

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ TP.HCM



**TRẦN THANH NHÀN**

**THIẾT KẾ TỐI ƯU TRỌNG LƯỢNG DẦM  
COMPOSITE CÓ XÉT BIẾN THIẾT KẾ PHẦN  
TRĂM THỂ TÍCH VẬT LIỆU NỀN VÀ SỢI**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ**

Chuyên ngành: Kỹ Thuật Xây Dựng

Mã ngành : 60580208

TP. HỒ CHÍ MINH, tháng 8 năm 2016

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ TP. HCM



**TRẦN THANH NHÀN**

**THIẾT KẾ TỐI ƯU TRỌNG LƯỢNG DẦM  
COMPOSITE CÓ XÉT BIẾN THIẾT KẾ PHẦN  
TRĂM THỂ TÍCH VẬT LIỆU NỀN VÀ SỢI**

**LUẬN VĂN THẠC SĨ**

Chuyên ngành: Kỹ Thuật Xây Dựng

Mã ngành : 60580208

**CÁN BỘ HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: PGS.TS NGUYỄN THỜI TRUNG**

TP. HỒ CHÍ MINH, tháng 8 năm 2016

**CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ TP. HCM**

Cán bộ hướng dẫn khoa học : **PGS.TS NGUYỄN THỜI TRUNG**

Luận văn Thạc sĩ được bảo vệ tại Trường Đại học Công nghệ TP. HCM  
ngày 27 tháng 08 năm 2016

Thành phần Hội đồng đánh giá Luận văn Thạc sĩ gồm:

<b>TT</b>	<b>Họ và tên</b>	<b>Chức danh Hội đồng</b>
1	<b>TS. Khổng Trọng Toàn</b>	Chủ tịch
2	<b>TS. Nguyễn Văn Giang</b>	Phản biện 1
3	<b>TS. Nguyễn Hồng Ân</b>	Phản biện 2
4	<b>PGS. TS. Dương Hồng Thắm</b>	Ủy viên
5	<b>TS. Phan Tá Lệ</b>	Ủy viên, Thư ký

Xác nhận của Chủ tịch Hội đồng đánh giá Luận văn sau khi Luận văn đã được  
sửa chữa (nếu có).

**Chủ tịch Hội đồng đánh giá LV**

TRƯỜNG ĐH CÔNG NGHỆ TP. HCM CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM

PHÒNG QLKH – ĐTSDH

Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

*TP. HCM, ngày 23 tháng 01 năm 2016*

## NHIỆM VỤ LUẬN VĂN THẠC SĨ

Họ tên học viên: Trần Thanh Nhân

Giới tính: Nam

Ngày, tháng, năm sinh: 15/5/1979

Nơi sinh: Tp. HCM

Chuyên ngành: Kỹ thuật xây dựng

MSHV: 1441870009

**I- Tên đề tài:** Thiết kế tối ưu trọng lượng dầm composite có xét biến thiết kế phần trăm thể tích vật liệu nền và sợi.

### **II- Nhiệm vụ và nội dung:**

- Phân tích, lập trình tính toán ứng xử kết cấu dầm composite bằng phương pháp phần tử hữu hạn;
- Thành lập bài toán tối ưu hóa trọng lượng dầm composite có xét biến thiết kế phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi và chiều dày của các lớp;
- Sử dụng giải thuật tiến hóa DE và DE cải tiến (aeDE) để giải các bài toán tối ưu sau khi thành lập;
- So sánh đánh giá các kết quả tối đạt được với các kết quả đã được công bố trước đó. Từ đó đánh giá độ tin cậy và tính hiệu quả của cách tiếp cận đề xuất trong luận văn.

**III- Ngày giao nhiệm vụ:** 23/01/2016

**IV- Ngày hoàn thành nhiệm vụ:** 30/7/2016

**V- Cán bộ hướng dẫn:** PGS.TS NGUYỄN THỜI TRUNG

**CÁN BỘ HƯỚNG DẪN**

(Họ tên và chữ ký)

**KHOA QUẢN LÝ CHUYÊN NGÀNH**

(Họ tên và chữ ký)

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong Luận văn là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tôi xin cam đoan rằng mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện Luận văn này đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong Luận văn đã được chỉ rõ nguồn gốc.

**Học viên thực hiện**

**Trần Thanh Nhân**

## LỜI CẢM ƠN

Đầu tiên, tôi xin được gửi lời cảm ơn đến bố, mẹ và các thành viên trong gia đình đã luôn ủng hộ và tạo điều kiện vật chất và tinh thần để tôi có được những thuận lợi nhất trong suốt khoá học vừa qua.

Tôi xin gửi lời cảm ơn đến Quý Thầy Cô khoa Xây dựng, Trường đại học công nghệ TPHCM. Các Thầy cô đã cho tôi động lực và kinh nghiệm nghiên cứu giá trị trong suốt thời gian qua. Và đặc biệt, tôi không thể hoàn thành luận văn này nếu không có sự giúp đỡ, hướng dẫn tận tình của thầy PGS.TS.Nguyễn Thời Trung, tôi đã rất may mắn khi được Thầy đồng ý hướng dẫn thực hiện luận văn. Thầy không chỉ truyền đạt cho tôi kiến thức cơ bản mà còn truyền đạt cả niềm đam mê trong công việc và cuộc sống. Tôi sẽ luôn trân trọng những kiến thức cũng như những lời khuyên quý báu của thầy.

Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn chân thành nhất đến các bạn nghiên cứu viên của Viện Khoa học Tính toán, Trường Đại học Tôn Đức Thắng, đã hết lòng chia sẻ và giúp đỡ tôi trong suốt quá trình làm luận văn. Đặc biệt là sự hỗ trợ tận tình của ThS. Hồ Hữu Vĩnh. Xin được chân thành cảm ơn các bạn.

*Tp.HCM, ngày 25 tháng 7 năm 2016*

**Học viên thực hiện**

**Trần Thanh Nhân**

## TÓM TẮT

Luận văn được thực hiện nhằm giải bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm composite trong môi trường dao động tự do với nhiều điều kiện biên thiết kế khác nhau. Bài toán tối ưu được thành lập với hàm mục tiêu là cực tiểu trọng lượng của kết cấu dầm. Biến thiết kế là phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi và chiều dày của các lớp, trong đó biến phần trăm thể tích là biến liên tục và biến chiều dày là biến rời rạc. Ràng buộc của bài toán là tần số dao động đầu tiên của dầm phải lớn hơn một giá trị cho trước nhằm giúp kết cấu tránh được những vùng cộng hưởng. Để giải bài toán tối ưu đặt ra, một tiếp cận số gồm hai phương pháp: phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp tối ưu hóa (giải thuật tiến hóa DE và giải thuật cải tiến aeDE) được sử dụng. Trong đó, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để phân tích ứng xử của kết cấu dầm, và giải thuật tối ưu hóa DE và aeDE được sử dụng để giải bài toán tối ưu. Bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm với nhiều ngữ cảnh thiết kế khác nhau đã được khảo sát. Hiệu quả cũng như độ tin cậy của cách tiếp cận đề xuất được đánh giá thông qua việc so sánh kết quả tối ưu đạt được với các kết quả đã được nghiên cứu trước đó.

**Từ khóa:** *kết cấu dầm composite, phương pháp phần tử hữu hạn, giải thuật tiến hóa DE, giải thuật tiến hóa cải tiến aeDE, tối ưu hóa kết cấu.*

## ABSTRACT

This thesis aims to solve the optimization problem of composite beam structures in the scope of free vibration with various boundary conditions. The optimization problem is established with the objective function that is to minimize the weight of the composite beams. Design variables are the percentage of the volume of matrix and fibre materials and the thickness of the layers, where the percentage of the volume of matrix and fibre materials are continuous variables and the thickness of the layers are discrete variables. The constraint of the problem is that the first frequency of the beam must be greater than a given value which it aims to help the structures avoid resonance regions. To solve the formed optimization problem, a numerical approach consists of two methods: the finite element method and the differential evolution (DE) and its new variant (aeDE) are applied. In this approach, the finite element method is used to analyze the structural behavior of beams and establish the optimization problems; and the DE and aeDE are used to solve the optimization problems. The optimization problem of structural beams with various design contexts are investigated. The effectiveness as well as reliability of the proposed approach are evaluated through comparison of obtained optimal results with those gained by previous studies.

**Keywords:** *composite beam structures, finite element method, differential evolution, adaptive elitist differential evolution.*



## MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN.....	ii
TÓM TẮT.....	iii
MỤC LỤC.....	v
DANH MỤC HÌNH VẼ.....	vii
DANH MỤC BẢNG BIỂU.....	ix
Chương 1 <b>TỔNG QUAN</b> .....	1
1.1. Giới thiệu và đặt vấn đề.....	1
1.2. Tính cấp thiết của đề tài.....	5
1.3. Mục tiêu nghiên cứu.....	5
1.4. Đối tượng nghiên cứu.....	6
1.5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn.....	6
1.6. Tình hình nghiên cứu trên thế giới.....	6
1.7. Tình hình nghiên cứu trong nước.....	7
Chương 2 <b>CƠ SỞ LÝ THUYẾT</b> .....	9
2.1. Vật liệu composite.....	9
2.1.1. Tổng quan về vật liệu composite.....	9
2.1.2. Quan hệ ứng suất – biến dạng.....	12
2.2. Lý thuyết dầm composite.....	13
2.2.1. Phương trình dao động của dầm composite.....	13
2.2.2. Phân tích dao động tự do của dầm composite dựa trên lý thuyết dầm Euler-Becnoulli.....	15
2.2.3. Phương pháp phần tử hữu hạn cho dầm composite dựa trên lý thuyết dầm Euler-Becnoulli.....	16
2.2.4. Dạng yếu của phương trình dao động dầm composite.....	21
2.3. Lý thuyết tối ưu hóa.....	22
2.3.1. Tổng quan về tối ưu hóa.....	22
2.3.2. Tổng quan về bài toán tối ưu hóa.....	23
2.3.3. Thành lập bài toán tối ưu hóa kết cấu dầm composite.....	24
2.4. Giải thuật tiến hóa DE (Differential Evolution).....	25
2.4.1. Quá trình tạo bộ dân số ban đầu.....	26
2.4.2. Quá trình đột biến.....	26
2.4.3. Quá trình lai tạo.....	28
2.4.4. Quá trình lựa chọn.....	28

2.4.5. Sơ đồ giải thuật của DE .....	29
2.4.6. Giải thuật DE cải tiến.....	30
2.4.7. Xử lý biến thiết kế rời rạc .....	33
Chương 3      KẾT QUẢ SỐ .....	35
3.1. So sánh kết quả phân tích ứng xử của dầm composite .....	36
3.2. Thiết kế tối ưu chỉ với biến thiết kế $r_f$ .....	41
3.2.1. Dầm composite với góc hướng sợi [0/90/45/-45]s .....	41
3.2.2. Dầm composite với góc hướng sợi [45/0/90/-45]s .....	49
3.3. Thiết kế tối ưu với biến $r_f$ và biến chiều dày $t_f$ đồng thời.....	58
3.3.1. Dầm composite với góc hướng sợi [0/90/45/-45]s .....	59
3.2.2. Dầm composite với góc hướng sợi [45/0/90/-45]s .....	65
Chương 4      KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN .....	73
4.1. Kết luận .....	73
4.2. Hướng phát triển của đề tài .....	75
TÀI LIỆU THAM KHẢO .....	76
PHỤ LỤC .....	80

## DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Máy bay huấn luyện L-15 Liệp Ưng (Falcon) của Trung Quốc .....	1
Hình 1.2. Tàu đánh cá VIJAS Research & Training Vessel và tàu khách SM-300P.....	2
Hình 1.3. Khung xe đạp và ống tupe dùng trong công nghiệp bằng vật liệu composite. (Nguồn internet). .....	2
Hình 1.4. Vật liệu composite sử dụng trong các kết dầm ngành xây dựng. (Nguồn internet).....	2
Hình 1.5. Vật liệu composite sử dụng trong các kết cấu khung ngành xây dựng. (Nguồn internet).....	3
Hình 2.1. Mô hình vật liệu Composite .....	9
Hình 2.2. Phân bố các pha trong vật liệu Composite .....	10
Hình 2.3. Cấu trúc composite nhiều lớp.....	10
Hình 2.4. Hệ trục chính và hệ trục qui chiếu của vật liệu .....	11
Hình 2.5. Diện tích mặt cắt ngang của một phần tử dầm composite.....	14
Hình 2.6. Chuyển vị và góc xoay của dầm trước và sau khi biến dạng. ....	15
Hình 2.7. Phần tử dầm Euler-Bernoulli hai nút.....	16
Hình 2.8. Các hàm dạng Hermitian của phần tử dầm Euler- Bernoulli. ....	19
Hình 2.9. Mô tả kết quả của một bài toán tối ưu hóa, với $\mathbf{x}^*$ là lời giải tối ưu. ....	24
Hình 2.10. Tỷ lệ phần trăm thể tích cực đại theo cách sắp xếp cốt sợi. ....	25
Hình 2.11. Quá trình xử lý của giải thuật DE.....	26
Hình 2.12. Cơ chế đột biến của giải thuật DE khi sử dụng toán tử đột biến rand/1. ....	27
Hình 2.13. Cơ chế tạo véc-tơ thử nghiệm. ....	28
Hình 2.14. Mô tả quá trình lựa chọn. ....	29
Hình 2.15. Sơ đồ giải thuật DE. ....	30
Hình 2.16. Mô tả quá trình lựa chọn trội.....	33
Hình 3.1. Dạng dao động của 4 mode đầu tiên của dầm tựa đơn hai đầu. ....	37
Hình 3.2. Dạng dao động của 4 mode đầu tiên của dầm ngàm hai đầu. ....	38
Hình 3.3. Dạng dao động của 4 mode đầu tiên của dầm một đầu ngàm và một đầu tự do. .....	39
Hình 3.4. Dạng dao động của 4 mode đầu tiên của dầm một đầu ngàm và một đầu tự do. .	40

Hình 3.5. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán tựa đơn hai đầu).....	46
Hình 3.6. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán ngầm hai đầu). .....	47
Hình 3.7. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tự do).....	48
Hình 3.8. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tựa đơn).....	49
Hình 3.9. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán tựa đơn hai đầu).....	55
Hình 3.10. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán ngầm hai đầu). .....	56
Hình 3.11. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tự do).....	57
Hình 3.12. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tựa đơn).....	58
Hình 3.13. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán tựa đơn hai đầu). .....	62
Hình 3.14. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán ngầm hai đầu). .....	63
Hình 3.15. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tự do).....	64
Hình 3.16. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tựa đơn).....	65
Hình 3.17. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán tựa đơn hai đầu). .....	69
Hình 3.18. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán ngầm hai đầu). .....	70
Hình 3.19. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tự do).....	71
Hình 3.20. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tựa đơn).....	72

**DANH MỤC BẢNG BIỂU**

Bảng 3.1. Kết quả phân tích dầm với các điều kiện biên khác nhau. ....	36
Bảng 3.2. Kết quả thống kê đạt được bởi phương pháp DE và aeDE. ....	42
Bảng 3.3. Kết quả tối ưu của bài toán đạt được bởi phương pháp DE, aeDE và Liu [11].	44
Bảng 3.4. Kết quả thống kê đạt được bởi phương pháp DE và aeDE. ....	51
Bảng 3.5. Kết quả tối ưu của bài toán đạt được bởi phương pháp DE, aeDE và Liu [11].	53
Bảng 3.6. Kết quả tối ưu của bài toán đạt được bởi phương pháp DE, aeDE và Liu [11].	60
Bảng 3.7. Kết quả tối ưu của bài toán đạt được bởi phương pháp DE, aeDE và Liu [11].	67

## Chương 1

## TỔNG QUAN

### 1.1. Giới thiệu và đặt vấn đề

Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của các ngành công nghiệp và khoa học kỹ thuật là sự khan hiếm dần các nguồn nguyên liệu có sẵn trong tự nhiên. Ngoài ra, với sự phát triển mạnh mẽ của khoa học kỹ thuật, vật liệu tự nhiên sẽ được thay thế dần bởi các vật liệu nhân tạo. Các loại vật liệu mới bên cạnh việc đảm bảo các nhu cầu sử dụng còn phải đảm bảo các tiêu chí như: độ bền, nhẹ, có giá cả hợp lý, v.v. Trước các yêu cầu như trên, việc nghiên cứu phát triển các loại vật liệu tổ hợp hay còn gọi là vật liệu composite nhằm thay thế nguồn nguyên vật liệu truyền thống và đáp ứng được nhu cầu phát triển ngày càng trở nên cấp thiết.

Theo lịch sử phát triển, khoảng 5000 năm trước công nguyên con người đã biết trộn những viên đá nhỏ vào đất trước khi làm gạch để tránh bị cong vênh khi phơi nắng. Người Hy Lạp cổ cũng sử dụng mật ong trộn với đất, đá, cát sỏi làm vật liệu xây dựng, v.v. Đến những năm 1950, cùng với sự phát triển mạnh mẽ của ngành công nghệ chế tạo tên lửa ở Mỹ, ngành khoa học vật liệu composite được hình thành. Từ đó đến nay, ngành khoa học công nghệ vật liệu composite đã phát triển trên toàn thế giới và được ứng dụng rộng rãi trong hầu hết các ngành công nghiệp chế tạo. Một số ứng dụng vật liệu composite có thể kể đến như: ứng dụng trong công nghiệp hàng không (Hình 1.1), ứng dụng trong ngành công nghiệp tàu thủy (Hình 1.2) và công nghiệp chế tạo ống tupe dùng cho sản xuất khung xe đạp (Hình 1.3), và đặc biệt là trong các kết cấu xây dựng như: dầm, khung, tấm, vỏ, v.v (Hình 1.4, Hình 1.5).



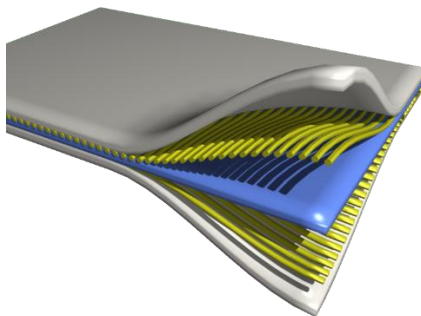
Hình 1.1. Máy bay huấn luyện L-15 Liệp Ưng (Falcon) của Trung Quốc  
(Nguồn internet).



Hình 1.2. Tàu đánh cá VIJAS Research & Training Vessel và tàu khách SM-300P  
(Nguồn internet).



Hình 1.3. Khung xe đạp và ống tupe dùng trong công nghiệp bằng vật liệu composite.  
(Nguồn internet).



Hình 1.4. Vật liệu composite sử dụng trong các kết dầm ngành xây dựng. (Nguồn internet).



Hình 1.5. Vật liệu composite sử dụng trong các kết cấu khung ngành xây dựng.

(Nguồn internet).

Từ năm 1970 đến nay, các chi tiết chế tạo từ composite cốt sợi đã được ứng dụng hầu hết trong các ngành công nghiệp, vật liệu xây dựng và các ngành kỹ thuật cao. Mặc dù vậy, việc nghiên cứu để nâng cao chất lượng, cải thiện các đặc tính cơ học, tính chất nhiệt, điện, v.v, mở rộng lĩnh vực ứng dụng của vật liệu này vẫn luôn được phát triển không ngừng.

Ở nước ta, việc sản xuất và ứng dụng vật liệu composite đã phát triển đáng kể trong những năm gần đây, tuy nhiên vẫn chưa xứng tầm với các điều kiện thuận lợi mà chúng ta đang có như nguồn tài nguyên, nhân công, v.v. Trong lĩnh vực xây dựng, đã có nhiều công ty sử dụng các loại kết cấu được chế tạo từ vật liệu composite. Tuy nhiên, những sản phẩm này chủ yếu được nhập khẩu từ Trung Quốc và Đài Loan. Do đó, khi có các hư hỏng hay sự cố xảy ra đối với các sản phẩm này thì việc khắc phục và sửa chữa còn gặp nhiều hạn chế. Hơn nữa, việc nghiên cứu tạo ra những sản phẩm với giá thành thấp cũng sẽ gặp nhiều khó khăn. Xuất phát từ tình hình thực tế đó, tác giả thấy rằng việc nghiên cứu tìm hiểu các thuộc tính cơ học của vật liệu composite và phân tích ứng xử cơ học của các kết cấu được làm từ vật liệu composite là thực sự cần thiết.

Thực tế, để tăng khả năng cạnh tranh cho các dự án của mình khi đấu thầu, nhà đầu tư cũng như các kỹ sư thiết kế luôn mong muốn tìm ra những phương án thiết kế tối ưu nhất cho các công trình thiết kế của mình. Tuy nhiên, đây không phải là công việc dễ dàng đối với các chủ đầu tư và người kỹ sư thiết kế. Vì việc giải các bài toán tối ưu luôn



đòi hỏi họ phải nắm vững các phương pháp tính toán như: phương pháp phần tử hữu hạn (PP-PTHH) để phân tích kết cấu, phương pháp tối ưu hóa để giải bài toán tối ưu hóa, v.v. Thông thường, các kỹ sư thường dựa trên kinh nghiệm của mình để đưa ra một sản phẩm thiết kế. Do đó kết quả thiết kế có thể bị lãng phí hoặc có thể không đảm bảo an toàn khi sử dụng. Vì vậy việc đưa ra những phương pháp thiết kế tối ưu dựa trên các cơ sở toán học bằng cách thành lập và giải các bài toán tối ưu hóa cho kết cấu thực sự cần thiết. Bằng cách này, khi thiết kế người kỹ sư sẽ chọn được những sản phẩm thiết kế vừa đảm bảo tiết kiệm vừa đảm bảo an toàn cho kết cấu.

Trong những năm gần đây, do nhu cầu an sinh xã hội ngày càng cao, trong khi diện tích đất thì hạn chế. Do đó các công trình xây dựng thường được mở rộng bằng cách nâng tầng. Tuy nhiên, khi mở rộng bằng cách nâng tầng công trình sẽ chịu một tải trọng rất lớn dẫn đến những hạn chế nhất định và kinh phí xây dựng sẽ rất lớn. Vì vậy để giảm tải cho các công trình, các kết cấu được làm từ các vật liệu truyền thống sẽ dần được thay thế bởi các kết cấu được làm từ các vật liệu mới nhẹ và bền hơn, trong đó phổ biến nhất là vật liệu composite. Ở hầu hết các hạng mục công trình, dầm là một trong những kết cấu được sử dụng rất phổ biến. Vì vậy, để tăng khả năng chịu lực và giảm tải trọng công trình, việc thay thế các kết cấu dầm truyền thống bằng các kết cấu dầm composite là một trong những phương án được sử dụng phổ biến hiện nay. Tuy nhiên, composite là một loại vật liệu có nhiều tính chất cơ lý phức tạp do nó được tổ hợp từ hai hay nhiều loại vật liệu khác nhau. Có rất nhiều thông số khác nhau trong vật liệu composite như: thành phần vật liệu, phần trăm thể tích giữa nền và sợi, chiều dày các lớp, góc hướng sợi, v.v, ảnh hưởng trực tiếp lên ứng xử cơ học của kết cấu. Việc điều chỉnh những thông số này sẽ tác động trực tiếp đến ứng xử cơ học và khả năng chịu lực của kết cấu được làm từ vật liệu composite. Vì vậy, việc nghiên cứu các thuộc tính cơ học, phân tích và tính toán tối ưu cho kết cấu làm từ vật liệu composite thực sự là cần thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn nhất định.

