24] thảo luận sâu sắc. Với sự tiến bộ của máy tính vào những năm 1990, Ghanem và Spanos đã trình bày việc sử dụng khai triển hỗn loạn đa thức (PCE) cho các phân phối xác suất tùy ý. Andrew and Askey [25] đã đóng góp vào lý thuyết hỗn loạn đa thức bằng cách đề xuất sơ đồ Askey, sắp xếp các đa thức trực giao và mở rộng sự hiểu biết về các quá trình ngẫu nhiên. Từ những năm 2000 đến nay, sự gia tăng tài nguyên tính toán và các thuật toán số hiện đại đã thúc đẩy việc sử dụng PCE trong nhiều lĩnh vực khác nhau. [26-28]

Trong luận án này, phân tích ngẫu nhiên được áp dụng cho đầm composite thành mỏng để nghiên cứu cách các biến ngẫu nhiên của thông số đầm ảnh hưởng đến phản ứng cơ học của nó. Ba kỹ thuật được mô tả ngắn gọn dưới đây và chi tiết hơn trong chương 4:

- **Mô phỏng Monte Carlo (MCS):** MCS là kỹ thuật tạo ra các mẫu đầu vào ngẫu nhiên và quan sát cách sự ngẫu nhiên này ảnh hưởng đến kết quả đầu ra. Các đầu vào và đầu ra có thể mang tính chất xác suất

và tuân theo bản chất vật lý của các biến. Trong số ba kỹ thuật, MCS có công thức toán học đơn giản nhất và có thể cung cấp biểu diễn chính xác nhất của các kết quả đảm. Tuy nhiên, độ chính xác này đi kèm với chi phí tính toán cao, đặc biệt khi số lượng biến ngẫu nhiên và mẫu đầu vào tăng lên.

- **Khai triển hỗn loạn đa thức (PCE):** PCE biểu diễn các thông số bất định trong hệ thống dưới dạng một chuỗi đa thức của các biến ngẫu nhiên nhân với các hệ số tương ứng. Các đa thức này được chọn sao cho trực giao với phân phối xác suất của các đầu vào.

$$\hat{u} \simeq \hat{u}_{PCE}(\mathbf{x}) = \sum_{i=0}^{P-1} c_i He_i(\mathbf{q}) + \varepsilon \quad (1-21)$$

trong đó: $\hat{u}$ là phản ứng của dầm composite thành mỏng, $\hat{u}_{PCE}$ là phản ứng của dầm tính toán từ PCE; $\mathbf{q}$ Vector các biến ngẫu nhiên độc lập trong không gian PCE, được ánh xạ đến các thông số ngẫu nhiên vật lý $\mathbf{x}$; He_i Các hàm cơ sở trực giao đa biến, phụ thuộc vào phân phối xác suất của đầu vào ngẫu nhiên; c_i Các hệ số được xác định sao cho phần dư ε được tối thiểu hóa

Trong luận án này, phần dư ε được tối thiểu hóa bằng phương pháp hồi quy bình phương cực tiểu và phương pháp Gauss..

- **Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN):** ANN là các mô hình tính toán lấy cảm hứng từ bộ não con người, được sử dụng rộng rãi trong học máy. Hình dưới minh họa quy trình làm việc của ANN, bao gồm ba loại lớp

chính: lớp đầu vào, lớp ẩn, và lớp đầu ra. Mặc dù ANN đã được áp dụng gần đây để dự đoán hành vi của dầm thành mỏng [29-31], chưa có nghiên cứu nào thực hiện so sánh kỹ lưỡng giữa MCS, PCE, và ANN trong phân tích ngẫu nhiên của dầm composite thành mỏng. Khoảng trống này được xem xét trong các chương sau của luận án.