Với những đặc điểm được phân tích ở trên, trong luận văn này, tác giả chọn đề tài: ***"Thiết kế tối ưu trọng lượng dầm composite có xét biến thiết kế phần trăm thể tích vật liệu nền và sợi"*** để nghiên cứu. Nghiên cứu nhằm thực hiện các mục đích sau:

- 1) Tìm hiểu đặc tính cơ học của vật liệu composite lớp được gia cường bởi cốt sợi;
- 2) Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PP-PTHH) để phân tích ứng xử cơ học của kết cấu dầm được làm từ vật liệu composite lớp gia cường bởi cốt sợi;

3) Nghiên cứu thành lập và giải bài toán thiết kế tối ưu cho kết cấu dầm composite nhằm tìm ra những thông số thiết kế tối ưu (gồm có phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi và chiều dày của các lớp) cho kết cấu dầm với những điều kiện sử dụng khác nhau.

Để thực hiện các mục đích nghiên cứu ở trên, luận văn sẽ sử dụng một số lý thuyết tính toán bao gồm:

1) Phương pháp phần tử hữu hạn dựa trên lý thuyết dầm Euler-Bernoulli để phân tích ứng xử cơ học của kết cấu dầm composite;

2) Lý thuyết tối ưu hóa để thành lập bài toán thiết kế tối ưu cho kết cấu dầm composite;

3) Sử dụng giải thuật tối ưu - giải thuật hóa tiến hóa DE (Differential Evolution) cải tiến để giải bài toán tối ưu nhằm xác định những thông số thiết kế tối ưu cho kết cấu dầm ở những điều kiện sử dụng khác nhau.

## **1.2. Tính cấp thiết của đề tài**

Trong tất cả các hạng mục của mỗi công trình xây dựng dầm là một trong những kết cấu được sử dụng phổ biến nhất. Vì vậy, việc tính toán, thiết kế tối ưu trọng lượng của kết cấu dầm sẽ làm giảm đáng kể tổng trọng lượng của công trình và góp phần tiết kiệm đáng kể kinh phí xây dựng. Trong những năm gần đây, để giảm tải trọng công trình, bên cạnh việc thiết kế tối ưu trọng lượng, thì việc thay thế các kết cấu dầm truyền thống bằng các kết cấu dầm composite cũng được sử dụng phổ biến. Tuy nhiên, ứng xử của kết cấu dầm composite thường phức tạp hơn so với kết cấu dầm truyền thống. Vì vậy, việc phát triển các công cụ tính toán, thiết kế tối ưu cho các kết cấu dầm composite thực sự là cần thiết và nhận được nhiều sự quan tâm từ các nhà khoa học. Từ những yêu cầu thực tế đặt ra, luận văn được thực hiện nhằm góp phần phát triển các công cụ tính toán thiết kế tối ưu cho kết cấu dầm composite.

## **1.3. Mục tiêu nghiên cứu**

Đề tài tập trung nghiên cứu, thành lập và giải bài toán thiết kế tối ưu trọng lượng của kết cấu dầm composite. Bên cạnh các biến thiết kế truyền thống như: góc hướng sợi, chiều dày của các lớp, trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của tỉ lệ phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi lên mục tiêu thiết kế cũng được xem xét. Để giải bài toán tối ưu hóa

đặt ra, phương pháp phân tử hữu hạn (PP-PTHH) dựa trên lý thuyết dầm Euler-Bernoulli và giải thuật tiến hóa DE cải tiến được sử dụng. Trong đó, PP-PTHH được sử dụng để phân tích ứng xử cho kết cấu dầm và giải thuật tối ưu hóa DE cải tiến được sử dụng để giải bài toán tối ưu hóa.

#### **1.4. Đối tượng nghiên cứu**

Đối tượng nghiên cứu trong luận văn này là kết cấu dầm composite lớp được gia cường bởi cốt sợi. Bài toán tối ưu hóa trọng lượng với biến thiết kế là phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi và chiều dày của các lớp.

#### **1.5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn**

Tính toán, thiết kế tối ưu hóa trọng lượng của kết cấu trong lĩnh vực xây dựng nói chung và của kết cấu dầm nói riêng luôn là yếu tố quan trọng, quyết định đến sự thành công của doanh nghiệp cũng như tiết kiệm đáng kể nguồn tài nguyên của quốc gia. Tuy nhiên, thực tế hiện tại các kỹ sư thiết kế vẫn chủ yếu đang tính toán thiết kế dựa trên những kinh nghiệm của mình. Vì vậy, luận văn khi hoàn thành sẽ là một tài liệu tham khảo có ích cho các kỹ sư thiết kế. Nó sẽ cung cấp cho họ một cái nhìn mới đầy đủ về bài toán thiết kế tối ưu hóa trọng lượng cho kết cấu dầm composite. Từ đó giúp họ thành lập và giải bài toán thiết kế một cách tối ưu cho kết cấu dầm composite.

#### **1.6. Tình hình nghiên cứu trên thế giới**

Trong những năm gần đây, nhờ những ưu điểm vượt trội của tính toán tối ưu, hoạt động nghiên cứu tối ưu hóa cho kết cấu dầm composite luôn nhận được sự quan tâm của nhiều nhà khoa học trên thế giới. Nhiều cách tiếp cận cũng như nhiều phương pháp tối ưu hóa khác nhau đã được đề xuất để giải bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm. Một số công trình nghiên cứu tiêu biểu có thể kể đến như: Cardoso và Valido [1,2], Sedaghati và cộng sự [3], Blasques [4], Hamdaoui và cộng sự [5], Murugan và cộng sự [6], Suresh và cộng sự [7], Valido và Cardoso [8], Neto và cộng sự [9], Kathiravan và Ganguli [10].

Hầu hết các nghiên cứu ở trên đều tập trung phát triển các giải thuật tối ưu dựa trên thông tin đạo hàm để thiết kế tối ưu hóa cho kết cấu dầm composite với hàm mục tiêu có thể là trọng lượng của kết cấu dầm hoặc năng lượng biến dạng của dầm. Biến thiết kế được xem xét có thể là góc hướng sợi hoặc chiều dày của các lớp. Mặc dù đã có rất

nhiều nghiên cứu tối ưu cho kết cấu dầm composite, tuy nhiên việc thiết kế tối ưu cho kết cấu dầm composite với biến thiết kế phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi vẫn còn hạn chế và chưa được nghiên cứu nhiều.

Gần đây, Liu [11] thực hiện nghiên cứu thiết kế tối ưu trọng lượng kết cấu dầm với biến thiết kế phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi. Tuy nhiên, nghiên cứu của Liu [11] còn nhiều hạn chế như:

- 1) Tác giả chỉ xét đến biến phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi, không xét đến biến chiều dày trong khi đó chiều dày ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử và trọng lượng của kết cấu;
- 2) Phương pháp sử dụng để phân tích ứng xử kết cấu dầm là phương pháp giải tích nên còn gặp nhiều hạn chế khi mở rộng cho các bài toán với điều kiện biên phức tạp;
- 3) Tác giả sử dụng phương pháp tối ưu dựa trên thông tin đạo hàm nên kết quả tối ưu thường kẹt ở nghiệm địa phương và rất khó để mở rộng cho bài toán tối ưu khi xét biến chiều dày là những giá trị thiết kế rời rạc.

Vì vậy với việc thực hiện đề tài, luận văn có thể được xem là một nghiên cứu mở rộng của các nghiên cứu ở trên, đặc biệt là sự mở rộng và khắc phục được những hạn chế trong nghiên cứu của Liu [11].

### **1.7. Tình hình nghiên cứu trong nước**

Hiện nay, trong nước có rất nhiều công trình nghiên cứu về vật liệu composite. Tuy nhiên, các đề tài chủ yếu nghiên cứu về độ bền cơ học, về các phương pháp tạo sợi từ tự nhiên, về các quy luật ứng xử của vật liệu composite, cải thiện cơ tính đối với vật liệu composite bằng các phương pháp như: gia cường cho vật liệu, thay đổi thành phần nền hay cốt. Trong khi các nghiên cứu tính toán thiết kế tối ưu cho các kết cấu làm bằng vật liệu composite vẫn còn nhiều hạn chế, đặc biệt là kết cấu dầm composite. Một vài nghiên cứu liên quan đến kết cấu vật liệu composite có thể được kể đến như: nghiên cứu về chuẩn đoán hư hỏng của kết cấu dầm composite của tác giả Võ Duy Trung và cộng sự [12]; nghiên cứu tối ưu cho kết cấu tấm composite của tác giả Trần Văn Dân [13]; nghiên cứu thiết kế tối ưu dựa trên độ tin cậy cho kết cấu tấm của tác giả Nguyễn Viết Cường [14]. Theo quan sát của tác giả cho đến thời điểm hiện tại, chưa có nghiên cứu về thiết kế tối ưu trọng lượng cho kết cấu dầm composite có xét đến biến thiết kế phần trăm thể tích vật liệu nền và sợi.

Vì vậy, luận văn có những điểm mới và ý nghĩa nhất định. Góp phần vào việc phát triển những công cụ tính toán mới cho việc thiết kế tối ưu cho kết cấu dầm composite.

## Chương 2

## CƠ SỞ LÝ THUYẾT

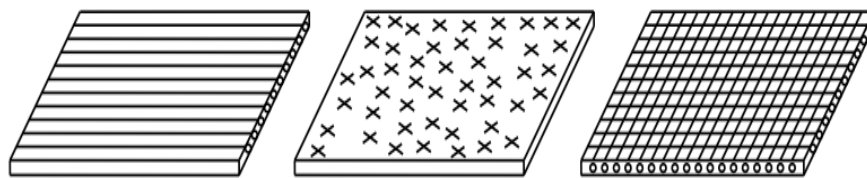
Để thực hiện các mục tiêu đã đề ra ở Chương 1, trong chương này các lý thuyết liên quan đến đề tài sẽ được trình bày. Các lý thuyết bao gồm: giới thiệu tổng quan về vật liệu composite; phương pháp phần tử hữu hạn cho dầm composite dựa trên lý thuyết dầm Euler-Bernoulli; lý thuyết tối ưu hóa và giải thuật tiến hóa DE và những cải tiến của nó sẽ lần lượt được trình bày.

### 2.1. Vật liệu composite

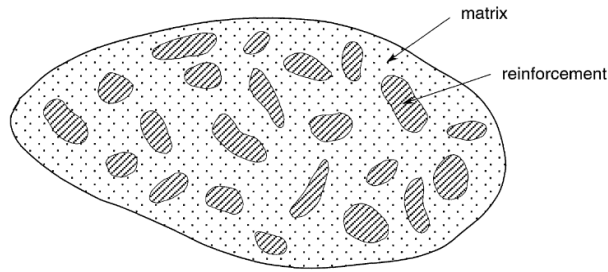
#### 2.1.1. Tổng quan về vật liệu composite

Vật liệu composite đã được nghiên cứu khá nhiều trong những năm gần đây. Trong giới hạn của luận văn này, tác giả chỉ trình bày những vấn đề cơ bản có liên quan đến nội dung của luận văn, các vấn đề cụ thể hơn được trình bày chi tiết trong các tài liệu [15–17].

Vật liệu composite như được mô tả ở Hình 2.1 là một loại vật liệu được tổ hợp từ hai loại vật liệu có bản chất khác nhau, vật liệu tạo thành có đặc tính trội hơn đặc tính của từng loại vật liệu thành phần khi xét riêng lẻ. Trong trường hợp tổng quát nhất, vật liệu composite gồm một hay nhiều pha gián đoạn được phân bố trong một pha liên tục như được thể hiện ở Hình 2.2. Khi vật liệu gồm nhiều pha gián đoạn ta gọi đó là composite hỗn tạp. Pha gián đoạn được gọi là nền (Matrix) và pha liên tục được gọi là cốt hay vật liệu tăng cường (Reinforcement). Thông thường, pha liên tục có cơ tính trội hơn pha gián đoạn



Hình 2.1. Mô hình vật liệu Composite.

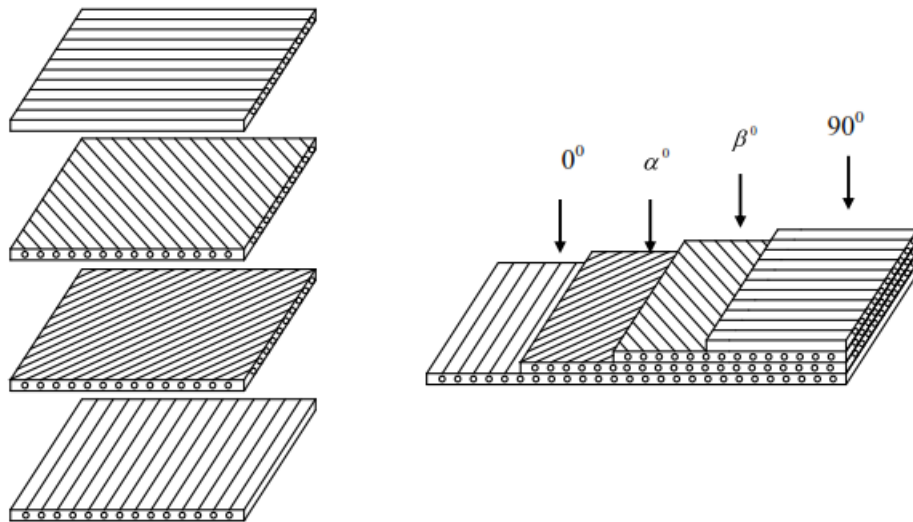


Hình 2.2. Phân bố các pha trong vật liệu Composite.

Dựa vào tính chất cơ học, vật liệu composite được phân thành 3 nhóm chính gồm:

- 1) Composite đẳng hướng: sợi vụn phân bố ngẫu nhiên theo cả ba phương  $x, y, z$ ;
- 2) Composite đẳng hướng ngang: composite gồm nhiều lớp “mat” hoặc composite nhiều lớp sợi đồng phương;
- 3) Composite trục hướng: composite gồm nhiều lớp đồng phương xếp vuông góc hoặc composite nhiều lớp cốt vải, v.v.

Vật liệu composite gồm nhiều lớp liên tục gọi là composite nhiều lớp (Hình 2.3).



Hình 2.3. Cấu trúc composite nhiều lớp.

Dựa vào sự phân bố của các lớp, composite lớp được phân ra thành các loại như sau:

- 1) Vật liệu composite đối xứng: khi mặt trung bình của vật liệu là mặt đối xứng. Để mô tả vật liệu đối xứng, ta chỉ cần một nửa số lớp liên tục. Nếu số lớp là một số chẵn, thì người ta bắt đầu từ một mặt nào đó và kết thúc ở mặt trung bình. Chỉ số “s” cho biết vật liệu đó đối xứng.

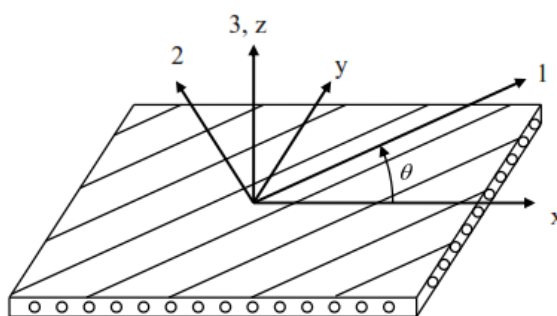
Đối xứng đúng trục	$[90 / 45_2 / 0]_s \approx (90^\circ / 45^\circ / 45^\circ / 0^\circ / 0^\circ / 45^\circ / 45^\circ / 90^\circ)$
Đối xứng lệch trục	$[\pm 45]_s \approx (45^\circ / -45^\circ / -45^\circ / 45^\circ)$

2) Vật liệu composite xen lớp:  $N$  là số lớp

Xen lớp đúng trục	$[90/0]_N \approx (90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ\dots)$
Xen lớp lệch trục	$[\pm 45]_N \approx (45^\circ/-45^\circ/45^\circ/-45^\circ/\dots)$

Do vật liệu composite được tạo thành từ nhiều lớp liên tiếp, với phương của sợi hay phương cơ bản của mỗi lớp là khác nhau. Vì vậy, trong tính toán cơ học vật liệu ta cần phải chọn hệ qui chiếu chung cho cả hệ vật liệu và biến đổi ứng xử của mỗi lớp vật liệu được xác định theo hệ trục chung đã chọn. Trong tính toán cơ học ứng xử vật liệu composite người ta qui ước như sau (Hình 2.4):

- Hệ tọa độ địa phương (1,2,3).
- Hệ tọa độ tổng thể:  $(x,y,z)$ .



Hình 2.4. Hệ trục chính và hệ trục qui chiếu của vật liệu.

Trong nghiên cứu ứng xử cơ học của vật liệu composite, người ta thường xem vật liệu là đồng nhất và dị hướng và thường được nghiên cứu theo hai hướng sau:

- Theo hướng vi mô: là nghiên cứu ứng xử của từng lớp;
- Theo hướng vĩ mô: là nghiên cứu ứng xử của cả vật liệu bao gồm nhiều lớp (sẽ được áp dụng trong luận văn này).

Một khi hai vấn đề trên được xác định, ta dễ dàng ứng dụng các phương pháp tính toán kết cấu để phân tích ứng xử cơ học của toàn kết cấu. Cụ thể, ta có thể tính toán bằng phương pháp giải tích hay phương pháp số.

- Phương pháp giải tích: các thông số cần khảo sát có thể xác định trực tiếp và cho kết quả có độ chính xác cao. Tuy nhiên, nhóm phương pháp này rất khó để ứng dụng cho các kết cấu phức tạp;
- Phương pháp số: là phương pháp giải gần đúng để xác định các giá trị của hệ các phương trình ứng xử, ví dụ như phương pháp phần tử hữu hạn hoặc phương pháp



sai phân hữu hạn. Phương pháp này cho phép ta xác định được các tham số ứng xử của các kết cấu có hình dạng, cấu trúc phức tạp.

Ngoài ra, độ chính xác của bài toán cũng phụ thuộc vào mô hình bài toán mà ta sử dụng. Ví dụ cho bài toán phân tích ứng xử của dầm composite, một số lý thuyết tính toán khác nhau có thể được áp dụng như: lý thuyết dầm nhiều lớp cổ điển của Euler - Bernoulli, lý thuyết biến dạng cắt bậc nhất của Timoshenko, lý thuyết biến dạng cắt bậc cao, v.v.

### 2.1.2. Quan hệ ứng suất – biến dạng

Quan hệ ứng suất – biến dạng của một lớp đơn thứ  $k$  bất kỳ trong hệ tọa độ địa phương (Hình 2.2) được tính bởi

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \end{Bmatrix}^{(k)} \quad (2.1)$$

trong đó  $Q_{11}, Q_{12}, Q_{22}, Q_{44}, Q_{55}, Q_{66}$  là các hệ số độ cứng của lớp thứ  $k$  và được xác định như sau:

$$Q_{11}^{(k)} = \frac{E_1^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}}; \quad Q_{12}^{(k)} = \frac{\nu_{12}^{(k)}E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}}; \quad Q_{22}^{(k)} = \frac{E_2^{(k)}}{1 - \nu_{12}^{(k)}\nu_{21}^{(k)}}; \quad (2.2)$$

$$Q_{66}^{(k)} = G_{12}^{(k)}; \quad Q_{44}^{(k)} = G_{23}^{(k)}; \quad Q_{55}^{(k)} = G_{13}^{(k)}$$

trong đó  $E_1^{(k)}$  là mô-đun đàn hồi dọc;  $E_2^{(k)}$  là mô-đun đàn ngang;  $G_{12}^{(k)}$  là mô-đun đàn hồi trượt;  $\nu_{12}^{(k)}$  và  $\nu_{21}^{(k)}$  là hệ số Poisson của lớp thứ  $k$ . Các hằng số kỹ thuật này có thể được xác định bằng cách sử dụng tiếp cận cơ học [18] như sau:

$$E_1 = E_f r_f^{(k)} + E_m (1 - r_f^{(k)}), \quad (2.3)$$

$$E_2 = \frac{E_f E_m}{E_f (1 - r_f^{(k)}) + E_m r_f^{(k)}}, \quad (2.4)$$

$$G_{12} = \frac{G_f G_m}{G_f (1 - r_f^{(k)}) + G_m r_f^{(k)}}, \quad (2.5)$$

$$\nu_{12} = \nu_{21} = \nu_f r_f^{(k)} + \nu_m (1 - r_f^{(k)}), \quad (2.6)$$

$$\text{với } G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)}, G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}, \quad (2.7)$$

trong đó  $E_f, E_m$  lần lượt là mô đun đàn hồi của vật liệu cốt sợi và vật liệu nền;  $\nu_f, \nu_m$  lần lượt là hệ số poisson của vật liệu cốt sợi và vật liệu nền.

Quan hệ ứng suất – biến dạng của một lớp đơn thứ  $k$  bất kỳ trong hệ tọa độ tổng thể (Hình 2.3) được tính bởi

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} & 0 & 0 \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{Q}_{45} & \bar{Q}_{55} \end{bmatrix}^{(k)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix}^{(k)} \quad (2.8)$$

trong đó:

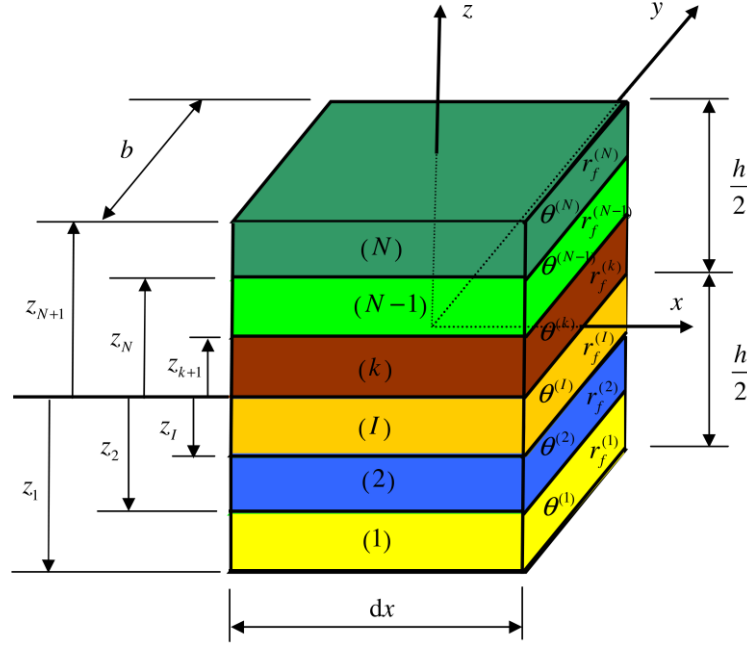
$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11} \cos^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11} \sin^4 \theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + Q_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) \\ \bar{Q}_{44} &= Q_{44} \cos^2 \theta + Q_{55} \sin^2 \theta \\ \bar{Q}_{45} &= (Q_{55} - Q_{44}) \cos \theta \sin \theta \\ \bar{Q}_{55} &= Q_{55} \cos^2 \theta + Q_{44} \sin^2 \theta \end{aligned} \quad (2.9)$$

## 2.2. Lý thuyết dầm composite

### 2.2.1. Phương trình dao động của dầm composite

Xét một phần tử dầm  $dx$  với diện tích mặt ngang như chỉ trong Hình 2.5. Dầm được làm từ  $N$  lớp. Số lượng các lớp được xác định là (1), (2), ..., (N) và góc hướng sợi của mỗi lớp được xác định là  $\theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \dots, \theta^{(N)}$ . Tỷ lệ phần trăm thể tích giữa nền và sợi của

mỗi lớp được xác định là  $r_f^{(1)}, r_f^{(2)}, \dots, r_f^{(N)}$ . Vị trí của các lớp được xác định là  $z_1, z_2, \dots, z_N, z_{N+1}$ . Chiều rộng và chiều dày của dầm được xác định là  $b$  và  $h$  tương ứng.



Hình 2.5. Diện tích mặt cắt ngang của một phần tử dầm composite.

Dầm composite có thể được tính toán dựa trên lý thuyết dầm Euler - Bernoulli hoặc lý thuyết dầm Timoshenko [19] tùy thuộc vào tỉ lệ giữa chiều dày và chiều dài của dầm. Trong giới hạn luận văn này, do các kết cấu dầm composite được xem xét là kết cấu dầm mỏng nên chỉ có lý thuyết dầm Euler – Bernoulli được khảo sát và áp dụng. Phương trình dao động tự do của dầm composite dựa trên lý thuyết dầm Euler-Bernoulli được xác định như sau [20]:

$$bD_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho^{(k)} b (z_{k+1} - z_k) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.10)$$

Chia chiều dày  $b$  cho cả hai vế của phương trình ta được:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho^{(k)} (z_{k+1} - z_k) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.11)$$

ở đó  $w$  là hàm độ võng của dầm composite;  $D_{11}$  là độ cứng chống uốn;  $\rho^{(k)}$  là khối lượng riêng của lớp thứ  $k$  và  $t$  là thời gian theo tọa độ.

Khối lượng riêng  $\rho^{(k)}$  của lớp thứ  $k$  được tính như sau:

$$\rho^{(k)} = r_f^{(k)} \rho_f + (1 - r_f^{(k)}) \rho_m \quad (2.12)$$

ở đó  $\rho_f$  là khối lượng riêng của vật liệu cốt sợi và  $\rho_m$  là khối lượng riêng của vật liệu nền.

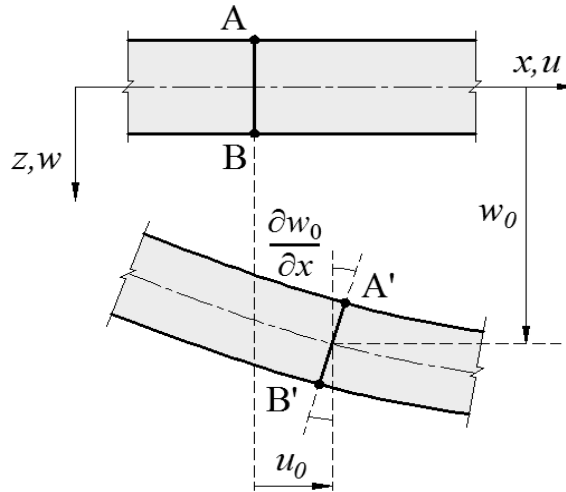
Dựa trên lý thuyết dầm cổ điển [20], độ cứng chống uốn  $D_{11}$  được xác định như sau:

$$D_{11} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{11}^{(k)} (z_{k+1}^3 - z_k^3) \quad (2.13)$$

ở đó  $\bar{Q}_{11}^{(k)}$  được gọi là hệ số độ cứng của lớp thứ  $k$  trong hệ tọa độ tổng thể và được xác định như phương trình (2.9).

### 2.2.2. Phân tích dao động tự do của dầm composite dựa trên lý thuyết dầm Euler-Bernoulli

Lý thuyết dầm Euler - Bernoulli hay còn gọi là lý thuyết dầm mỏng. Theo lý thuyết này, dầm trước và sau khi biến dạng, các đoạn thẳng vuông góc với trục thanh vẫn còn thẳng và vuông góc với trục thanh. Đồng thời độ dài của chúng vẫn không đổi như được minh họa ở Hình 2.6.



Hình 2.6. Chuyển vị và góc xoay của dầm trước và sau khi biến dạng.

Từ các giả thuyết này, bỏ qua các biến dạng theo phương  $z$ , trường chuyển vị của dầm được xác định như sau:

$$\begin{aligned} u(x, z) &= z\beta_x(x) \\ w(x, z) &= w_0(x) \end{aligned} \quad (2.14)$$

ở đó  $u$  là hàm chuyển vị ngang;  $w$  là hàm chuyển vị thẳng đứng;  $\beta_x$  là góc xoay và được

xác định bởi  $\beta_x = \frac{\partial w}{\partial x}$ .

Theo mối quan hệ giữa chuyển vị và biến dạng, trường biến dạng được xác định như sau:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (2.15)$$

Theo định luật Hooke, ta có:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon} \Rightarrow \sigma_x = D_{11}\varepsilon_x \quad (2.16)$$

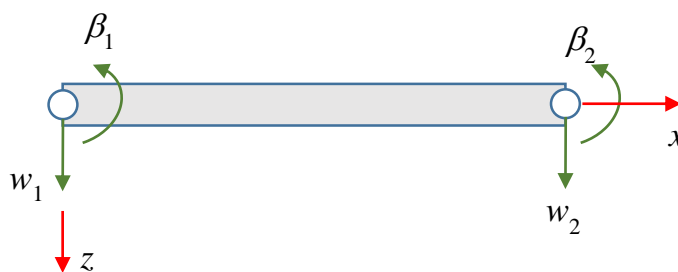
Khi đó dạng yếu của phương trình dao động tự do của dầm composite được xác định như sau:

$$\int_A \delta \varepsilon_x^T D_{11} \varepsilon_x dA = \int_A \delta \mathbf{u}^T \rho \ddot{\mathbf{u}} dA \quad (2.17)$$

### 2.2.3. Phương pháp phần tử hữu hạn cho dầm composite dựa trên lý thuyết dầm Euler-Bernoulli

Lý thuyết trong mục này chủ yếu sử dụng từ tài liệu tham khảo “Phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng Matlab” Nguyễn Thời Trung và Nguyễn Xuân Hùng [21].

Phần tử dầm Euler-Bernoulli được xây dựng từ hệ tọa độ địa phương với trục  $x$  được lấy theo hướng dọc trục thanh, điểm gốc  $O$  được đặt tại nút 1 bên tay trái của dầm như chỉ trên Hình 2.7. Trong hệ tọa độ địa phương, mỗi nút của phần tử dầm có hai bậc tự do (BTD) bao gồm độ võng  $v$  trong hướng  $y$ , và góc xoay trong mặt phẳng  $x$ - $y$ ,  $\theta_z$  quanh trục  $z$ . Vì vậy mỗi phần tử dầm Euler-Bernoulli có tổng cộng 4 bậc tự do (BTD).



Hình 2.7. Phần tử dầm Euler-Bernoulli hai nút.

#### 2.2.3.1. Hàm chuyển vị và hàm dạng phần tử

Xét một phần tử dầm  $\Omega^e$  có chiều dài  $l^e$  với các nút 1 và 2 ở hai đầu của phần tử như chỉ trong Hình 2.7. Trục  $x$  được lấy theo hướng dọc trục thanh và điểm gốc  $O$  được đặt tại nút 1 bên tay trái của dầm. Vì mỗi phần tử dầm Euler-Bernoulli có 4 BTD, nên ta cần

tìm 4 hàm dạng tương ứng. Để xác định bốn hàm dạng, ta cần giả thiết trước trong phần tử một hàm độ võng (hàm nghiệm xấp xỉ)  $w_{10}^e(x)$  có dạng đa thức bậc 3 theo  $x$  như sau:

$$w_{10}^e(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (2.18)$$

trong đó  $a_0, a_1, a_2, a_3$  là 4 hệ số chưa biết cần xác định. Việc chọn đa thức bậc 3 là do có 4 ẩn chưa biết trong đa thức, mà có liên hệ với 4 BTD trong phần tử dầm. Phương trình (2.18) có thể được viết lại dưới dạng ma trận như sau:

$$w_{10}^e(x) = \begin{bmatrix} 1 & x^1 & x^2 & x^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} \quad (2.19)$$

hay viết gọn lại dưới dạng:

$$w_{10}^e(x) = \mathbf{p}^T(x) \mathbf{a} \quad (2.20)$$

trong đó  $\mathbf{p}$  là véc-tơ hàm cơ sở và  $\mathbf{a}$  là véc-tơ hệ số. Trong dầm Euler-Bernoulli, góc xoay  $\beta_{10}^e$  được xác định bởi công thức:

$$\beta_{10}^e(x) = \frac{dw_{10}^e}{dx} = (a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2) \quad (2.21)$$

Bốn hằng số  $a_0, a_1, a_2, a_3$  có thể được xác định bằng cách sử dụng bốn điều kiện độ võng và góc xoay ở hai đầu của dầm như sau:

+ Tại  $x = 0$

$$\begin{aligned} (1) \quad w_{10}^e(0) &= w_1^e \\ (2) \quad \left. \frac{dw_{10}^e}{dx} \right|_{x=0} &= \beta_1^e \end{aligned} \quad (2.22)$$

+ Tại  $x = l^e$

$$\begin{aligned} (3) \quad w_{10}^e(l^e) &= w_2^e \\ (4) \quad \left. \frac{dw_{10}^e}{dx} \right|_{x=l^e} &= \beta_2^e \end{aligned} \quad (2.23)$$

Thay bốn điều kiện này vào hai công thức (2.20) và (2.21), ta được hệ phương trình:

$$\underbrace{\begin{Bmatrix} w_1^e \\ \beta_1^e \\ w_2^e \\ \beta_2^e \end{Bmatrix}}_{\mathbf{d}_{10}^e} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & l^e & (l^e)^2 & (l^e)^3 \\ 0 & 1 & 2l^e & 3(l^e)^2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{P}} \underbrace{\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix}}_{\mathbf{a}} \quad (2.24)$$

hay viết gọn lại dưới dạng:

$$\mathbf{d}_{10}^e = \mathbf{P}\mathbf{a} \quad (2.25)$$

trong đó  $\mathbf{d}_{10}^e$  là véc-tơ chuyển vị và góc xoay tại nút của phần tử dầm có dạng:

$$\mathbf{d}_{10}^e = \begin{Bmatrix} w_1^e \\ \beta_1^e \\ w_2^e \\ \beta_2^e \end{Bmatrix} \begin{cases} \text{Chuyển vị và góc xoay tại nút 1 của phần tử } \Omega_e \\ \text{Chuyển vị và góc xoay tại nút 2 của phần tử } \Omega_e \end{cases} \quad (2.26)$$

Từ công thức (2.25), ta dễ dàng xác định được các hệ số  $\mathbf{a}$  bởi công thức:

$$\mathbf{a} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{d}_{10}^e \quad (2.27)$$

trong đó:

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-3}{(l^e)^2} & \frac{-2}{l^e} & \frac{3}{(l^e)^2} & \frac{-1}{l^e} \\ \frac{2}{(l^e)^3} & \frac{1}{(l^e)^2} & \frac{-2}{(l^e)^3} & \frac{1}{(l^e)^2} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Vậy bằng cách thay  $\mathbf{a}$  trong công thức (2.27) vào công thức (2.20) và sắp xếp lại, ta được:

$$w_{10}^e(x) = \underbrace{\mathbf{p}^T(x)\mathbf{P}^{-1}}_{\mathbf{N}_{10}^e(x)} \mathbf{d}_{10}^e = \mathbf{N}_{10}^e(x)\mathbf{d}_{10}^e \quad (2.29)$$

trong đó  $\mathbf{N}_{10}^e(x)$  là ma trận hàm dạng của phần tử dầm Euler-Bernoulli có dạng:

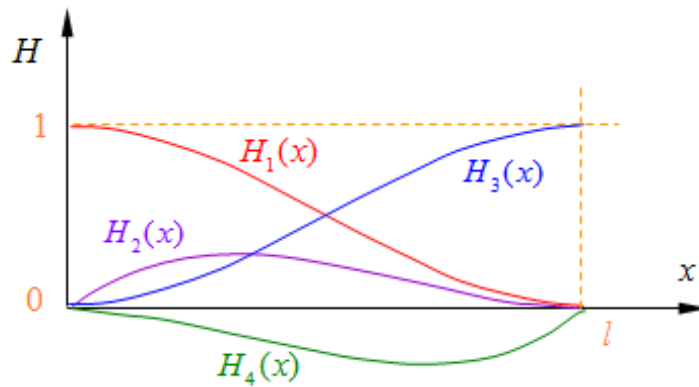
$$\mathbf{N}_{10}^e(x) = \begin{bmatrix} N_1^e(x) & N_2^e(x) & N_3^e(x) & N_4^e(x) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

với các  $N_I^e(x)$ , ( $I=1,2,3,4$ ) là bốn hàm dạng tương ứng với bốn BTĐ của phần tử dầm và được biểu diễn dưới dạng hiện như sau:

$$\begin{aligned}
N_1^e(x) &= 1 - \frac{3x^2}{(l^e)^2} + \frac{2x^3}{(l^e)^3} \\
N_2^e(x) &= x - \frac{2x^2}{l^e} + \frac{x^3}{(l^e)^2} \\
N_3^e(x) &= \frac{3x^2}{(l^e)^2} - \frac{2x^3}{(l^e)^3} \\
N_4^e(x) &= -\frac{x^2}{l^e} + \frac{x^3}{(l^e)^2}
\end{aligned} \tag{2.31}$$

trong đó  $l^e$  là chiều dài của phần tử dầm trong hướng trục  $x$ .

Các hàm dạng  $N_I^e(\mathbf{x})$ , ( $I = 1, 2, 3, 4$ ), được gọi là các hàm dạng Hermitian như minh họa trên Hình 2.8. Các hàm dạng Hermitian này thuộc loại  $C^1$  mà đảm bảo tính liên tục giữa 2 phần tử lân cận của cả chuyển vị và góc xoay.



Hình 2.8. Các hàm dạng Hermitian của phần tử dầm Euler- Bernoulli.

### 2.2.3.2. Hàm biến dạng dọc trục của phần tử và ma trận biến dạng-chuyển vị của phần tử

Chuyển vị dọc trục  $x$  của phần tử được tính từ hàm độ võng nút của phần tử  $w_{10}^e(x)$  trong công thức (2.29) như sau:

$$u_{10}^e(x) = z \frac{dw_{10}^e(x)}{dx} \tag{2.32}$$

Hàm biến dạng dọc trục  $x$  của phần tử khi đó được tính bởi:

$$\varepsilon_{10}^e(x) = \frac{du_{10}^e(x)}{dx} = z \frac{d^2w_{10}^e(x)}{dx^2} = z \mathbf{B}_{10}^e(x) \mathbf{d}_{10}^e \tag{2.33}$$



trong đó  $\mathbf{B}_{10}^e(x)$  là ma trận biến dạng – chuyển vị của phần tử  $\Omega^e$ . Cho phần tử dầm Euler- Bernoulli,  $\mathbf{B}_{10}^e(x)$  rút gọn lại là một véc-tơ và được tính bởi:

$$\mathbf{B}_{10}^e(x) = \frac{d^2 \mathbf{N}_{10}^e(x)}{dx^2} = \left[ \frac{d^2 N_1^e(x)}{dx^2} \quad \frac{d^2 N_2^e(x)}{dx^2} \quad \frac{d^2 N_3^e(x)}{dx^2} \quad \frac{d^2 N_4^e(x)}{dx^2} \right] \quad (2.34)$$

Thay  $N_I^e(x)$ ,  $I = 1, 2, 3, 4$ , trong công thức (2.34) bởi các hàm dạng trong công thức (2.31), véc-tơ  $\mathbf{B}_{10}^e(x)$  có dạng như sau:

$$\mathbf{B}_{10}^e(x) = \left[ -\frac{6}{(l^e)^2} + \frac{12x}{(l^e)^3} \quad -\frac{4}{l^e} + \frac{6x}{(l^e)^2} \quad \frac{6}{(l^e)^2} - \frac{12x}{(l^e)^3} \quad -\frac{2}{l^e} + \frac{6x}{(l^e)^2} \right] \quad (2.35)$$

### 2.2.3.3. Ma trận độ cứng phần tử

Ma trận độ cứng phần tử  $\mathbf{K}_{10}^e$  cho phần tử dầm Euler-Bernoulli có dạng sau:

$$\mathbf{K}_{10}^e = \int_{A_e} \delta \boldsymbol{\varepsilon}_x^T D_{11} \boldsymbol{\varepsilon}_x dA = \int_{A_e} \left( \mathbf{B}_{10}^e(x) \right)^T D_{11} z \mathbf{B}_{10}^e(x) dA = \int_0^{l^e} \left( \mathbf{B}_{10}^e(x) \right)^T D_{11} I_y \mathbf{B}_{10}^e(x) dx \quad (2.36)$$

với  $I_y = \int_A z^2 dA$  là mô-men quán tính của dầm và được tính tùy theo hình dạng hình học của mặt cắt ngang của dầm.

Thay  $\mathbf{B}_{10}^e(x)$  ở công thức (2.35) vào công thức (2.36), khi đó ma trận độ cứng phần tử  $\mathbf{K}_{10}^e$  có dạng cụ thể như sau:

$$\mathbf{K}_{10}^e = \frac{D_{11} I_y}{(l^e)^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l^e & -12 & 6l^e \\ 6l^e & 4(l^e)^2 & -6l^e & 2(l^e)^2 \\ -12 & -6l^e & 12 & -6l^e \\ 6l^e & 2(l^e)^2 & -6l^e & 4(l^e)^2 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

### 2.2.3.4. Ma trận khối lượng phần tử

Ma trận độ cứng phần tử  $\mathbf{M}_{10}^e$  cho phần tử dầm Euler-Bernoulli có dạng sau:

$$\mathbf{M}_{10}^e = \int_{\Omega_e} \left( \mathbf{N}_{10}^e \right)^T \rho \mathbf{N}_{10}^e d\Omega = \int_0^{l^e} \left( \mathbf{N}_{10}^e \right)^T A^e \rho \mathbf{N}_{10}^e dx \quad (2.38)$$

trong đó  $A^e$  là diện tích mặt cắt ngang của phần tử dầm.

Xét trường hợp miền bài toán có tỉ trọng khối lượng  $\rho$  và diện tích mặt cắt ngang là các hằng số, và thay  $\mathbf{N}_{10}^e$  bởi công thức (2.31) vào công thức (2.38), ta được:

$$\mathbf{M}_{10}^e = \frac{\rho A^e l^e}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l^e & 54 & -13l^e \\ 22l^e & 4(l^e)^2 & 13l^e & -3(l^e)^2 \\ 54 & 13l^e & 156 & -22l^e \\ -13l^e & -3(l^e)^2 & -22l^e & 4(l^e)^2 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

#### 2.2.4. Dạng yếu của phương trình dao động dầm composite

$$\mathbf{K}\mathbf{u} + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = 0 \quad (2.40)$$

Để tìm tần số dao động tự do của hệ, ta thừa nhận nghiệm chuyển vị  $\mathbf{u}$  có dạng sau:

$$\mathbf{u} = \varphi \exp(i\omega t) \quad (2.41)$$

trong đó:  $\varphi$  là biên độ của chuyển vị nút;  $\omega$  là tần số dao động tự nhiên (tự do);  $t$  là thời gian và  $i$  là biến phức soa cho  $i^2 = -1$ . Thay công thức (2.41) vào (2.40) ta được:

$$[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}]\varphi = 0 \quad (2.42)$$

hay

$$[\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M}]\varphi = 0 \quad (2.43)$$

trong đó:  $\lambda = \omega^2$  (2.44)

Phương trình (2.42) hay (2.43) được gọi là *phương trình giá trị riêng*, và ta dễ dàng nhận ra rằng các phương trình này có ngay nghiệm  $\varphi = 0$  mà ứng với trường hợp hệ đứng yên, không dao động. Tất nhiên, chúng ta muốn tìm các nghiệm  $\varphi \neq 0$  mà ứng với các trường hợp hệ có dao động thực sự. Để có nghiệm  $\varphi \neq 0$ , định thức của ma trận sau phải bằng 0

$$\det[\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M}] = [\mathbf{K} - \lambda \mathbf{M}] = 0 \quad (2.45)$$

Khai triển phương trình (2.45), ta được một phương trình đa thức theo  $\lambda$  có bậc  $N_n$ . Giải phương trình đa thức này ta sẽ có  $N_n$  nghiệm  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{N_n}$  mà được gọi là các giá trị riêng. Các giá trị riêng này liên hệ với các *tần số dao động tự nhiên* bởi công thức (2.44). Thay thế mỗi giá trị riêng vừa tìm được,  $\lambda_i, i=1, 2, \dots, N_n$ , vào phương trình (2.43), ta có:

$$[\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}] \varphi = 0 \quad (2.46)$$

là một hệ phương trình đại số tuyến tính. Giải hệ phương trình này ta được 1 véc-tơ  $\varphi_i$  mà có ý nghĩa là véc-tơ riêng thứ  $i$  tương ứng với giá trị riêng  $\lambda_i$ . Véc-tơ riêng  $\varphi_i$  thỏa mãn phương trình:

$$[\mathbf{K} - \lambda_i \mathbf{M}] \varphi_i = 0 \quad (2.47)$$

Véc-tơ riêng  $\varphi_i$  tương ứng với *dạng dao động* thứ  $i$  của kết cấu. Vì vậy việc phân tích phương trình giá trị riêng cũng cho thông tin rất quan trọng về các dạng dao động có thể của kết cấu.

Trong công thức (2.43), vì ma trận  $\mathbf{M}$  là đối xứng xác định dương, trong khi ma trận  $\mathbf{K}$  tuy là đối xứng nhưng có thể xác định dương hay bán xác định dương. Vì vậy, các giá trị riêng tuy là giá trị thực nhưng có thể lớn hơn hay bằng 0. Một vài giá trị riêng có thể trùng nhau  $m$  lần và ta gọi đó là các giá trị riêng bội  $m$ .

## 2.3. Lý thuyết tối ưu hóa

### 2.3.1. Tổng quan về tối ưu hóa

Tối ưu hóa là một nhánh Toán ứng dụng được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực khoa học kỹ thuật. Trong thiết kế và chế tạo các sản phẩm, tối ưu hóa được sử dụng để so sánh, đánh giá các chỉ tiêu thiết kế nhằm lựa chọn các thông số thiết kế tối ưu để sản phẩm được tạo ra có những ưu điểm nổi trội như: bền vững và tiết kiệm chi phí sản xuất. Hiện nay, có rất nhiều phương pháp để giải bài toán tối ưu hóa. Tập hợp các phương pháp này thường được các nhà khoa học phân thành hai nhóm phương pháp chính như sau:

1) Nhóm phương pháp tìm kiếm gián tiếp dựa trên thông tin đạo hàm của hàm mục tiêu và hàm ràng buộc. Từ một điểm thiết kế được chọn tùy ý ban đầu, qua quá trình giải lặp, dựa trên các thông tin đạo hàm, các điểm tìm kiếm trung gian sẽ được xác định cho đến khi lời giải tối ưu nhất được tìm thấy. Một số phương pháp phổ biến trong nhóm này như: phương pháp Newton, phương pháp đường dốc nhất (Steepest Descent), giải thuật bình phương tuần tự SQP (Sequential Quadratic Programming), phương pháp điểm trong (Interior Point Method), v.v [22]. Nhóm phương pháp này thường cho nghiệm hội tụ nhanh. Tuy nhiên, nghiệm tối ưu có thể bị kẹt ở giá trị cực trị địa phương khi bài toán tối ưu có độ phi tuyến cao và điểm xuất phát ban đầu không tốt. Hơn nữa, quá trình tìm

kiểm lại dựa trên thông tin đạo hàm, nên việc áp dụng các phương pháp này sẽ gặp nhiều khó khăn khi bài toán tối ưu có hàm mục tiêu hay hàm ràng buộc là các hàm bất liên tục và biến thiết kế là tập các giá trị rời rạc.