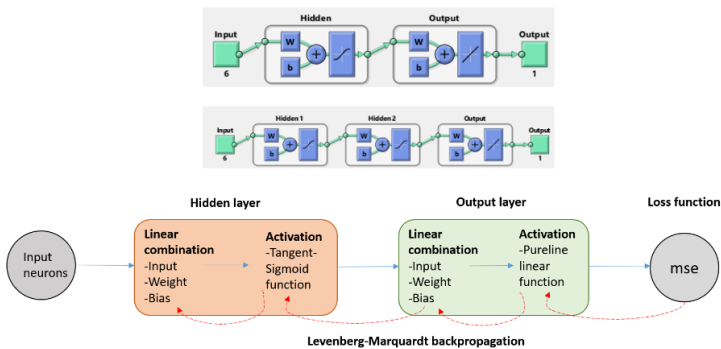


Figure: Artificial neural network workflow

3. Mục tiêu nghiên cứu

Các mục tiêu nghiên cứu cho luận án Tiến sĩ này xoay quanh việc nghiên cứu các dầm composite thành mỏng bằng cách sử dụng MATLAB, lý thuyết biến dạng trượt bậc cao, kết hợp với định lượng bất định, hiệu ứng kích thước trên vi dầm, và hiện tượng ổn định uốn do nhiệt. Các mục tiêu cụ thể như sau:

- Xây dựng và triển khai lý thuyết biến dạng cắt bậc cao để phân tích các dầm composite thành mỏng, bao gồm các loại dầm composite phân lớp, phân cấp chức năng, và bọt kim loại xốp.

Khung tính toán này nhằm dự đoán chính xác các phản ứng cơ học của dầm dưới các điều kiện tải trọng khác nhau.

- Nghiên cứu sự ảnh hưởng của sự biến đổi trong thành phần và phân bố vật liệu bên trong các dầm composite phân lớp, phân cấp chức năng, và bọt kim loại xốp đối với tính chất cơ học và hiệu suất kết cấu tổng thể.
- Định lượng bất định: Sử dụng các phương pháp xác suất để định lượng sự bất định liên quan đến tính chất vật liệu, sai lệch hình học, và điều kiện tải trọng, đồng thời đánh giá tác động của chúng lên hành vi của dầm composite thành mỏng.
- Xem xét hiệu ứng kích thước trên dầm micro: Khám phá hành vi phụ thuộc vào kích thước của các vi dầm làm từ vật liệu composite, từ đó tăng cường hiểu biết về các hiệu ứng tỷ lệ trong các cấu trúc vi mô.
- Phân tích ổn định uốn dọc do nhiệt: Nghiên cứu đặc điểm ổn định uốn do nhiệt của các dầm composite thành mỏng dưới các kích bản tải nhiệt khác nhau, bao gồm cả vai trò của gradient nhiệt độ và tải nhiệt trong việc ảnh hưởng đến tính ổn định của các dầm này.
- Kiểm chứng mô hình thông qua phân tích so sánh: So sánh kết quả dự đoán từ các mô hình phát triển với các kết quả lý thuyết, số học, và thực nghiệm có sẵn trong tài liệu, để kiểm

chứng độ chính xác và độ tin cậy của khung tính toán được đề xuất.

Thông qua việc đạt được các mục tiêu này, luận án hướng tới việc nâng cao kiến thức trong lĩnh vực nghiên cứu dầm composite thành mỏng, cung cấp một công cụ tính toán mạnh mẽ cho các nhà nghiên cứu khác, đồng thời đề xuất các phương pháp tối ưu hóa cho các phần tử kết cấu quan trọng này.

4. Phương pháp nghiên cứu

Trong mỗi chương tiếp theo, dữ liệu sẽ được trình bày theo trình tự dựa trên phương pháp nghiên cứu. Các mô hình và mô phỏng dầm thành mỏng được kiểm chứng với nhiều bài báo nổi bật và kết quả thực nghiệm. Sau đó, các nghiên cứu tham số sẽ được thực hiện với một loạt các thông số đầu vào được đưa vào mô hình mô phỏng của luận án. Chuỗi các bước nghiên cứu này đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy của các đóng góp mới được đưa ra trong luận án, đồng thời xây dựng cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo.