2) Nhóm các phương pháp tìm kiếm trực tiếp dựa trên thông tin giá trị hàm mục tiêu và giá trị của các hàm ràng buộc. Nhóm phương pháp này thường mô phỏng quá trình tìm kiếm theo các quy luật ứng xử, tiến hóa và phát triển của tự nhiên như: giải thuật di truyền GA (Genetic Algorithm) [23], giải thuật tiến hóa DE (Differential Evolution) [24], giải thuật đàn kiến ACO (Ant Colony Optimization) [25], giải thuật bầy đàn PSO (Particle Swarm Optimization) [26], v.v. Các phương pháp thuộc nhóm này thường có thuật giải đơn giản, cho giá trị tối ưu tổng thể và có thể áp dụng được cho nhiều loại bài toán khác nhau, kể cả các bài toán có hàm mục tiêu hay hàm ràng buộc là các hàm phi tuyến, bất liên tục và biến thiết kế là tập các giá trị rời rạc. Tuy nhiên, chi phí tính toán để giải một bài toán tối ưu sử dụng nhóm phương pháp này là rất tốn kém do số lượng đánh giá hàm mục tiêu tương đối lớn.

Trong những năm gần đây, với sự phát triển không ngừng của khoa học máy tính, nhiều phiên bản máy tính mới có tốc độ xử lý cao đã ra đời, đặc biệt là các hệ siêu máy tính đã giúp cho việc giải quyết các bài toán lớn có chi phí tính toán cao trở nên dễ dàng hơn. Vì vậy, gần đây với những ưu điểm nổi trội của mình, nhóm các phương pháp tối ưu hóa tìm kiếm trực tiếp nhận được sự quan tâm của rất nhiều nhà khoa học trên thế giới và được phát triển rất mạnh.

Theo xu hướng đó, luận văn đề xuất sử dụng giải thuật tiến hóa DE để giải bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm composite chịu ràng buộc về tần số với biến thiết kế là tỉ lệ phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi và chiều dày của các lớp, ở đó biến tỉ lệ phần trăm thể tích là biến liên tục và biến chiều dày là biến rời rạc.

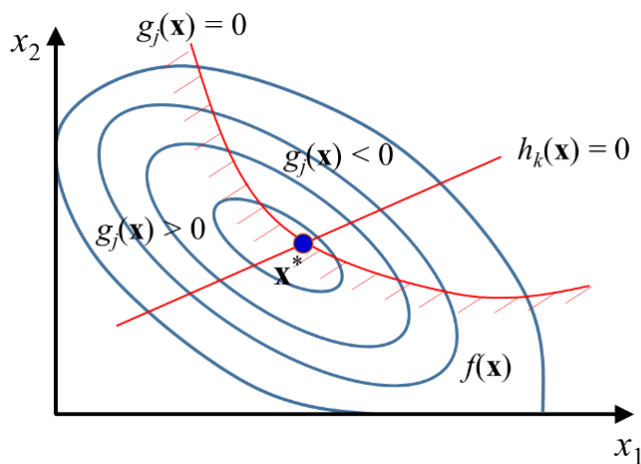
### 2.3.2. Tổng quan về bài toán tối ưu hóa

Tổng quát, một bài toán tối ưu hóa tiền định có thể được định nghĩa bởi mô hình toán học như sau:

$$\begin{aligned} & \underset{\mathbf{x}}{\text{Minimize / Maximize}} && f(\mathbf{x}) \\ & \text{subject to} && g_j(\mathbf{x}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, J; \\ & && h_k(\mathbf{x}) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K; \\ & && x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \tag{2.408}$$

trong đó  $\mathbf{x}$  là véc-tơ chứa các biến thiết kế, ví dụ như: kích thước, tiết diện của kết cấu, các thông số vật liệu, v.v.;  $g_j(\mathbf{x}) \leq 0$ ,  $h_k(\mathbf{x}) = 0$  lần lượt là các hàm ràng buộc dạng bất đẳng thức và đẳng thức liên quan đến ứng xử của kết cấu hay các ràng buộc thiết kế;  $J$ ,  $K$  lần lượt là số lượng ràng buộc bất đẳng thức và ràng buộc đẳng thức;  $x_i^{\min}$ ;  $x_i^{\max}$  là cận dưới và cận trên của biến thiết kế  $x_i$ ;  $f(\mathbf{x})$  là hàm mục tiêu, có thể là hàm chi phí, năng lượng biến dạng hay trọng lượng của kết cấu, v.v.

Mục tiêu của bài toán là tìm kiếm các giá trị của biến thiết kế trong không gian thiết kế sao cho cực tiểu hoặc cực đại hóa hàm mục tiêu  $f(\mathbf{x})$  nhưng vẫn thỏa mãn các điều kiện ràng buộc  $g_j(\mathbf{x})$  và  $h_k(\mathbf{x})$ . Kết quả tối ưu của bài toán tối ưu (2.408) có thể được biểu diễn bởi Hình 2.9 như sau:



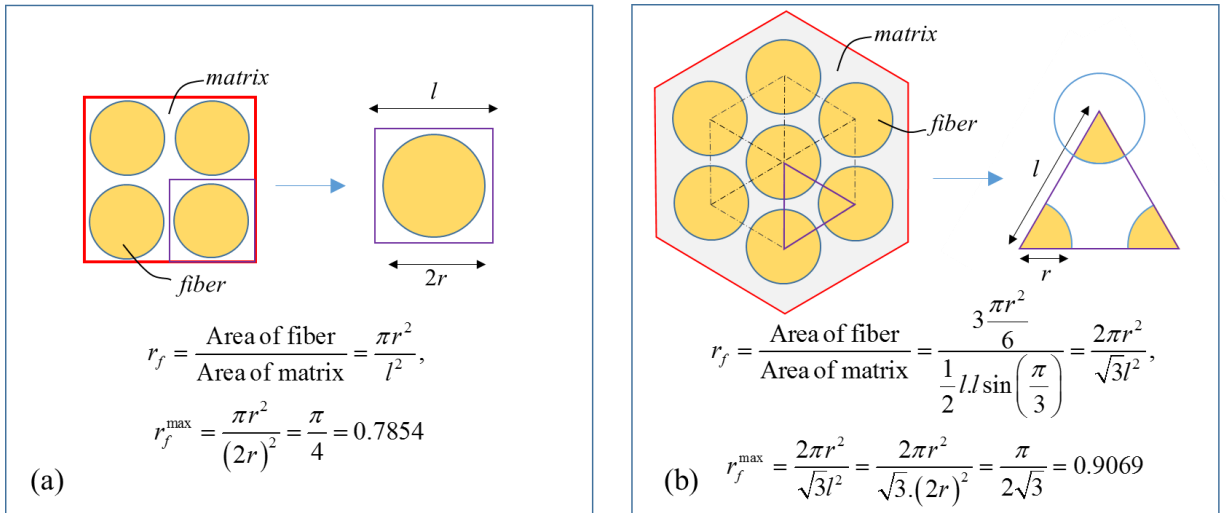
Hình 2.9. Mô tả kết quả của một bài toán tối ưu hóa, với  $\mathbf{x}^*$  là lời giải tối ưu.

### 2.3.3. Thành lập bài toán tối ưu hóa kết cấu dầm composite

Trong luận văn này, bài toán tối ưu hóa được thành lập gồm có: hàm mục tiêu là cực tiểu trọng lượng của dầm; biến thiết kế là tỉ lệ phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi của các lớp và chiều dày của mỗi lớp, trong đó biến tỉ lệ phần trăm thể tích là biến liên tục và biến chiều dày là biến rời rạc; hàm ràng buộc yêu cầu tần số chủ đạo (tần số thứ nhất) phải lớn hơn giá trị tần số được định trước nhằm tránh các hiện tượng cộng hưởng gây nguy hiểm cho kết cấu. Mô hình toán học của bài toán được mô tả như sau:

$$\begin{aligned}
\text{Minimize} \quad & \text{mass}(\mathbf{r}_f, \mathbf{t}) = \sum_{k=1}^N \rho^{(k)}(r_f^{(k)}) \times \Omega_k \times t^{(k)} \\
\text{subject to} \quad & f_1(\mathbf{r}_f, \mathbf{t}) \geq \underline{f}_1 \\
& 0 \leq r_f^{(k)} \leq r_f^{\max} \\
& t_{\text{low}} \leq t^{(k)} \leq t_{\text{up}}, \quad k = 1, \dots, N
\end{aligned} \tag{2.419}$$

trong đó  $\mathbf{r}_f$  và  $\mathbf{t}$  lần lượt là véc-tơ chứa các biến thiết kế tỉ lệ nền và sợi  $r_f^{(k)}$  và chiều dày của các lớp  $t^{(k)}$ ;  $\text{mass}(\mathbf{r}_f, \mathbf{t})$  là hàm khối lượng của dầm theo biến thiết kế  $r_f^{(k)}$  và  $t^{(k)}$ ;  $\rho^{(k)}$  khối lượng riêng của mỗi lớp;  $\Omega_k$  là diện tích của lớp thứ  $k$ ;  $f_1(\mathbf{r}_f, \mathbf{t})$  là tần số đầu tiên của dầm;  $\underline{f}_1$  là cận dưới của tần số  $f_1(\mathbf{r}_f, \mathbf{t})$ ;  $t_{\text{low}}$  và  $t_{\text{up}}$  lần lượt là cận dưới và cận trên của biến chiều dày  $t^{(k)}$ ;  $N$  là tổng số lớp của dầm; và  $r_f^{\max}$  là phần trăm cực đại cho phép của  $r_f$  trong mỗi lớp và được xác định dựa vào khả năng sắp xếp cốt sợi trong quá trình sản xuất [27]. Ví dụ  $r_f^{\max} = 0.7854$  thì cốt sợi được xếp theo dạng hình vuông như được mô tả trong Hình 2.10a,  $r_f^{\max} = 0.9069$  thì cốt sợi được xếp theo dạng hình lục giác như được miêu tả ở Hình 2.10b.

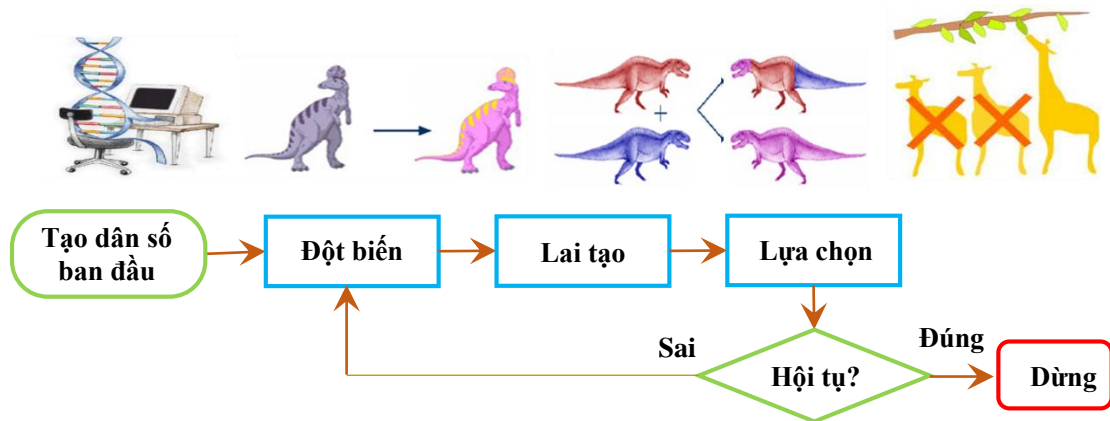


Hình 2.10. Tỷ lệ phần trăm thể tích cực đại theo hai cách sắp xếp cốt sợi khác nhau.

## 2.4. Giải thuật tiến hóa DE (Differential Evolution)

Giải thuật tiến hóa DE được đề xuất bởi Storn và Price vào năm 1997 [24]. DE là phương pháp thuộc nhóm các phương pháp tối ưu tìm kiếm trực tiếp và cho nghiệm toàn cục. Phương pháp bao gồm những toán tử cơ bản rất giống so với giải thuật di truyền

GA như: tạo dân số, lựa chọn, lai tạo và đột biến. Tuy nhiên, cơ chế đột biến, lai tạo và quá trình tiến hóa tạo ra các cá thể mới có nhiều đặc điểm khác biệt so với giải thuật di truyền GA. Quá trình tiến hóa tạo ra các cá thể mới của giải thuật DE được thực hiện theo trình tự như chỉ trong Hình 2.11.



Hình 2.11. Quá trình xử lý của giải thuật DE.

#### 2.4.1. Quá trình tạo bộ dân số ban đầu

Giống như giải thuật di truyền, DE cũng tạo dân số ban đầu một cách ngẫu nhiên và phân bố rộng khắp trên không gian thiết kế. Mỗi cá thể  $x_i$  là một véc-tơ  $D$  chiều tương ứng với  $D$  biến thiết kế:

$$\mathbf{x}_{i,g} = \{x_1, x_2, x_j, \dots, x_D\}; i = 1, 2, \dots, NP, j = 1, 2, \dots, D \quad (2.50)$$

trong đó  $NP$  là kích thước dân số;  $g$  là số thế hệ (ở thế hệ đầu tiên  $g = 0$ );  $D$  là số biến thiết kế của bài toán tối ưu.

Dựa vào không gian thiết kế (ràng buộc cận dưới và cận trên của biến thiết kế), các cá thể trong một dân số được tạo ngẫu nhiên bởi công thức sau:

$$x_{j,i,0} = x_{j,lb} + \text{rand}[0,1] \times (x_{j,ub} - x_{j,lb}) \quad (2.51)$$

với  $x_{j,lb}, x_{j,ub}$  là giá trị cận dưới và giá trị cận trên của biến thiết kế thứ  $j$  và  $\text{rand}[0,1]$  là một hàm tạo số ngẫu nhiên trong đoạn  $[0,1]$ .

#### 2.4.2. Quá trình đột biến

Khác với quá trình đột biến của giải thuật di truyền, quá trình đột biến của DE được tiến hành ngay sau khi bộ dân số được tạo ra. Ứng với mỗi véc-tơ  $\mathbf{x}_{i,g}$  sẽ có một véc-tơ đột biến tương ứng. Có nhiều toán tử đột biến khác nhau đã được đề xuất cho DE, trong đó 6 toán tử đột biến thường được sử dụng bao gồm

+ rand/1

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{r_1,g} + F \times (\mathbf{x}_{r_2,g} - \mathbf{x}_{r_3,g}) \quad (2.52)$$

+ best/1

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{\text{best},g} + F \times (\mathbf{x}_{r_1,g} - \mathbf{x}_{r_2,g}) \quad (2.53)$$

+ current-to-rand/1

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{i,g} + F \times (\mathbf{x}_{r_1,g} - \mathbf{x}_{i,g}) + F \times (\mathbf{x}_{r_2,g} - \mathbf{x}_{r_3,g}) \quad (2.54)$$

+ current-to-best/1

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{i,g} + F \times (\mathbf{x}_{\text{best},g} - \mathbf{x}_{i,g}) + F \times (\mathbf{x}_{r_1,g} - \mathbf{x}_{r_2,g}) \quad (2.55)$$

+ rand/2

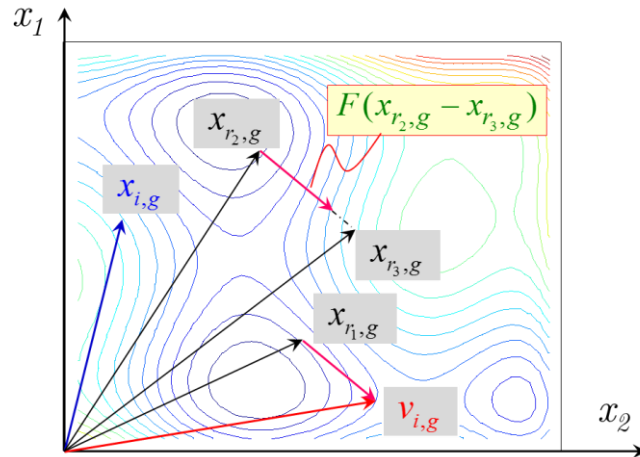
$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{r_1,g} + F \times (\mathbf{x}_{r_2,g} - \mathbf{x}_{r_3,g}) + F \times (\mathbf{x}_{r_4,g} - \mathbf{x}_{r_5,g}) \quad (2.56)$$

+ best/2

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{\text{best},g} + F \times (\mathbf{x}_{r_2,g} - \mathbf{x}_{r_3,g}) + F \times (\mathbf{x}_{r_3,g} - \mathbf{x}_{r_4,g}) \quad (2.57)$$

trong đó:

- $\mathbf{x}_{\text{best},g}$  là véc-tơ biến thiết kế có giá trị hàm mục tiêu tốt nhất ở thế hệ thứ  $g$ .
- $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$ : là các chỉ số ngẫu nhiên được chọn sao cho  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5 \in \{i = 1, 2, \dots, NP\}$  và  $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq r_4 \neq r_5 \neq i$ .
- $F$  là tham số thuộc  $[0, 1]$ . Tham số này đóng vai trò kiểm soát “độ dài của bước đột biến” như được thể hiện trong Hình 2.12.



Hình 2.12. Cơ chế đột biến của giải thuật DE khi sử dụng toán tử đột biến rand/1.

Từ Hình 2.12, ta thấy, nếu  $F = 0$  thì véc-tơ đột biến  $\mathbf{v}_{i,g}$  sẽ bằng một véc-tơ khác trong dân số là véc-tơ  $\mathbf{x}_{r_1,g}$ . Nếu  $F = 1$  thì véc-tơ đột biến  $\mathbf{v}_{i,g}$  sẽ bằng tổng của véc-tơ  $\mathbf{v}_{r_1,g}$  với



hiệu của hai véc-tơ  $\mathbf{x}_{r2,g}$  và  $\mathbf{x}_{r3,g}$  bất kỳ trong dân số. Như vậy, tham số  $F$  sẽ quyết định sự ảnh hưởng của 3 véc-tơ ngẫu nhiên  $\mathbf{x}_{r1,g}$ ,  $\mathbf{x}_{r2,g}$ ,  $\mathbf{x}_{r3,g}$  lên véc-tơ đột biến  $\mathbf{v}_{i,g}$ . Thông thường  $F$  được chọn nằm trong khoảng  $[0.7, 0.9]$ .

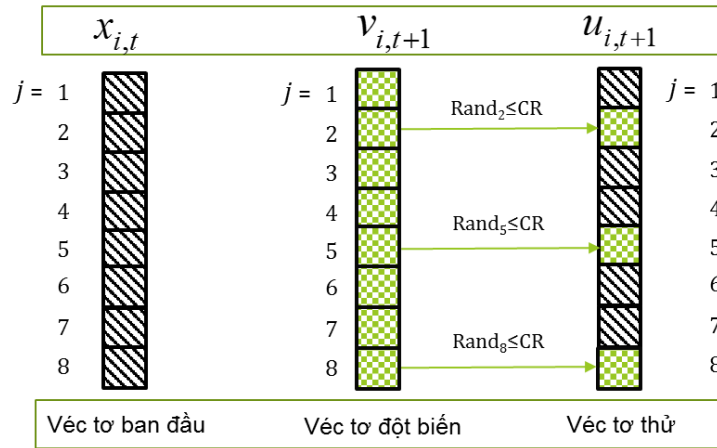
### 2.4.3. Quá trình lai tạo

Để tạo sự khác biệt cho mỗi cá thể của dân số nhằm tìm kiếm một lời giải tối ưu hơn, Storn và Price [24] đã tạo thêm một véc-tơ thử  $\mathbf{u}_{i,g}$  và được xác định như sau:

$$\mathbf{u}_{ij,g} = \begin{cases} v_{ij,g} & \text{if } rand_j[0,1] \leq CR \text{ or } j = j_{rand}, j_{rand} \in [1, D] \\ x_{ij,g} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5428)$$

với  $CR \in [0, 1]$  là tham số điều khiển chéo hóa;  $j_{rand}$  là một số nguyên dương được tạo ngẫu nhiên trong khoảng  $[1, D]$ .

Công thức (2.19) có thể được mô tả chi tiết hơn trong Hình 2.11.



Hình 2.13. Cơ chế tạo véc-tơ thử nghiệm.

Từ Hình 2.13, ta thấy khi  $rand_2 \leq CR$ ,  $rand_5 \leq CR$ ,  $rand_8 \leq CR$  thì phần tử thứ 2, 5 và 8 của véc-tơ ban đầu sẽ được thay thế bởi phần tử thứ 2, 5 và 8 của véc-tơ đột biến. Với cách lai tạo này, DE sẽ đảm bảo véc-tơ mới được tạo luôn khác biệt so với véc-tơ ban đầu. Quá trình này còn được gọi là quá trình tiến hóa của mỗi cá thể.

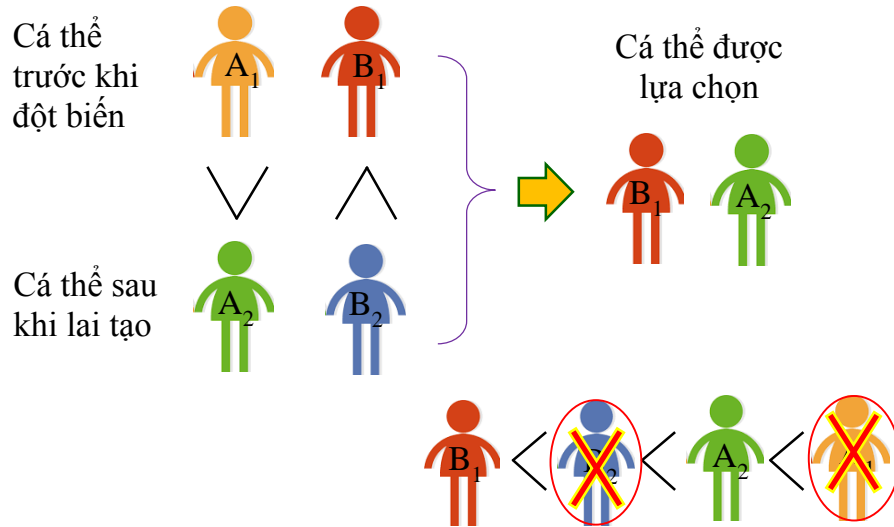
### 2.4.4. Quá trình lựa chọn

Quá trình lựa chọn dân số cho thế hệ tiếp theo sẽ được thực hiện dựa vào giá trị hàm mục tiêu của cá thể đó trước khi diễn ra các quá trình đột biến, lai tạo là  $f(\mathbf{x}_{i,g})$  và sau khi diễn ra quá trình đột biến, lai tạo là  $f(\mathbf{u}_{i,g})$ . Nếu véc-tơ thử nghiệm  $\mathbf{u}_{i,g}$  cho giá trị

hàm mục tiêu tốt hơn (nhỏ hơn) thì nó sẽ được lựa chọn, ngược lại, véc-tơ  $\mathbf{x}_{i,g}$  sẽ được chọn và được thể hiện như sau:

$$\mathbf{x}_{i,g+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,g} & \text{if } f(\mathbf{u}_{i,g}) \leq f(\mathbf{x}_{i,g}) \\ \mathbf{x}_{i,g} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.439)$$

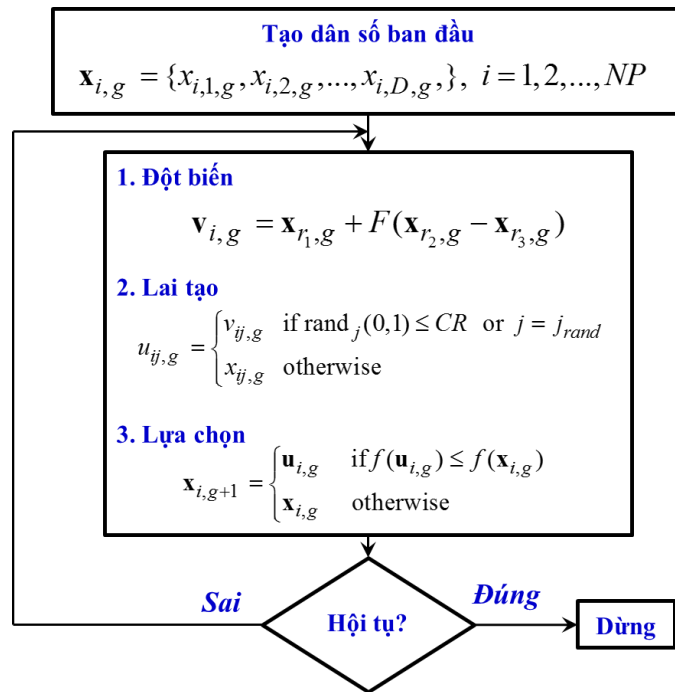
Quá trình lựa chọn dân số ở công thức (2.439) có thể được mô tả chi tiết hơn ở Hình 2.14.