5. Kết luận

Luận án này đã tiến hành nghiên cứu toàn diện về các dầm thành mỏng, nhấn mạnh vào ứng dụng rộng rãi của chúng trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật như xây dựng, hàng không, và công nghiệp ô tô, nhờ vào khả năng chịu tải lớn và trọng lượng nhẹ.

Nghiên cứu tập trung vào việc hiểu rõ phản ứng kết cấu của các dầm thành mỏng với các hình dạng mặt cắt ngang khác nhau, thông qua

phân tích tĩnh (dự đoán độ võng và ổn định uốn dưới các điều kiện tải trọng cơ học và nhiệt) và phân tích dao động (khảo sát tần số dao động cơ bản và các dạng dao động, đặc biệt là dạng xoắn của các dầm mặt cắt mở).

Dựa trên các mô hình dầm thành mỏng đã được phát triển trước đó, chẳng hạn như mô hình của Vlasov và lý thuyết dầm biến dạng trượt bậc nhất, luận án đã đề xuất một lý thuyết dầm biến dạng trượt bậc cao tổng quát phù hợp với dầm composite thành mỏng. Lý thuyết này có khả năng dự đoán tốt hơn các phản ứng của dầm có tỷ lệ chiều dài trên chiều sâu thấp.

Luận án cũng mở rộng đến phân tích ngẫu nhiên, trong đó xem xét sự ngẫu nhiên trong các tính chất vật liệu cấu thành. Một bộ giải dầm mới được phát triển sử dụng phương pháp xấp xỉ dạng chuỗi, kết hợp với khai triển hỗn loạn đa thức (PCE) và mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để đánh giá phản ứng ngẫu nhiên một cách hiệu quả. Kết quả phân tích, được chuẩn hóa với phương pháp Mô phỏng Monte Carlo (MCS), đã cung cấp những hiểu biết quan trọng về tác động của sự bất định vật liệu đối với các phản ứng ngẫu nhiên, từ đó trở thành các mốc tham chiếu giá trị cho cộng đồng khoa học và kỹ thuật.

Phân tích các hiệu ứng kích thước cũng được thực hiện bằng cách thay thế cơ học môi trường liên tục cổ điển bằng lý thuyết ứng suất cặp biến đổi. Các kết quả số cho thấy ảnh hưởng của sự phân bố vật liệu, tỷ lệ chiều dài trên chiều cao, và các tham số kích thước vật liệu đối với hành vi uốn và dao động của các vi dầm dưới các điều

kiện biên khác nhau. Vì dầm thể hiện hành vi cứng hơn nhiều so với dầm vĩ mô.

Trước khi thực hiện các phân tích này, mô hình lý thuyết và số học đã được kiểm chứng nghiêm ngặt, đảm bảo độ chính xác, hiệu quả và thời gian tính toán của mã phân tích. Kết quả của các nghiên cứu này không chỉ đóng góp về lý thuyết trong mô hình dầm thành mỏng mà còn thiết lập các kết quả so sánh cho các nghiên cứu khoa học và kỹ thuật trong tương lai.

6. Hướng nghiên cứu trong tương lai

Nghiên cứu sinh định hướng các nghiên cứu tương lai:

- Nghiên cứu tác động của môi trường nhiệt và độ ẩm lên các dầm thành mỏng composite với nhiều tiết diện mặt cắt kín.
- Thay thế phương pháp giải Ritz trong luận án bằng phương pháp hình học đồng nhất để đạt độ chính xác cao hơn và hiệu quả tính toán tốt hơn.
- Đánh giá các hiệu ứng phi tuyến hình học
- Nghiên cứu ảnh hưởng của các điều kiện tải động, bao gồm tải trọng di chuyển và tải trọng va chạm, lên hành vi của dầm thành mỏng.
- Áp dụng khai triển Karhunen-Loève để cải thiện hiệu quả và độ chính xác của phân tích ngẫu nhiên các dầm composite thành mỏng.

- Tăng cường độ chính xác của mô hình dự đoán bằng cách tối ưu hóa các siêu tham số trong ANN, bao gồm số lượng lớp, số nút trong mỗi lớp, và các tham số huấn luyện khác.

Tài liệu tham khảo

1. Bui, X.B., P.H. Ngo, and T.K. Nguyen, *A unified third-order shear deformation theory for static analysis of laminated composite beams*. Journal of Technical Education Science, 2019(55): p. 87-93
2. Bui, X.B., T.K. Nguyen, Q.C. Le, and T.T.P. Nguyen. *A novel two-variable model for bending analysis of laminated composite beams*. in *2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD)*. 2020.
3. Bui, X.-B., A.-C. Nguyen, N.-D. Nguyen, T.-T. Do, and T.-K. Nguyen, *Buckling analysis of laminated composite thin-walled I-beam under mechanical and thermal loads*. Vietnam Journal of Mechanics, 2023. 45(1): p. 75-90.<https://doi.org/10.15625/0866-7136/17956>
4. Bui, X.-B. and T.-K. Nguyen, *Deterministic and stochastic flexural behaviors of laminated composite thin-walled I-beams using a sinusoidal higher-order shear deformation theory*. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2023: p. 1-30.<https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2297840>
5. Bui, X.-B., T.-K. Nguyen, N.-D. Nguyen, and T.P. Vo, *A general higher-order shear deformation theory for buckling and free vibration analysis of laminated thin-walled composite I-beams*. Composite Structures, 2022. 295: p. 115775.<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115775>
6. Bui, X.-B., T.-K. Nguyen, and P.T.T. Nguyen, *Stochastic vibration and buckling analysis of functionally graded sandwich thin-walled beams*. Mechanics Based Design of

- Structures and Machines, 2023: p. 1-23.<https://doi.org/10.1080/15397734.2023.2165101>
7. Bui, X.-B., T.-K. Nguyen, T.T.-P. Nguyen, and V.-T. Nguyen. *Stochastic Vibration Responses of Laminated Composite Beams Based on a Quasi-3D Theory*. in *ICSCEA 2021*. 2023. Singapore: Springer Nature Singapore.
 8. Bui, X.-B., T.-K. Nguyen, A. Karamanli, and T.P. Vo, *Size-dependent behaviours of functionally graded sandwich thin-walled beams based on the modified couple stress theory*. *Aerospace Science and Technology*, 2023. **142**: p. 108664.<https://doi.org/10.1016/j.ast.2023.108664>
 9. Bui, X.-B., P.T.T. Nguyen, and T.-K. Nguyen, *Spectral projection and linear regression approaches for stochastic flexural and vibration analysis of laminated composite beams*. *Archive of Applied Mechanics*, 2024.<https://doi.org/10.1007/s00419-024-02565-x>
 10. Thostenson, E.T., Z. Ren, and T.-W. Chou, *Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review*. *Composites science and technology*, 2001. **61**(13): p. 1899-1912
 11. Gay, D., S.V. Hoa, and S.W. Tsai, *Composite Materials: Design and Applications*. 2002: CRC Press.
 12. Librescu, L. and O. Song, *Thin-walled composite beams: theory and application*. Vol. 131. 2005: Springer Science & Business Media.
 13. Vo, T.P., H.-T. Thai, T.-K. Nguyen, A. Maheri, and J. Lee, *Finite element model for vibration and buckling of functionally graded sandwich beams based on a refined shear deformation theory*. *Engineering Structures*, 2014. **64**: p. 12-22.<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.01.029>
 14. Nguyen, T.-K., N.-D. Nguyen, T.P. Vo, and H.-T. Thai, *Trigonometric-series solution for analysis of laminated composite beams*. *Composite Structures*, 2017. **160**: p. 142-151.<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.033>