Hình 2.14. Mô tả quá trình lựa chọn.

#### 2.4.5. Sơ đồ giải thuật của DE

Dựa vào các bước xử lý ở trên, phương pháp DE có thể được trình bày theo sơ đồ giải thuật như sau:



Hình 2.15. Sơ đồ giải thuật DE.

## 2.4.6. Giải thuật DE cải tiến

DE là một trong nhiều giải thuật tối ưu toàn cục hiệu quả nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới. Trong những năm gần đây, hoạt động nghiên cứu cải tiến DE phát triển rất nhanh. Nhiều phiên bản cải tiến khác nhau cho DE đã được đề xuất mà được trình bày trong tài liệu tham khảo [28]. Trong các nghiên cứu này, một phiên bản cải tiến mới của DE được đề xuất gần đây bởi Hồ Hữu Vịnh và cộng sự [29] sẽ được tác giả sử dụng để giải bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm composite. Trong phiên bản cải tiến ở [29], cơ chế đột biến và cơ chế lựa chọn được hiệu chỉnh nhằm nâng cao khả năng tìm kiếm cũng như cải thiện tốc độ hội tụ của phương pháp DE gốc. Chi tiết cho những cải tiến sẽ được trình bày ở các mục tiếp theo.

### 2.4.6.1. Cải tiến quá trình đột biến

Như đã được chỉ ra trong nghiên cứu của Das và cộng sự [30], sự cân bằng tốt giữa khả năng khám phá không gian tìm kiếm (exploration) và khả năng kế thừa các đặc tính tốt của các cá thể ở thế hệ trước (exploitation) sẽ ảnh hưởng đáng kể lên sự thành công của một thuật toán tối ưu hóa toàn cục. Ở thuật toán DE, đột biến được xem là khâu quan trọng, ảnh hưởng rất lớn lên khả năng tìm kiếm và tốc độ hội tụ của toàn bộ thuật toán. Quá trình đột biến được thực hiện nhằm đảm bảo dân số mới được tạo ra vừa đa dạng, vừa kế thừa được những đặc tính tốt của các cá thể ở thế hệ dân số trước đó. Và

nó thường được thực hiện thông qua một trong sáu toán tử đột biến đã được đề cập ở **mục 2.4.2**. Tuy nhiên, không phải tất cả sáu toán tử đột biến ở trên đều đảm bảo cân bằng tốt giữa hai yếu tố: sự đa dạng và tính kế thừa. Thông thường, nếu toán tử đột biến có khả năng tạo ra sự đa dạng lớn, nó sẽ có tính kế thừa thấp và ngược lại nếu toán tử có khả năng kế thừa tốt thì khả năng tạo ra sự đa dạng của nó sẽ thấp [31]. Do đó, quá trình đột biến của DE còn gặp nhiều hạn chế và cần được cải thiện để đảm bảo sự cân bằng tốt hơn cho cả hai khía cạnh. Trong phần này, cơ chế đột biến thích nghi [29] sẽ được áp dụng.

#### ❖ Cơ chế đột biến thích nghi [29]

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng mỗi toán tử đột biến DE thường chỉ sở hữu một đặc tính nổi trội, có thể là có khả năng tìm kiếm toàn cục tốt hoặc có khả năng kế thừa, tìm kiếm địa phương tốt. Ví dụ, với toán tử “rand/1”, thuật toán DE có khả năng tìm kiếm nghiệm toàn cục tốt, nhưng khả năng tìm kiếm địa phương kém và thường dẫn đến hội tụ chậm [32]. Ngược lại, với toán tử “current-to-best/1”, DE có khả năng tìm kiếm địa phương tốt, nhưng khả năng tìm kiếm toàn cục kém, hội tụ sớm và thường kẹt ở nghiệm địa phương [33]. Vì vậy, để cân bằng tốt khả năng tìm kiếm toàn cục và địa phương, cơ chế đột biến thích nghi được đề xuất [29]. Trong cơ chế đột biến này, thay vì chỉ sử dụng một toán tử đột biến như thuật toán DE gốc, hai toán tử đột biến bao gồm “rand/1” và “current-to-best/1” sẽ được sử dụng đồng thời, trong đó toán tử “rand/1” sẽ giúp đảm bảo tính đa dạng của dân số và ngăn không cho kết quả tối ưu kẹt ở nghiệm địa phương, trong khi toán tử “current-to-best/1” giúp đảm bảo tốc độ hội tụ của thuật toán được gia tăng bằng cách hướng dân số đến nghiệm tốt nhất trong quá trình tìm kiếm. Hai toán tử này sẽ được lựa chọn thích nghi dựa trên độ lệch tuyệt đối của hàm mục tiêu của cá thể tốt nhất và giá trị hàm mục tiêu trung bình của toàn bộ dân số ở thế hệ trước và được ký hiệu là *delta*. Giá trị *delta* được xác định như sau:

$$delta = \left| \frac{f_{\text{mean}}}{f_{\text{best}}} - 1 \right| \quad (2.60)$$

ở đó  $f_{\text{best}}$  là giá trị hàm mục tiêu của cá thể tốt nhất và  $f_{\text{mean}}$  là giá trị hàm mục tiêu trung bình của toàn bộ dân số. Cơ chế đột biến này được mô tả như sau:

```

if (  $\delta > \text{threshold}$  )
    % sử dụng toán tử “rand/1”
     $\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_{r_1} + F \times (\mathbf{x}_{r_2} - \mathbf{x}_{r_3})$ 
else (  $\delta \leq \text{threshold}$  )
    % sử dụng toán tử “current-to-best/1”
     $\mathbf{v}_i = \mathbf{x}_i + F \times (\mathbf{x}_{\text{best}} - \mathbf{x}_i) + F \times (\mathbf{x}_{r_2} - \mathbf{x}_{r_3})$ 
end

```

(2.61)

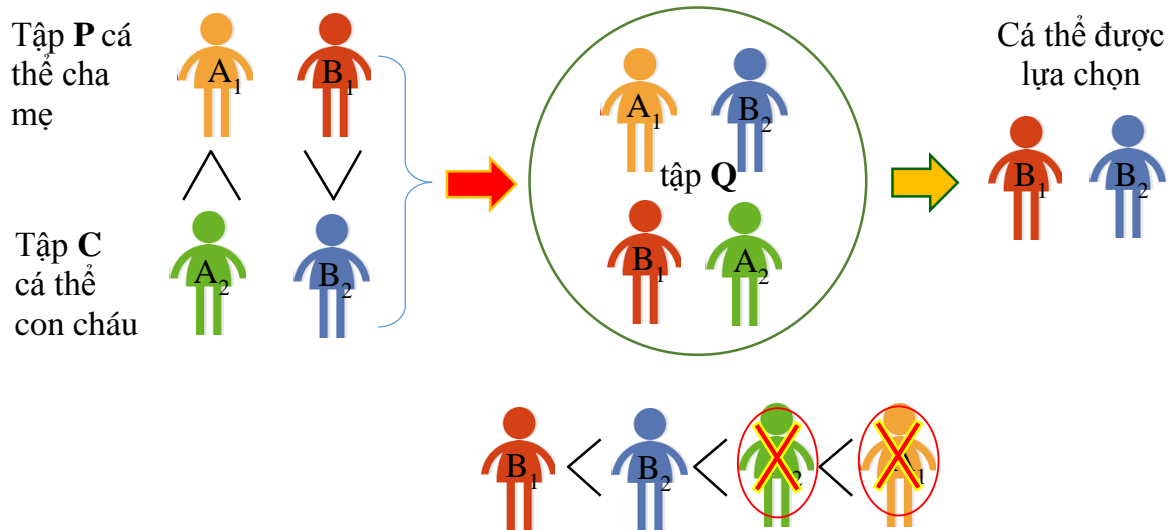
ở đó  $F$  là hệ số đột biến mà được tạo ngẫu nhiên trong đoạn từ  $[0.4, 1]$ ;  $\text{threshold}$  là giá trị tiêu chuẩn được chọn dựa trên tiêu chuẩn điều kiện dừng của thuật toán và thường được chọn là  $10^{-3}$  hoặc  $10^{-4}$  tùy thuộc mức độ phức tạp của bài toán.

Trong cơ chế đột biến ở trên, ứng với mỗi cá thể trong dân số, chỉ có một trong hai toán tử đột biến được sử dụng để tạo véc-tơ thử. Nếu giá trị của  $\delta$  lớn hơn  $\text{threshold}$ , toán tử đột biến “rand/1” được sử dụng. Ngược lại, toán tử current-to-best/1” sẽ được sử dụng. Có thể nhận thấy rằng, giá trị của  $\delta$  sẽ giảm dần qua các thế hệ trong suốt quá trình tìm kiếm và dẫn đến sự thay đổi trong quá trình thực hiện của hai toán tử đột biến. Ở những thế hệ đầu tiên, do sự phân kỳ của dân số thường lớn nên  $\delta$  thường lớn hơn  $\text{threshold}$  do đó toán tử “rand/1” sẽ được chọn. Tuy nhiên, sau nhiều thế hệ, sự phân kỳ của dân số sẽ dần ổn định và sẽ dẫn đến  $\delta$  nhỏ hơn  $\text{threshold}$  khi đó toán tử “current-to-best/1” sẽ được sử dụng. Như vậy với cơ chế đột biến này, khả năng tìm kiếm toàn cục cũng như khả năng khai thác các đặc tính tốt từ các cá thể ở dân số trước sẽ được cân bằng tốt hơn, dẫn đến thuật toán sẽ hội tụ nhanh hơn và có kết quả tốt hơn.

#### 2.4.6.2. Cải tiến quá trình lựa chọn

Theo cơ chế lựa chọn ở bước 4 ta thấy mỗi véc-tơ thử  $\mathbf{u}_i$  được tạo sau bước lai tạo sẽ được so sánh với véc-tơ  $\mathbf{x}_i$  ở thế hệ trước đó để chọn ra một cá thể tốt hơn cho thế hệ tiếp theo dựa trên giá trị hàm mục tiêu của chúng. Cơ chế này có thể làm mất đi những thông tin tốt từ những cá thể không được lựa chọn. Điều này là do những cá thể bị loại có thể không tốt khi so sánh với cá thể trong cặp so sánh của chúng nhưng so với toàn bộ cá thể trong dân số, nó vẫn có thể tốt hơn các cá thể khác. Vì vậy, để lưu giữ lại những cá thể này, luận văn sử dụng thuật toán lựa chọn trội được đề xuất bởi Padhye và cộng sự [34] thay cho quá trình lựa chọn cơ bản của thuật toán DE. Kỹ thuật lựa chọn

này được thực hiện như sau: đầu tiên, tập **C** đại diện cho dân số con cháu (mà bao gồm các cá thể sau khi lai tạo) sẽ được kết hợp với tập **P** đại diện cho dân số bố mẹ (mà bao gồm các cá thể được giữ lại ở thế hệ trước đó) để tạo thành tập **Q**. Sau đó  $NP$  cá thể tốt nhất từ tập **Q** sẽ được chọn cho thế hệ tiếp theo. Bằng cách này những cá thể tốt nhất ở cả hai thế hệ sẽ được lưu giữ lại cho thế hệ tiếp theo và nhờ điều này thuật toán sẽ hội tụ nhanh hơn. Mô tả chi tiết cho quá trình lựa chọn trội được thể hiện ở Hình 2.16.



Hình 2.16. Mô tả quá trình lựa chọn trội.

#### 2.4.7. Xử lý biến thiết kế rời rạc

Thuật toán tiến hóa DE được Storn và Price [24] đề xuất để giải các bài toán tối ưu với biến thiết kế là biến liên tục. Tuy nhiên, trong thực tế do những qui định kỹ thuật trong thiết kế và sản xuất, các bài toán thiết kế thường có cả biến liên tục, biến nguyên và biến rời rạc. Các giá trị thiết kế thường được quy định theo tiêu chuẩn và được tích hợp trong các mô-đun có sẵn của nhà thiết kế nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho việc thay thế, sửa chữa khi có sự cố hoặc sửa chữa bảo dưỡng định kỳ. Vì vậy, việc cải tiến, thay đổi các thuật toán tối ưu phù hợp với từng loại bài toán khác nhau là một trong những yêu cầu cần thiết đặt ra cho người thiết kế cũng như các nhà nghiên cứu. Một số nghiên cứu tiêu biểu về việc xử lý biến thiết kế cho các giải thuật tối ưu tìm kiếm trực tiếp có thể được kể đến như: xử lý biến nguyên và biến rời rạc cho giải thuật mô phỏng luyện kim SA (Simulated Annealing) [35]; xử lý biến nguyên và biến rời rạc cho giải thuật di truyền GA [36]; xử lý biến rời rạc, biến nguyên và biến liên tục cho giải thuật chiến lược tiến hóa ES (Evolution Strategy) [37]; xử lý biến nguyên, biến rời rạc và biến thực cho

giải thuật PSO (Particle Swarm Optimization) [38]; xử lý biến nhị phân và biến thực cho giải thuật DE [39]; v.v.

Trong luận văn này để xử lý đồng thời thiết kế liên tục và rời rạc, một kỹ thuật làm tròn đơn giản được trình bày bởi Kaveh và Mahdavi [40] sẽ được sử dụng để làm tròn các giá trị biến thiết kế được tạo ra sau khi kết thúc quá trình lai tạo ở thuật toán DE cải tiến. Kỹ thuật này được mô tả như sau:

$$\mathbf{x}_i^{\text{discrete}} = \text{fix}(\mathbf{x}_i^{\text{continuous}}) \quad (2.62)$$

trong đó  $\text{fix}(\mathbf{x})$  là một hàm làm tròn, cho phép làm tròn những giá trị diện tích trong véc-tơ sau khi lai tạo đến giá trị gần nhất trong tập các giá trị diện tích rời rạc.

Như vậy, với kỹ thuật làm tròn này, kết quả tối ưu đạt được khi quá trình tìm kiếm kết thúc sẽ là những giá trị rời rạc được chuẩn hóa trong các tập có sẵn của nhà thiết kế. Chú ý rằng đối với bài toán có cả biến thiết kế rời rạc và biến liên tục, thì chỉ có biến thiết kế rời rạc mới áp dụng công thức này, còn đối với biến liên tục vẫn giữ nguyên sau khi lai tạo.

### Chương 3

## KẾT QUẢ SỐ

Trong chương này, bài toán tối ưu hoá cho kết cấu dầm composite (trục hướng) chịu ràng buộc tần số sẽ được thành lập và giải. Mô hình dầm khảo sát được tham khảo từ Liu [11]. Dầm gồm có 8 lớp đối xứng với chiều dài  $l = 14.4\text{m}$ , chiều dày  $h = 0.48\text{m}$ , chiều rộng  $b = 0.3\text{m}$ . Góc hướng sợi của mỗi lớp được xét trong hai trường hợp thiết kế khác nhau bao gồm  $[0/90/45/-45]_s$  và  $[45/0/90/-45]_s$ . Dầm thuộc kết cấu dầm mỏng với tỉ lệ chiều dài trên chiều dày là  $l/h = 30$ . Dầm được thiết kế ban đầu với chiều dày của mỗi lớp là  $0.06\text{m}$ . Dầm được làm từ vật liệu nền QY9511 và vật liệu sợi T800H với các thuộc tính vật liệu được cho như sau:

- Mô đun đàn hồi của vật liệu cốt sợi:  $E_f = 294 \text{ GPa}$ ;
- Mô đun đàn hồi của vật liệu nền:  $E_m = 4.2 \text{ GPa}$ ;
- Hệ số poisson của vật liệu cốt sợi:  $\nu_f = 0.2$ ;
- Hệ số poisson của vật liệu nền:  $\nu_m = 0.3$ ;
- Khối lượng riêng của vật liệu sợi  $\rho_f = 1.81 \text{ g/cm}^3$ ;
- Khối lượng riêng của vật liệu nền  $\rho_m = 1.24 \text{ g/cm}^3$ ;

Kết cấu dầm được khảo sát với nhiều điều kiện biên khác nhau bao gồm:

- ❖ Dầm tựa đơn hai đầu **H-H** (Hinge-Hinge);
- ❖ Dầm ngàm hai đầu **C-C** (Clamp- Clamp);
- ❖ Dầm một đầu ngàm một đầu tự do **C-F** (Clamp-Free);
- ❖ Dầm một đầu ngàm một đầu tựa đơn **C-H** (Clamp-Hinge).

Để đánh giá độ tin cậy của lời giải số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn cũng như tính hiệu quả của các thuật toán tối ưu hoá, các kết quả số trình bày trong chương này sẽ được chia làm ba phần như sau:

- Phần 1 sẽ so sánh kết quả phân tích dầm với nhiều điều kiện biên khác nhau bằng phương pháp phần tử hữu hạn với lời giải giải tích của Liu [11];
- Phần 2 sẽ giải bài toán tối ưu hoá kết cấu dầm chỉ với biến thiết kế là phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi  $r_f$  với nhiều điều kiện biên khác nhau. Để giải bài toán này cả hai phương pháp tối ưu hoá DE và aeDE đều được sử dụng. Kết quả tối ưu đạt được của hai phương pháp sẽ được so sánh với kết quả đã được công bố bởi Liu [11];



➤ Phần 3 sẽ giải bài toán tối ưu hoá kết cấu dầm với đồng thời cả hai loại biến thiết kế là tỉ lệ phần trăm thể tích  $r_f$  và chiều dày  $t_f$  của mỗi lớp, trong đó  $r_f$  là biến liên tục và chịu ràng buộc theo các điều kiện chế tạo và  $t_f$  là biến rời rạc được giả sử thuộc một tập hợp mô đun có sẵn của nhà thiết kế. Cũng như ở phần 2, trong mục này, cả hai phương pháp tối ưu DE và aeDE cũng sẽ được áp dụng để tìm kiếm nghiệm tối ưu của bài toán với nhiều điều kiện biên khác nhau. Hiệu quả của việc giải bài toán với cả hai loại biến thiết kế đồng thời, cũng như hiệu quả của cả hai thuật toán được khảo sát sẽ được so sánh đánh giá với kết quả thiết kế tối ưu của bài toán ở phần 2.

### 3.1. So sánh kết quả phân tích ứng xử của dầm composite

Trong mục này, phương pháp phần tử hữu hạn cho kết dầm Euler-Bernoulli như được trình bày ở **mục 2.2.1** sẽ được áp dụng để phân tích ứng xử cho kết cấu dầm với nhiều điều kiện biên khác nhau. Kết quả phân tích đạt được bởi phương pháp phần tử hữu hạn FEM (Finite Element Method) và kết quả của lời giải giải tích đạt được bởi Liu [11] được trình bày ở Bảng 3.1.

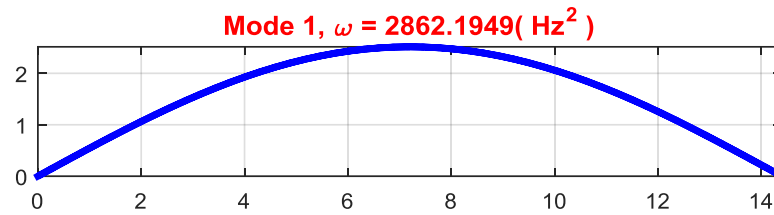
Bảng 3.1. Kết quả phân tích dầm với các điều kiện biên khác nhau.

Điều kiện biên	Phương pháp	Giá trị tần số dao động của 4 mode đầu tiên			
		1	2	3	4
<b>H-H</b>	FEM luận văn	2862	45797	231876	733102
	Liu [1]	2862	45795	231838	732722
	Sai số %	0	0.004	0.016	0.052
<b>C-C</b>	FEM luận văn	14708	111769	429645	1174653
	Liu [1]	14708	111761	429514	1173680
	Sai số %	0	0.007	0.030	0.083
<b>C-F</b>	FEM luận văn	363	14266	111858	429633
	Liu [1]	363	14266	111848	429503
	Sai số %	0	0.000	0.009	0.030
<b>C-H</b>	FEM luận văn	6985	73359	319398	934420
	Liu [1]	6985	73355	319324	933803
	Sai số %	0	0.005	0.023	0.066

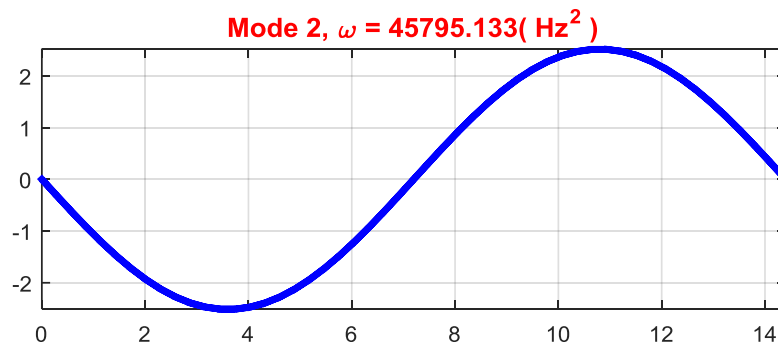
Kết quả đạt được ở Bảng 3.1. chỉ ra rằng phương pháp số sử dụng trong luận văn cho kết quả rất gần với kết quả của Liu [11]. Sai số lớn nhất giữa hai phương pháp chỉ

0.83%. Điều này chỉ ra rằng phương pháp phân tử hữu hạn sử dụng trong luận văn là phù hợp và có độ tin cậy cao.

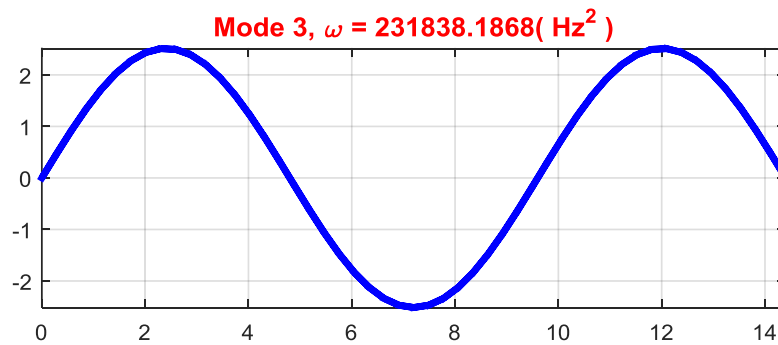
Hình 3.1. đến Hình 3.4. thể hiện dạng dao động của bốn mode đầu tiên của dầm ở các điều kiện biên khác nhau.



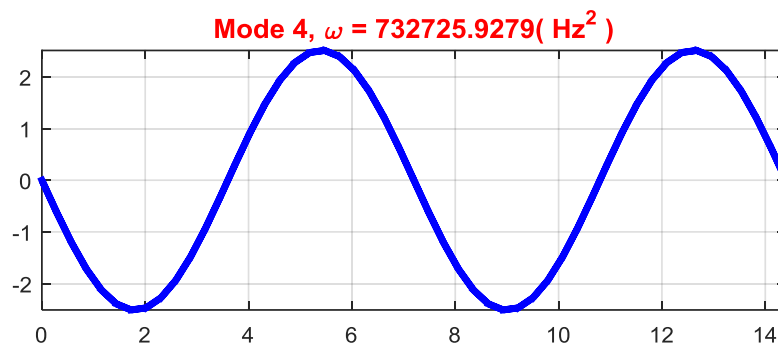
a) Mode 1



b) Mode 2

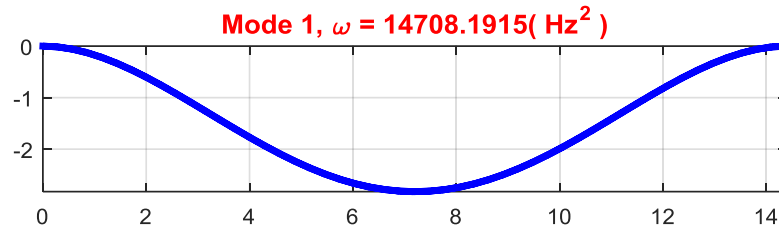


c) Mode 3

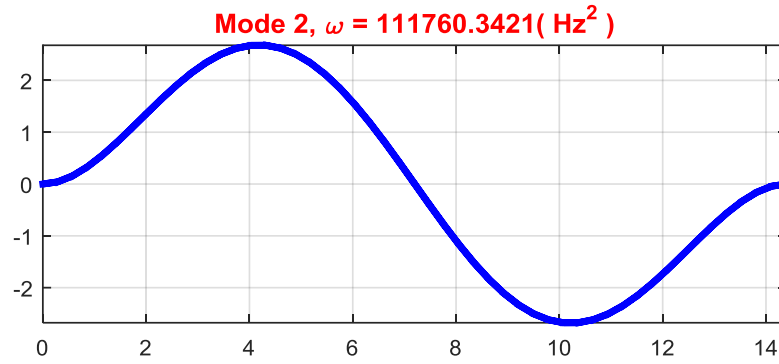


d) Mode 4

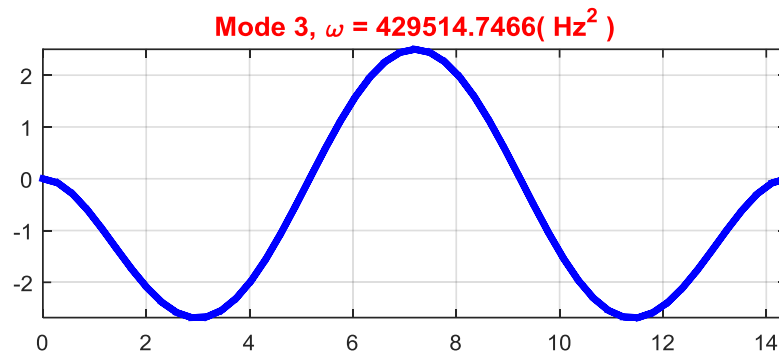
Hình 3.1. Dạng dao động của 4 mode đầu tiên của dầm tựa đơn hai đầu.



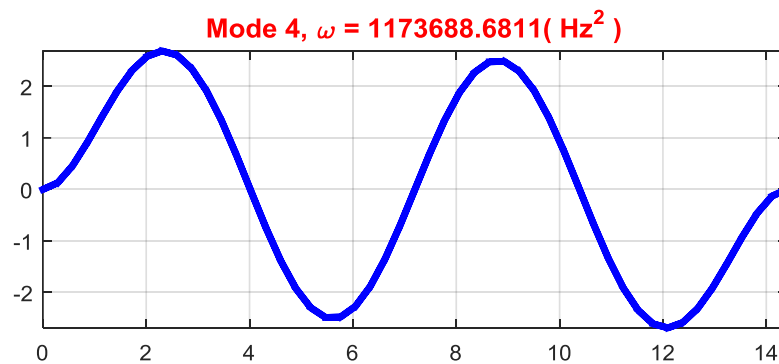
a) Mode 1



b) Mode 2

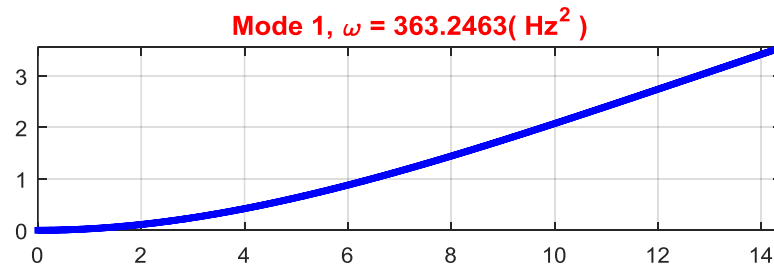


c) Mode 3

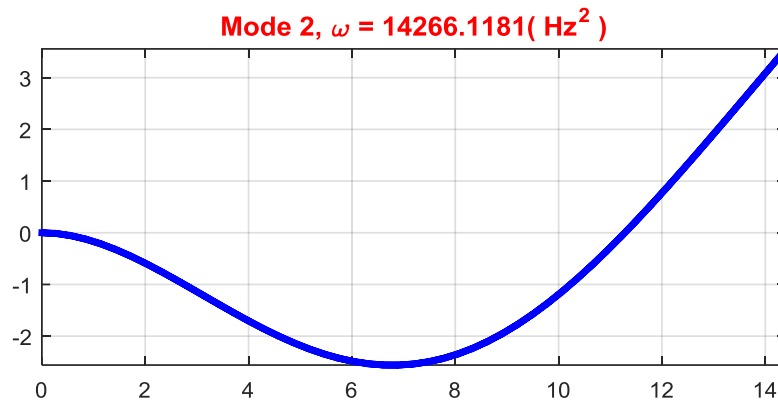


d) Mode 4

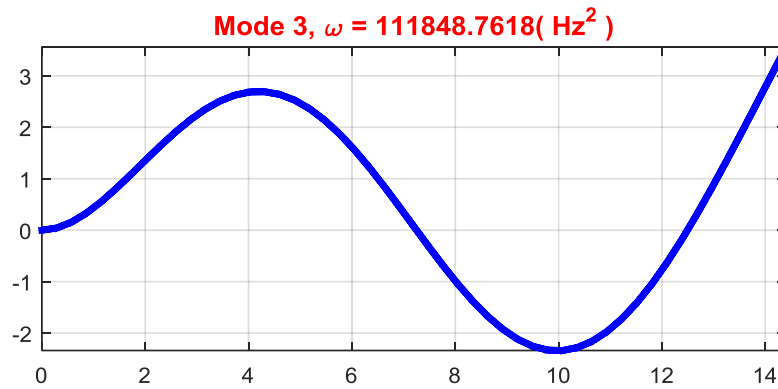
Hình 3.2. Dạng dao động của 4 mode đầu tiên của dầm ngàm hai đầu.



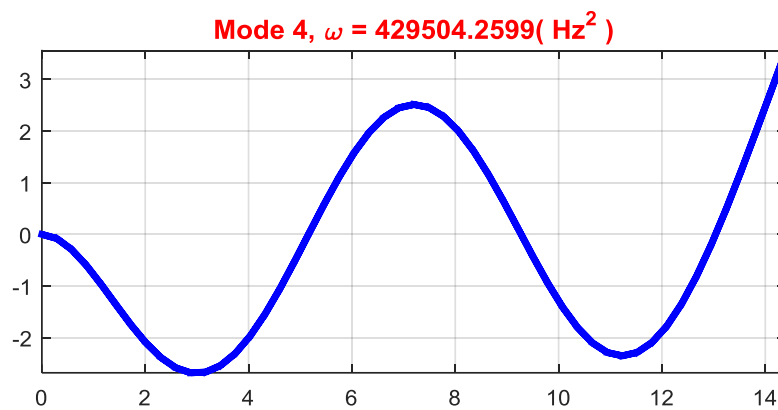
a) Mode 1



b) Mode 2

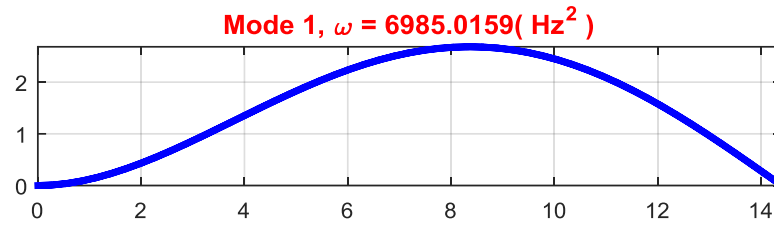


c) Mode 3

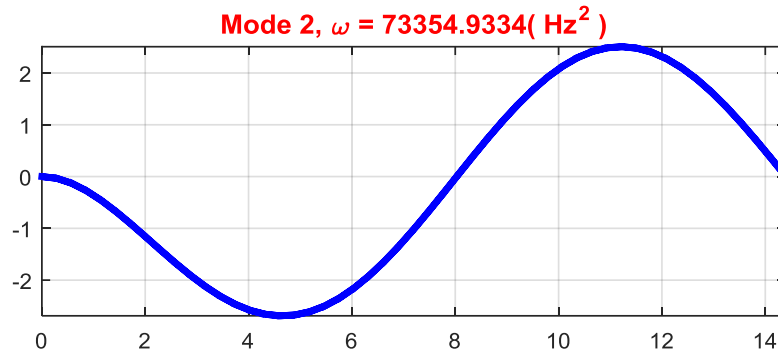


d) Mode 4

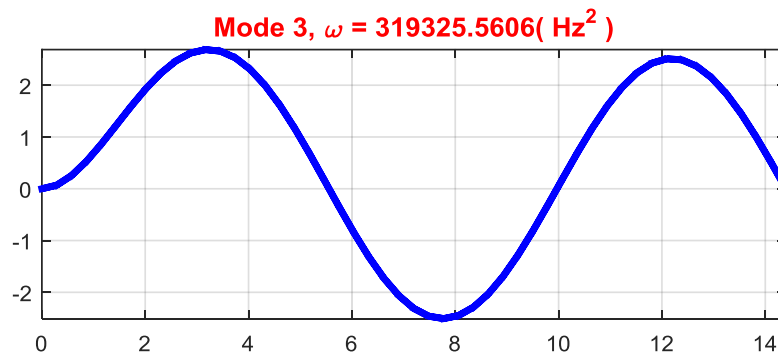
Hình 3.3. Dạng dao động của 4 mode đầu tiên của dầm một đầu ngàm và một đầu tự do.



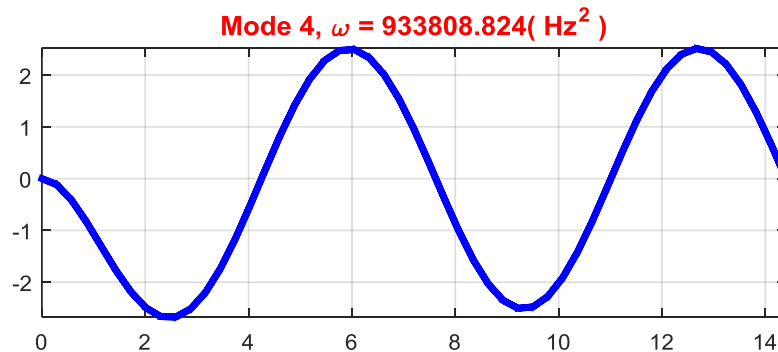
a) Mode 1



b) Mode 2



c) Mode 3



d) Mode 4

Hình 3.4. Dạng dao động của 4 mode đầu tiên của dầm một đầu ngàm và một đầu tự do.

Kết quả ở các hình chỉ ra rằng tần số dao động của dầm có sự thay đổi đáng kể khi điều kiện biên của dầm thay đổi, trong đó dầm có điều kiện biên một đầu ngàm và một đầu tự do có tần số thấp nhất và dầm hai đầu ngàm có tần số lớn nhất.

### 3.2. Thiết kế tối ưu chỉ với biến thiết kế $r_f$

Trong phần này, bài toán tối ưu hóa cho dầm chỉ với một loại biến thiết kế là tỉ lệ phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi  $r_f$  được khảo sát. Tất cả các thông số bài toán và điều kiện biên của dầm được thiết lập giống với nghiên cứu của Liu [11], trong đó ràng buộc của biến  $r_f$  chưa xét đến điều kiện chế tạo và chịu ràng buộc trong khoảng  $0 \leq r_f \leq 1$ . Hai trường hợp thiết kế của dầm với góc hướng sợi khác nhau bao gồm [0/90/45/-45]s và [45/0/90/-45]s được khảo sát. Cho mỗi điều kiện biên của dầm, ràng buộc tần số của bài toán tối ưu đều được xét ở hai trường hợp khác nhau. Kết quả tối ưu của tất cả các bài toán đạt được bởi phương pháp giải trong luận văn đều được so sánh với các kết quả đã được nghiên cứu trước đó bởi Liu [11].

#### 3.2.1. Dầm composite với góc hướng sợi [0/90/45/-45]s

Do giải thuật tối ưu hóa DE và aeDE là những giải thuật tìm kiếm ngẫu nhiên, nên kết quả của bài toán sau mỗi lần chạy sẽ không duy nhất và có sự thay đổi. Vì vậy, để đánh giá độ tin cậy cũng như độ ổn định của phương pháp, mỗi bài toán tối ưu sẽ được chạy năm lần độc lập và tất cả các kết quả đạt được sẽ được tính toán thống kê. Sau đó, kết quả tốt nhất của năm lần chạy sẽ được trình bày khi so sánh với các kết quả đã được nghiên cứu trước đó bởi Liu [11].

Kết quả thống kê của bài toán đạt được bởi DE và aeDE cho năm lần chạy khác nhau được trình bày ở Bảng 3.2. Kết quả ở Bảng 3.2. cho thấy rằng cả hai phương pháp DE và aeDE đều cho kết quả rất giống nhau và ổn định với độ lệch chuẩn rất thấp. Mặc dù, độ lệch chuẩn của phương pháp aeDE lớn hơn DE, nhưng sự chênh lệch này không đáng kể. Hơn nữa, phương pháp aeDE luôn cho chi phí tính toán thấp hơn rất nhiều so với phương pháp DE. Số lần phân tích ứng xử kết cấu của phương pháp aeDE chỉ xấp xỉ 1/3 số lần phân tích ứng xử kết cấu của phương pháp DE. Điều này cho thấy aeDE là một phương pháp tối ưu hiệu quả.

Bảng 3.2. Kết quả thống kê đạt được bởi phương pháp DE và aeDE.

Điều kiện biên	Ràng buộc tần số $\omega$	Phương pháp	Khối lượng tốt nhất	Khối lượng xấu nhất	Khối lượng trung bình	Độ lệch chuẩn	Số lần phân tích trung bình
<b>H-H</b>	400	DE	2582.276	2582.282	2582.278	0.003	5076
		aeDE	2582.277	2582.285	2582.280	0.003	1596
	5652	DE	3023.188	3023.190	3023.189	0.001	6052
		aeDE	3023.191	3023.269	3023.212	0.002	2464
<b>C-C</b>	10000	DE	2657.509	2657.511	2657.510	0.001	5756
		aeDE	2657.512	2657.526	2657.516	0.006	1680
	28900	DE	3023.116	3023.119	3023.117	0.001	6180
		aeDE	3023.117	3023.135	3023.123	0.007	2160
<b>C-F</b>	400	DE	2721.041	2721.045	2721.043	0.001	4996
		aeDE	2721.045	2721.059	2721.053	0.006	1588
	729	DE	3030.838	3030.841	3030.839	0.002	6140
		aeDE	3030.847	3032.393	3031.165	0.007	2396
<b>C-H</b>	2500	DE	2611.863	2611.867	2611.865	0.002	5108
		aeDE	2611.863	2611.880	2611.871	0.006	1536
	13225	DE	2853.415	2853.421	2853.417	0.002	5436
		aeDE	2853.415	2853.432	2853.421	0.008	1625

Kết quả thiết kế tối ưu của  $r_f$  và khối lượng tối ưu tương ứng của các bài toán được trình bày chi tiết trong Bảng 3.3. và có sự so sánh với các kết quả tối ưu đạt được bởi Liu [11]. Từ kết quả đạt được ở Bảng 3.3., ta có thể nhận thấy rằng cả hai phương pháp DE và aeDE đều cho kết quả rất tốt so với kết quả của Liu [11]. Ở một số điều kiện biên, cả hai phương pháp DE và aeDE đều cho kết quả tốt hơn kết quả của Liu [11]. Cụ thể, ở trường hợp dầm tựa đơn hai đầu, cho trường hợp ràng buộc tần số đầu tiên  $\omega = 400$ , cả ba phương pháp đều cho kết quả khối lượng tối ưu giống nhau là 2582kg. Tuy nhiên ở ràng buộc tần số thứ hai  $\omega = 5652$ , kết quả tối ưu đạt được bởi DE và aeDE cho kết quả tốt hơn với 3023kg trong khi phương pháp của Liu [11] là 3133kg. Tương tự cho các điều kiện biên còn lại, ở điều kiện ràng buộc tần số thứ hai (ràng buộc tần số cao), kết quả đạt được bởi DE và aeDE cũng luôn cho kết quả nhỏ hơn. Kết quả này cũng cho thấy rằng phương pháp của Liu [11] còn gặp nhiều hạn chế khi giải bài toán tối ưu với điều kiện ràng buộc tần số cao. So sánh giữa DE và aeDE, kết quả cũng chỉ ra rằng phương pháp cải tiến aeDE luôn có chi phí tính toán thấp. Số lần phân tích kết cấu của phương pháp cải tiến aeDE xấp xỉ chỉ bằng 1/3 so với số lần phân tích kết cấu của phương pháp DE.

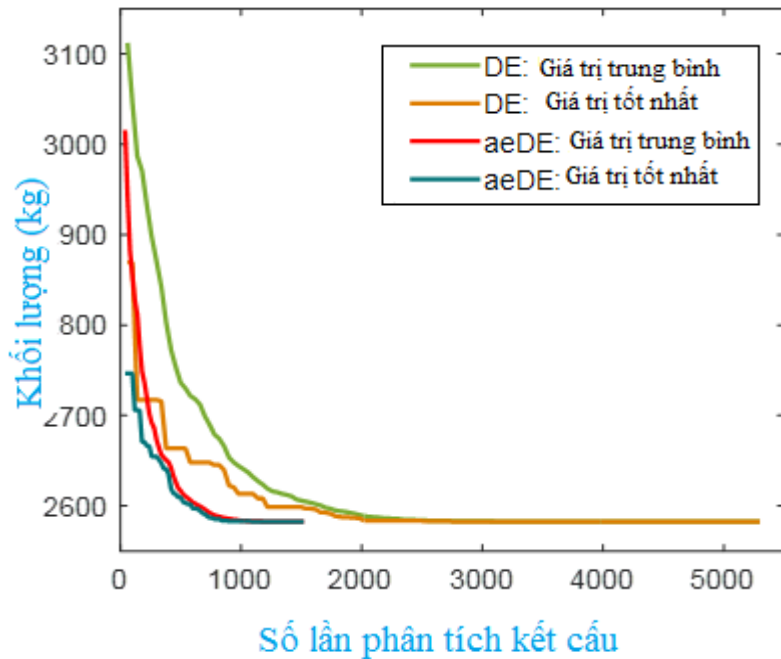
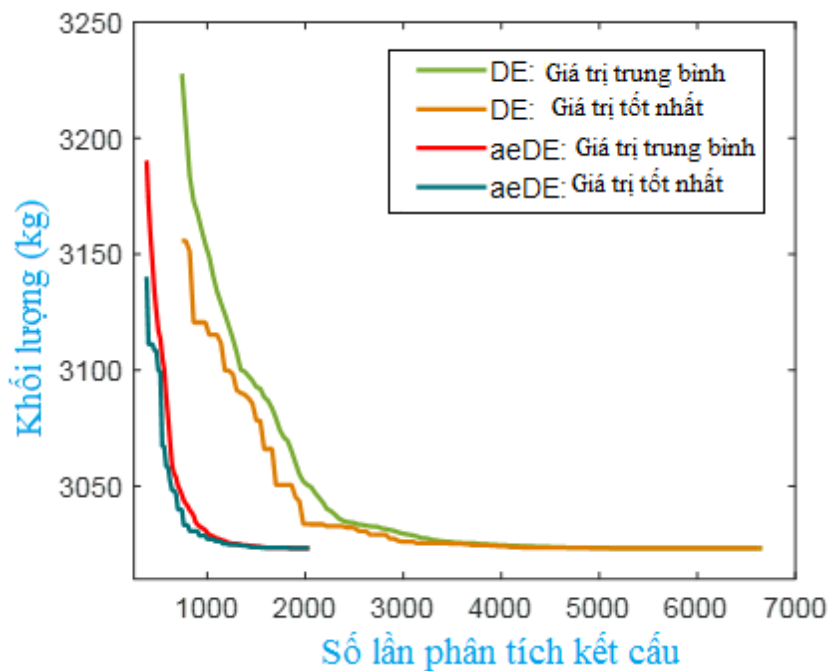


Bảng 3.3. Kết quả tối ưu của bài toán đạt được bởi phương pháp DE, aeDE và Liu [11].