15. Lee, J., *Flexural analysis of thin-walled composite beams using shear-deformable beam theory*. Composite Structures, 2005. **70**(2): p. 212-222
16. Lee, J. and S.-E. Kim, *Flexural–torsional buckling of thin-walled I-section composites*. Computers & Structures, 2001. **79**(10): p. 987-995.[https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(00\)00195-4](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00195-4)
17. Lee, J., S.E. Kim, and K. Hong, *Lateral buckling of I-section composite beams*. Engineering Structures, 2002. **24**(7): p. 955-964.[https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00016-0)
18. Lee, J. and S.-h. Lee, *Flexural–torsional behavior of thin-walled composite beams*. Thin-Walled Structures, 2004. **42**(9): p. 1293-1305.<https://doi.org/10.1016/j.tws.2004.03.015>
19. Ghane, M., A.R. Saidi, and R. Bahaadini, *Vibration of fluid-conveying nanotubes subjected to magnetic field based on the thin-walled Timoshenko beam theory*. Applied Mathematical Modelling, 2020. **80**: p. 65-83.<https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.11.034>
20. Xie, Y., J. Lei, S. Guo, S. Han, J. Ruan, and Y. He, *Size-dependent vibration of multi-scale sandwich micro-beams: An experimental study and theoretical analysis*. Thin-Walled Structures, 2022. **175**: p. 109115.<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109115>
21. Nguyen, N.-D., T.-K. Nguyen, H.-T. Thai, and T.P. Vo, *A Ritz type solution with exponential trial functions for laminated composite beams based on the modified couple stress theory*. Composite Structures, 2018. **191**: p. 154-167.<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.025>
22. Liviu Librescu, O.S., *Thin-Walled Composite Beams*. Solid Mechanics and Its Applications. 2006: Springer Dordrecht.
23. Vlasov, V.Z., *Thin-walled elastic beams*. 1961, Published for the National Science Foundation, Washington, D.C., by the Israel Program for Scientific Translations Jerusalem: Jerusalem

24. Szabados, T., *An elementary introduction to the Wiener process and stochastic integrals*. Studia Scientiarum Mathematicarum Hungarica, 2010. **31**
25. Andrews, G.E. and R. Askey. *Classical orthogonal polynomials*. in *Polynômes Orthogonaux et Applications*. 1985. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
26. Shen, D., H. Wu, B. Xia, and D. Gan, *Polynomial Chaos Expansion for Parametric Problems in Engineering Systems: A Review*. IEEE Systems Journal, 2020. **14**(3): p. 4500-4514.10.1109/JSYST.2019.2957664
27. Hadigol, M. and A. Doostan, *Least squares polynomial chaos expansion: A review of sampling strategies*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2018. **332**: p. 382-407.<https://doi.org/10.1016/j.cma.2017.12.019>
28. Lüthen, N., S. Marelli, and B. Sudret, *Sparse Polynomial Chaos Expansions: Literature Survey and Benchmark*. SIAM/ASA Journal on Uncertainty Quantification, 2021. **9**(2): p. 593-649.10.1137/20M1315774
29. Susac, F., E.F. Beznea, and N. Baroiu. *Artificial neural network applied to prediction of buckling behavior of the thin walled box*. in *Advanced Engineering Forum*. 2017. Trans Tech Publ.
30. Jeon, J., J. Kim, J.J. Lee, D. Shin, and Y.Y. Kim, *Development of deep learning-based joint elements for thin-walled beam structures*. Computers & Structures, 2022. **260**: p. 106714
31. Torregrosa, A., A. Gil, P. Quintero, and A. Cremades, *A reduced order model based on artificial neural networks for nonlinear aeroelastic phenomena and application to composite material beams*. Composite Structures, 2022. **295**: p. 115845