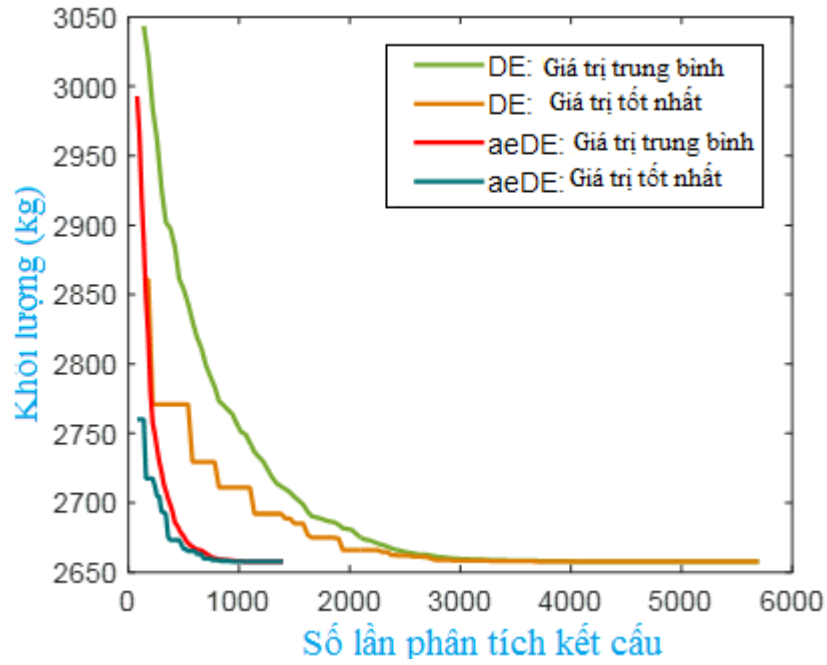
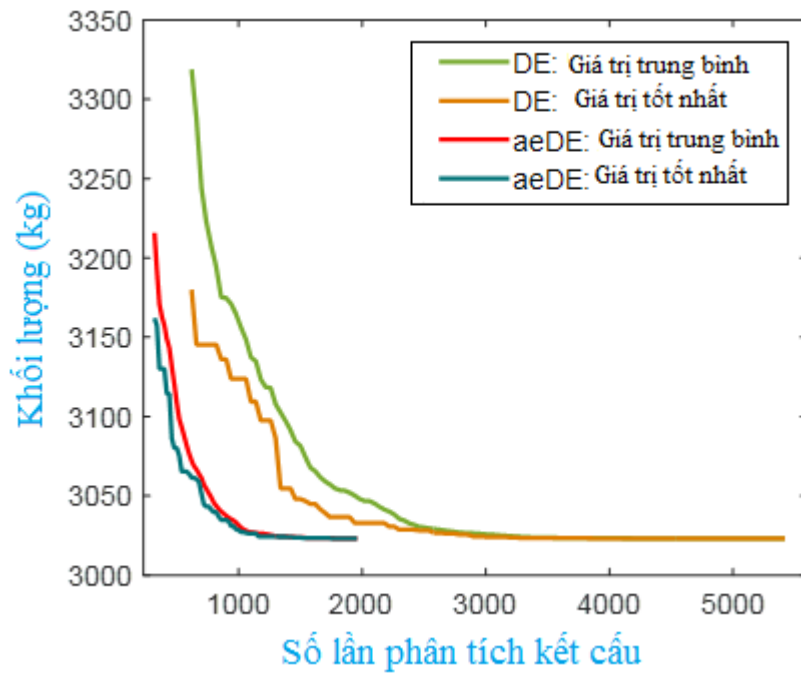
Điều kiện biên	Ràng buộc tần số $\omega$	Phương pháp	Biến phân trăm thể tích $r_f$ (%)				Khối lượng (kg)	Số lần phân tích kết cấu
			$r_f^{(1)}$	$r_f^{(2)}$	$r_f^{(3)}$	$r_f^{(4)}$		
<b>H-H</b>	400	DE	3.7	0	0	0	2582.276	5380
		aeDE	3.7	0	0	0	2582.277	1540
		Liu [11]	3.7	0	0	0	2582	-
	5652	DE	52.9	100	0	0	3023.188	6260
		aeDE	52.9	100	0	0	3023.191	2260
		Liu [11]	90.1	0	100	0	3133	-
<b>C-C</b>	10000	DE	29.2	0	0	0	2657.509	5900
		aeDE	29.2	0	0	0	2657.512	1740
		Liu [11]	29.2	0	0	0	2658	-
	28900	DE	52.9	100	0	0	3023.116	6220
		aeDE	52.9	100	0	0	3023.117	2600
		Liu [11]	90.1	0	100	0	3133	-
<b>C-F</b>	400	DE	50.7	0	0	0	2721.041	5580
		aeDE	50.7	0	0	0	2721.045	1540
		Liu [11]	50.7	0	0	0	2721	-
	729	DE	55.5	100	0	0	3030.838	5180
		aeDE	55.5	100	0	0	3030.847	2480



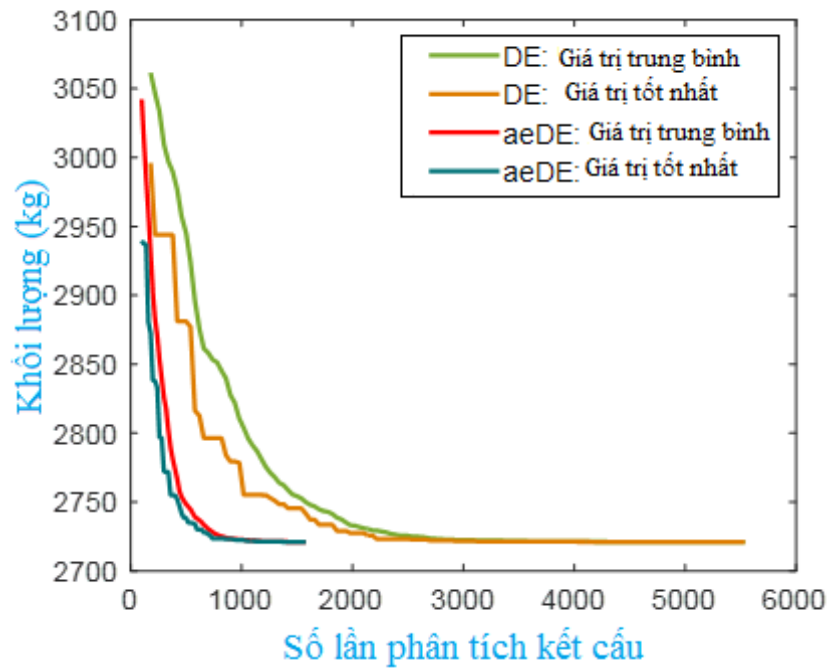
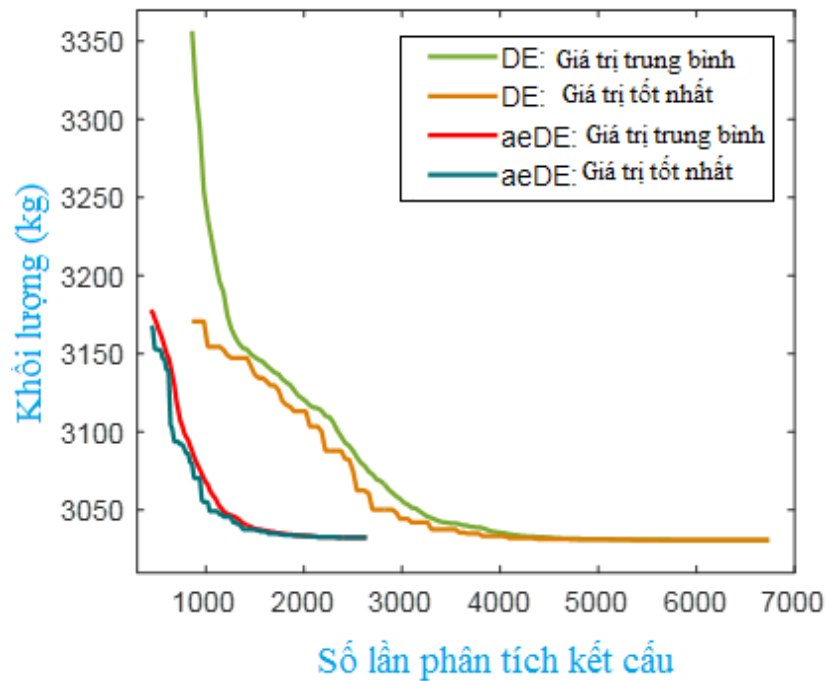
Hình 3.5 đến Hình 3.8 so sánh lịch sử hội tụ của cả hai phương pháp khi giải các bài toán tối ưu cho kết cấu dầm với các điều kiện biên khác nhau. Các kết quả chỉ ra rằng phương pháp cải tiến aeDE luôn có tốc độ hội tụ tốt hơn so với phương pháp DE. Kết quả này cho thấy rằng phương pháp aeDE là phương pháp hiệu quả khi được áp dụng để giải bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm với biến thiết kế phần trăm thể tích giữa vật liệu nền và sợi.

a)  $\omega = 400$ b)  $\omega = 5625$ 

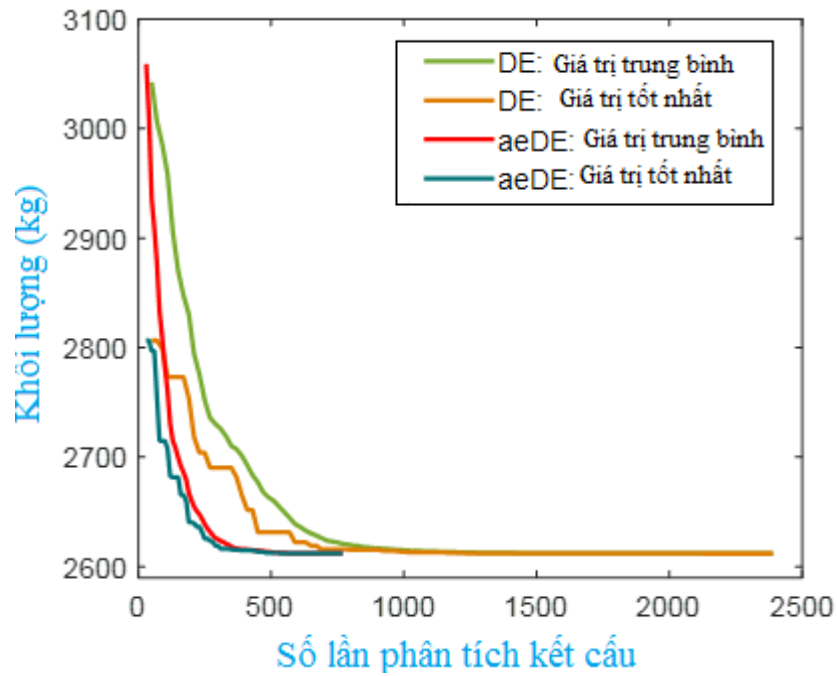
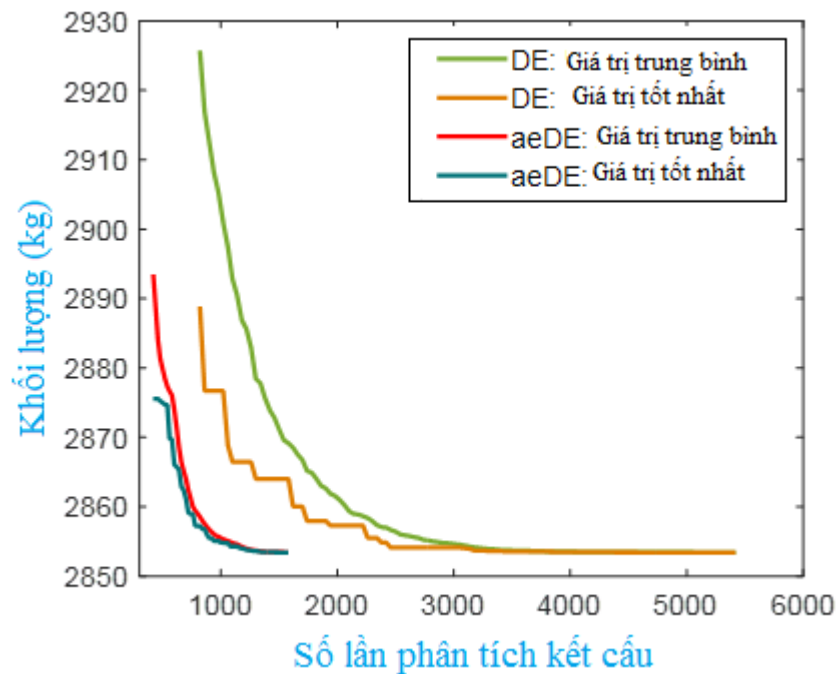
Hình 3.5. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán tựa đơn hai đầu).

a)  $\omega = 10000$ b)  $\omega = 28900$ 

Hình 3.6. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán ngàm hai đầu).

a)  $\omega = 400$ b)  $\omega = 729$ 

Hình 3.7. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngàm một đầu tự do).

a)  $\omega = 2500$ b)  $\omega = 13225$ 

Hình 3.8. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngàm một đầu tựa đơn).

### 3.2.2. Dầm composite với góc hướng sợi [45/0/90/-45]<sub>s</sub>

Tương tự ở trường hợp bài toán với góc hướng sợi [45/0/90/-45]<sub>s</sub>, để đánh giá độ tin cậy cũng như độ ổn định của phương pháp, mỗi bài toán toán tối ưu cũng được chạy năm lần độc lập và tất cả các kết quả đạt được đều được tính toán thống kê.

Kết quả thống kê của bài toán đạt được bởi DE và aeDE cho năm lần chạy khác nhau được trình bày ở Bảng 3.4. Kết quả ở Bảng 3.4 cũng cho thấy rằng cả hai phương pháp DE và aeDE đều cho kết quả rất giống nhau và ổn định với độ lệch chuẩn rất thấp. Mặc dù, độ lệch chuẩn của phương pháp aeDE lớn hơn DE, nhưng sự chênh lệch này cũng không đáng kể, trong khi đó chi phí tính toán của phương pháp aeDE luôn thấp hơn so với phương pháp DE. Số lần phân tích ứng xử kết cấu của phương pháp aeDE chỉ xấp xỉ 1/3 số lần phân tích ứng xử kết cấu của phương pháp DE. Điều này một lần nữa cho thấy aeDE là một phương pháp tối ưu hiệu quả.

Bảng 3.4. Kết quả thống kê đạt được bởi phương pháp DE và aeDE.

Điều kiện biên	Ràng buộc tần số $\omega$	Phương pháp	Khối lượng tốt nhất	Khối lượng xấu nhất	Khối lượng trung bình	Độ lệch chuẩn	Số lần phân tích kết cấu
<b>H-H</b>	400	DE	2592.903	2592.907	2592.905	0.002	5756
		aeDE	2592.905	2592.912	2592.909	0.003	1544
	3600	DE	2862.908	2862.913	2862.910	0.002	4868
		aeDE	2862.910	2862.923	2862.914	0.005	1604
<b>C-C</b>	10000	DE	2748.408	2748.413	2748.410	0.002	5852
		aeDE	2748.409	2748.417	2748.411	0.003	1620
	16900	DE	2861.589	2861.592	2861.590	0.001	4868
		aeDE	2861.592	2861.600	2861.596	0.003	2435
<b>C-F</b>	400	DE	2860.862	2914.415	2882.283	29.331	5828
		aeDE	2860.863	2914.560	2882.320	29.365	1920
	900	DE	3069.627	3069.630	3069.628	0.001	5852
		aeDE	3069.629	3069.917	3069.715	0.136	2005
<b>C-H</b>	2500	DE	2652.450	2652.457	2652.453	0.003	5852
		aeDE	2652.450	2652.461	2652.454	0.004	1812
	16900	DE	3044.015	3044.019	3044.017	0.001	6828
		aeDE	3044.018	3044.309	3044.087	0.126	2252



Kết quả thiết kế tối ưu chi tiết của các bài toán bởi hai phương pháp DE và aeDE cùng với các kết quả tối ưu đạt được bởi Liu [11] được trình bày ở Bảng 3.5. Kết quả trong Bảng 3.5 cũng cho thấy rằng cả hai phương pháp DE và aeDE đều cho kết quả rất tốt so với kết quả của Liu [11]. Ở một số trường hợp thiết kế với ràng buộc tần số cao, cả hai phương pháp DE và aeDE đều cho kết quả tốt hơn kết quả của Liu [11]. Cụ thể, ở trường hợp dầm tựa đơn hai đầu, cho trường hợp ràng buộc tần số đầu tiên  $\omega = 400$ , cả ba phương pháp đều cho kết quả khối lượng tối ưu gần giống nhau là 2592kg. Tuy nhiên ở ràng buộc tần số thứ hai  $\omega = 3600$ , kết quả tối ưu đạt được bởi DE và aeDE cho kết quả tốt hơn với 2862kg trong khi phương pháp của Liu [11] là 3030kg. Và tương tự cho các điều kiện biên còn lại, ở điều kiện ràng buộc tần số thứ hai (ràng buộc tần số cao), kết quả đạt được bởi DE và aeDE cũng luôn cho kết quả trọng lượng tối ưu tốt hơn. Từ kết quả này, một lần nữa có thể nhận thấy rằng phương pháp của Liu [11] còn gặp nhiều hạn chế khi giải bài toán tối ưu với điều kiện ràng buộc tần số cao. So sánh giữa DE và aeDE, kết quả luôn chỉ ra rằng phương pháp cải tiến aeDE luôn có chi phí tính toán thấp hơn số lần phân tích kết cấu của phương pháp aeDE xấp xỉ chỉ bằng 1/3 số lần phân tích kết cấu của phương pháp DE.

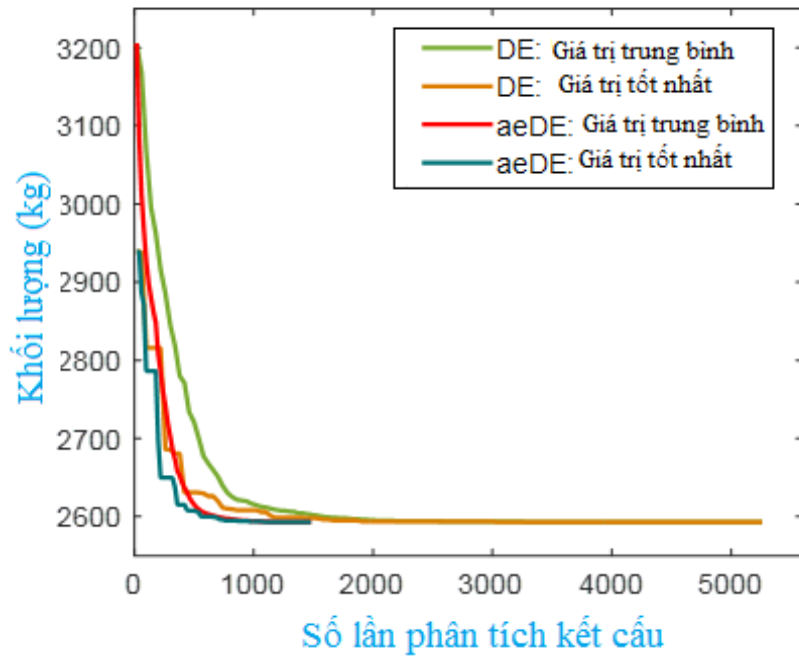
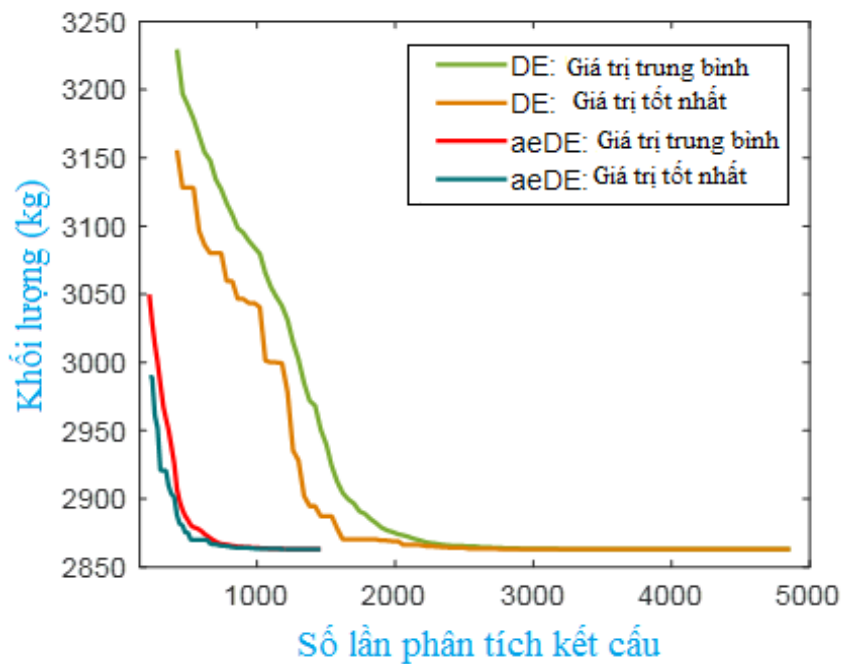
Bảng 3.5. Kết quả tối ưu của bài toán đạt được bởi phương pháp DE, aeDE và Liu [11].

Điều kiện biên	Ràng buộc tần số $\omega$	Phương pháp	Biên phần trăm thể tích $r_f$ (%)				Khối lượng (kg)	Số lần phân tích kết cấu
			$r_f^{(1)}$	$r_f^{(2)}$	$r_f^{(3)}$	$r_f^{(4)}$		
<b>H-H</b>	400	DE	0	7.3	0	0	2592.903	5100
		aeDE	0	7.3	0	0	2592.905	1660
		Liu [11]	0	7.3	0	0	2593	-
	3600	DE	98.7	0	0	0	2862.908	4820
		aeDE	98.7	0	0	0	2862.91	1700
		Liu [11]	55.3	100	0	0	3030	-
<b>C-C</b>	10000	DE	0	59.9	0	0	2748.408	5980
		aeDE	0	59.9	0	0	2748.409	1420
		Liu [11]	0	59.9	0	0	2748	-
	16900	DE	98.3	0	0	0	2861.588	5020
		aeDE	98.3	0	0	0	2861.591	1460
		Liu [11]	28.1	100	0	0	2950	-
<b>C-F</b>	400	DE	98	0	0	0	2860.862	5180
		aeDE	98	0	0	0	2860.863	1900

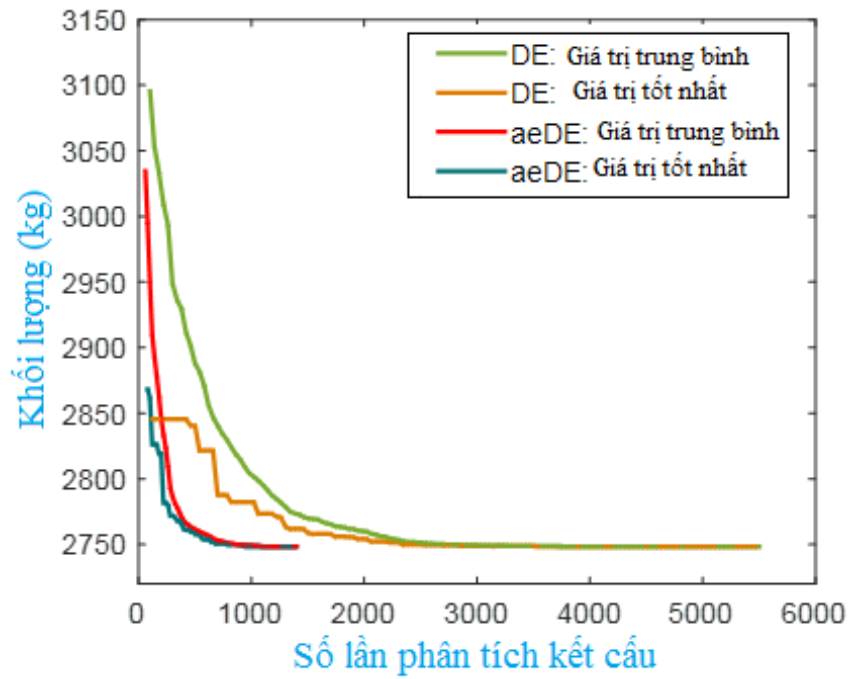
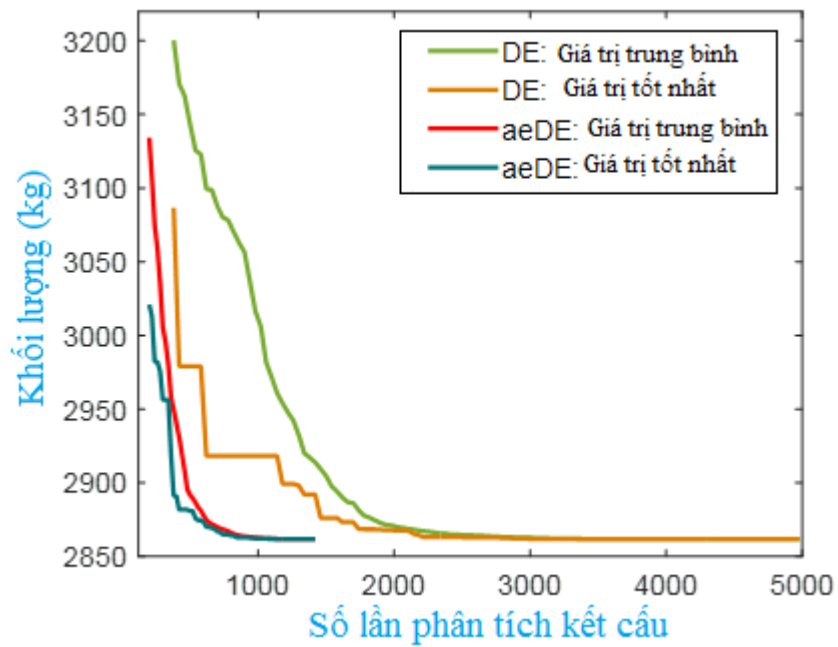
		Liu [11]	16	100	0	0	2914	-
		DE	100	68.7	0	0	3069.627	5420
	900	aeDE	100	68.7	0	0	3069.629	1800
		Liu [11]	100	69	0	0	3070	-
		DE	0	27.5	0	0	2652.45	6220
	2500	aeDE	0	27.5	0	0	2652.45	1560
		Liu [11]	0	27	0	0	2652	-
		DE	100	60	0	0	3044.015	6660
	16900	aeDE	100	60	0	0	3044.018	2340
		Liu [11]	100	60	0	0	3044	-

**C-H**

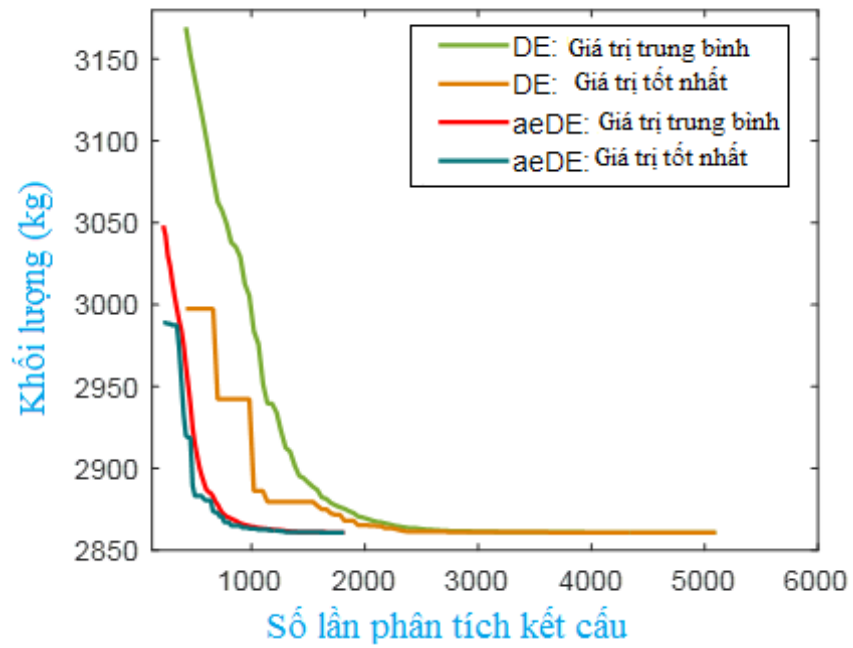
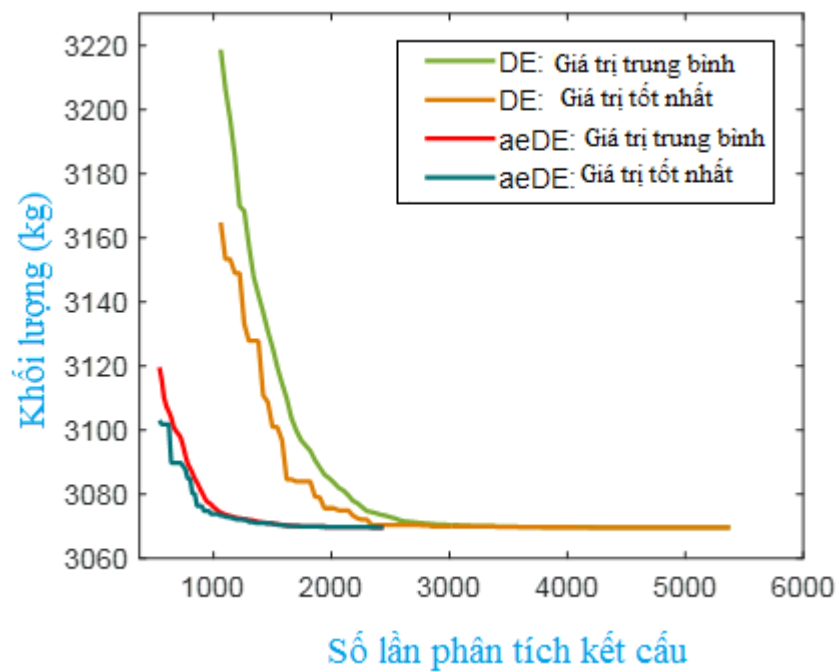
Lịch sử hội tụ của cả hai phương pháp DE và aeDE khi giải các bài toán tối ưu cho kết cấu dầm với các điều kiện biên khác nhau được thể hiện ở Hình 3.9 đến Hình 3.12. Các kết quả một lần nữa chỉ ra rằng phương pháp cải tiến aeDE luôn có tốc độ hội tụ tốt hơn rất nhiều so với phương pháp DE. Kết quả này một lần nữa cho thấy aeDE là một lựa chọn tốt để giải bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm với biên thiết kế phần trăm thể tích.

a)  $\omega = 400$ b)  $\omega = 3600$ 

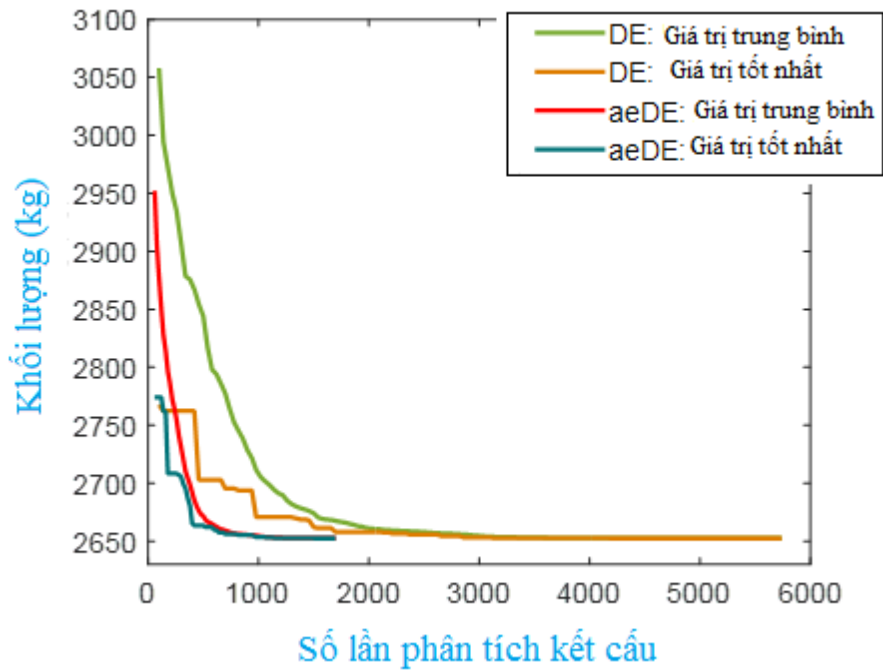
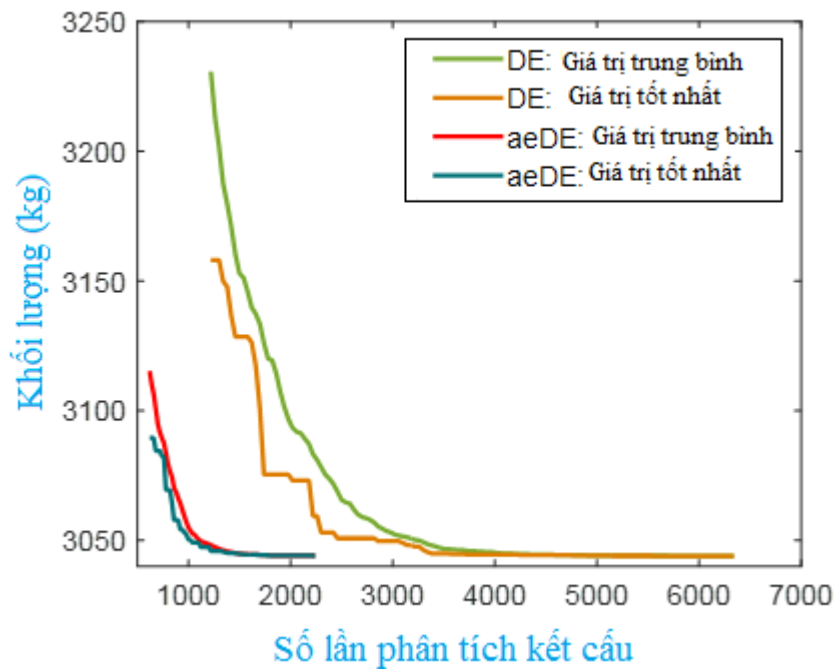
Hình 3.9. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán tựa đơn hai đầu).

a)  $\omega = 10000$ b)  $\omega = 16900$ 

Hình 3.10. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán ngầm hai đầu).

a)  $\omega = 400$ b)  $\omega = 900$ 

Hình 3.11. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngàm một đầu tự do).

a)  $\omega = 2500$ b)  $\omega = 16900$ 

Hình 3.12. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tựa đơn).

### 3.3. Thiết kế tối ưu với biến $r_f$ và biến chiều dày $t_f$ đồng thời

Trong phần này, bài toán tối ưu hóa cho dầm với hai loại biến thiết kế đồng thời là tỉ lệ phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi  $r_f$  và chiều dày của mỗi lớp  $t_f$  được khảo

sát. Các bài toán này là nghiên cứu mở rộng của Liu [11], khi biến chiều dày của các lớp được khảo sát và ràng buộc về điều kiện chế tạo cũng được xem xét cho biến thiết kế  $r_f$  với  $0 \leq r_f \leq 0.9069$ . Hai trường hợp thiết kế khác nhau của góc hướng sợi bao gồm [0/90/45/-45]<sub>s</sub> và [45/0/90/-45]<sub>s</sub> cũng được xem xét và các thông số của bài toán cũng được thiết lập tương tự như các bài toán ở mục 3.2. Kết quả tối ưu đạt được của tất cả các bài toán sẽ được so sánh với các kết quả đạt được ở mục 3.2 nhằm đánh giá tính hiệu quả của việc xem xét bài toán tối ưu với biến thiết kế chiều dày của mỗi lớp.

### 3.3.1. Dầm composite với góc hướng sợi [0/90/45/-45]<sub>s</sub>

Do tính ổn định và độ tin cậy của phương pháp DE và aeDE đã được khảo sát ở mục 3.2, nên để ngắn gọn, mục này sẽ bỏ qua việc trình bày các kết quả thống kê.

Kết quả thiết kế tối ưu của  $r_f$  và  $t_f$  cùng với khối lượng tối ưu tương ứng của các bài toán được trình bày chi tiết trong Bảng 3.6. Từ kết quả đạt được ở Bảng 3.6, ta có thể nhận thấy rằng chiều dày của các lớp ảnh hưởng đáng kể lên kết quả thiết kế tối ưu. Khi xem xét chiều dày của các lớp như là những biến thiết kế, trọng lượng tối ưu của kết cấu giảm đi đáng kể. Cụ thể, ở trường hợp dầm tựa đơn hai đầu, cho trường hợp ràng buộc tần số đầu tiên  $\omega = 400$ , khối lượng tối ưu của bài toán khi chỉ có biến thiết kế  $r_f$  2582kg, tuy nhiên khi xét thêm chiều dày  $t_f$  là biến thiết kế thì khối lượng giảm xuống đáng kể chỉ còn 759kg (giảm 2/3 so với thiết kế ban đầu). Tương tự tất cả các trường hợp khảo sát còn lại khối lượng tối ưu của dầm cũng giảm xuống rất đáng kể. Với kết quả này, có thể nhận thấy rằng việc bố trí chiều dày của các lớp một cách hợp lý sẽ giúp kết cấu nhẹ hơn rất nhiều và các kỹ sư thiết kế có thể tiết kiệm một lượng đáng kể chi phí vật liệu.

So sánh tính hiệu quả trong việc giải bài toán tối ưu của cả hai phương pháp DE và aeDE, Bảng 3.6 cũng chỉ ra rằng với cùng một kết quả trọng lượng tương tự nhau, aeDE luôn cho kết quả tối ưu với chi phí tính toán thấp hơn rất nhiều so với DE.

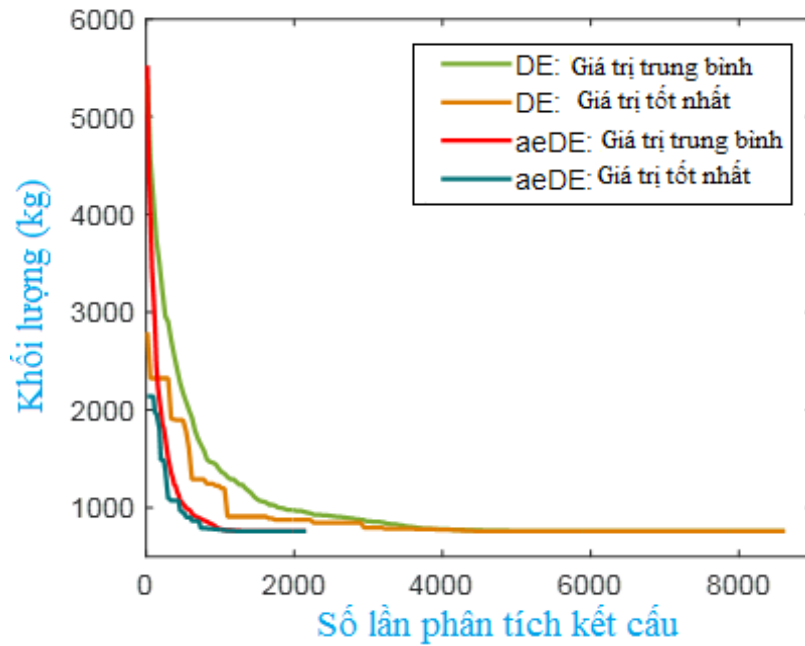


Bảng 3.6. Kết quả tối ưu của bài toán đạt được bởi phương pháp DE, aeDE và Liu [11].

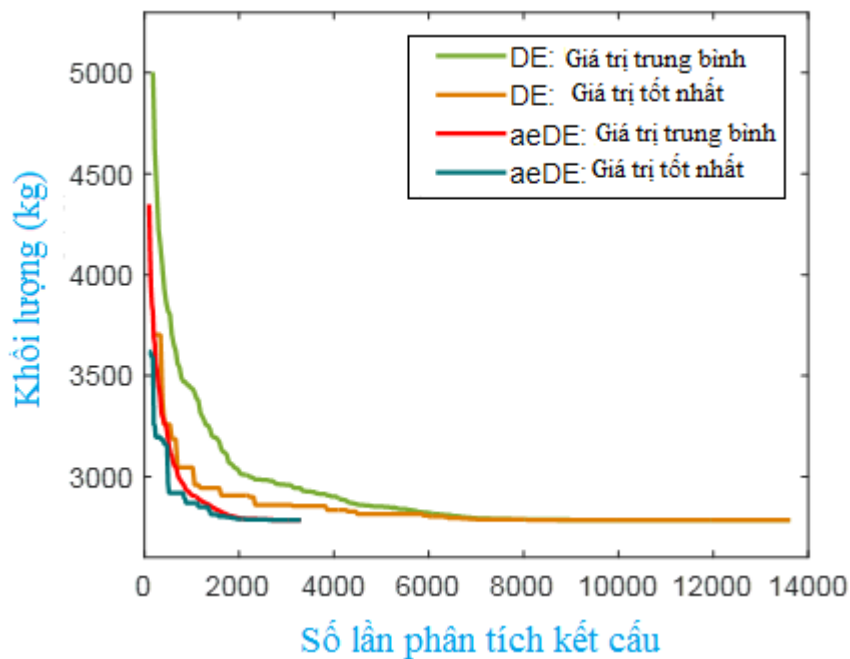
Điều kiện biên	Ràng buộc tần số $\omega$	Phương pháp	Biến phân trăm thể tích $r_f$ (%)				Biến thiết chiều dày $t_f$ (cm)				Khối lượng (kg)	Số lần phân tích kết cấu
			$r_f^{(1)}$	$r_f^{(2)}$	$r_f^{(3)}$	$r_f^{(4)}$	$t^{(1)}$	$t^{(2)}$	$t^{(3)}$	$t^{(4)}$		
H-H	400	DE	79.2	0	0	0	3	1	1	1	759.899	8660
		aeDE	79.2	0	0	0	3	1	1	1	759.905	2180
		Liu [11]	3.7	0	0	0	6	6	6	6	2582	-
	5652	DE	86.9	0	0	0	10	6	1	5	2785.088	13660
		aeDE	86.9	0	0	0	10	1	9	2	2785.090	3760
		Liu [11]	90.1	0	100	0	6	6	6	6	3133	-
C-C	10000	DE	85.4	0	0	0	6	2	1	4	1645.072	13500
		aeDE	85.4	0	0	0	6	3	1	3	1645.072	2260
		Liu [11]	29.2	0	0	0	6	6	6	6	2658	-
	28900	DE	86.9	0	0	0	10	1	6	5	2784.983	12300
		aeDE	86.9	0	0	0	10	2	1	9	2784.984	2780
		Liu [11]	90.1	0	100	0	6	6	6	6	3133	-
C-F	400	DE	83.9	0	0	0	7	4	2	4	2110.436	14420
		aeDE	83.9	0	0	0	7	8	1	1	2110.441	3020
		Liu [11]	50.7	0	0	0	6	6	6	6	2721	-
	729	DE	89.3	0	0	0	10	7	4	1	2796.660	12900
		aeDE	89.3	0	0	0	10	1	10	1	2796.663	3240
		Liu [11]	92.9	0	100	0	6	6	6	6	3141	-

<b>C-H</b>	2500	DE	78.7	0	0	0	4	3	1	2	1226.474	12140
		aeDE	78.7	0	0	0	4	3	1	2	1226.475	2980
		Liu [11]	13.7	0	0	0	6	6	6	6	2612	-
	13225	DE	88.9	0	0	0	11	4	1	5	2731.515	12020
		aeDE	88.9	0	0	0	11	8	1	1	2731.516	3000
		Liu [11]	85.4	100	0	0	6	6	6	6	3119	-

So sánh lịch sử hội tụ của hai phương pháp DE và aeDE cho các bài toán trong mục này được thể hiện ở Hình 3.13 đến Hình 3.16. Các kết quả cũng chỉ ra rằng phương pháp aeDE luôn có tốc độ hội tụ tốt hơn rất nhiều so với phương pháp DE.

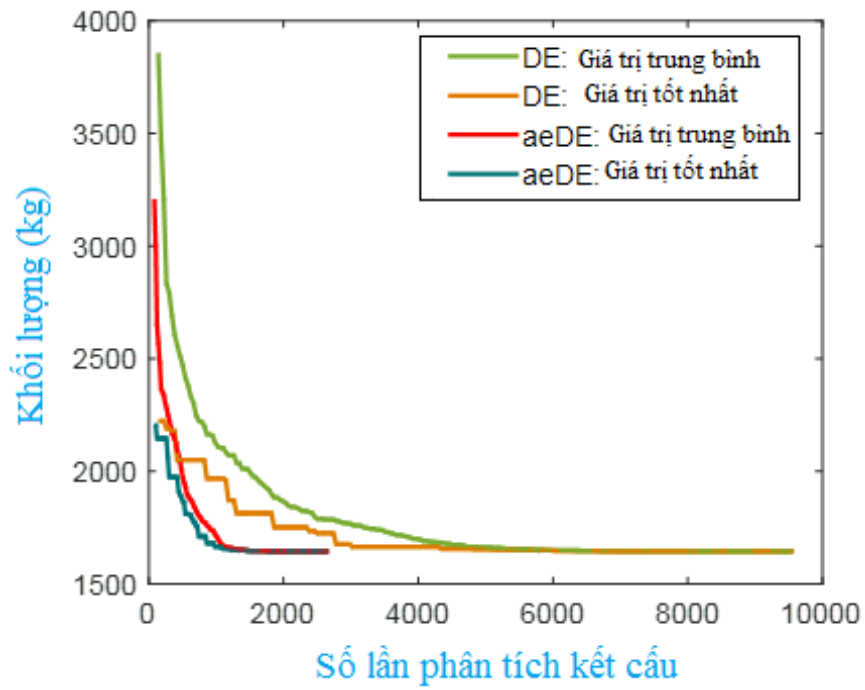


a)  $\omega = 400$

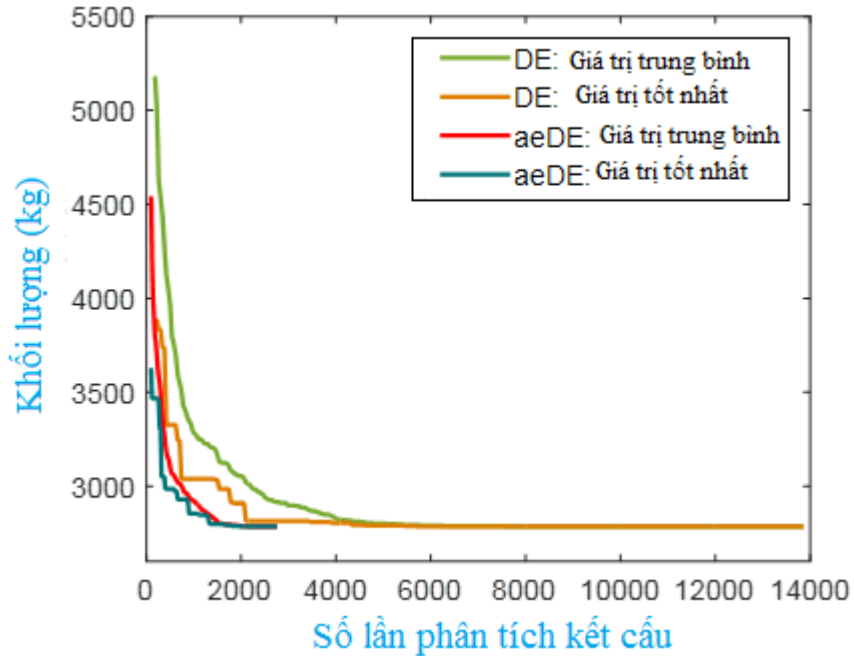


b)  $\omega = 5625$

Hình 3.13. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán tựa đơn hai đầu).

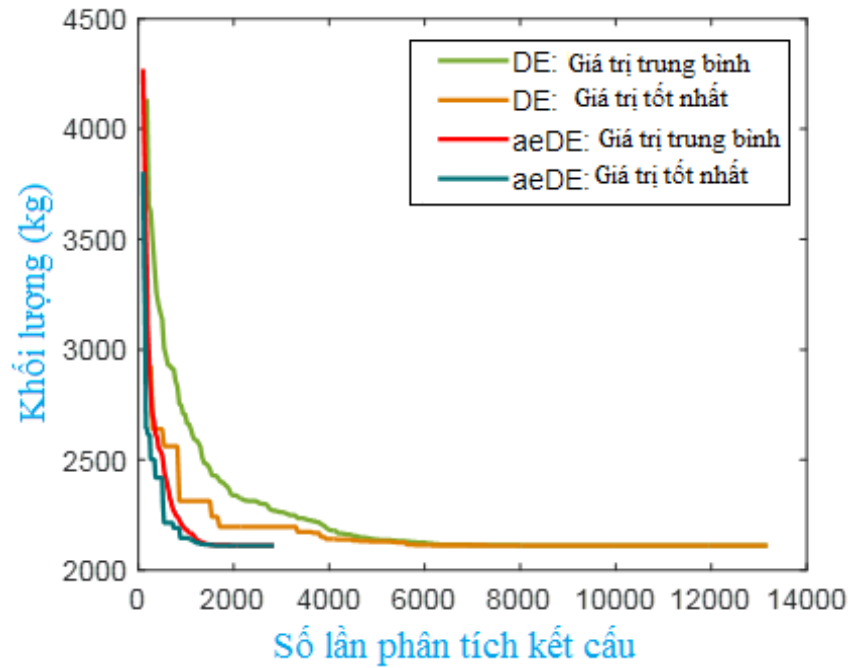
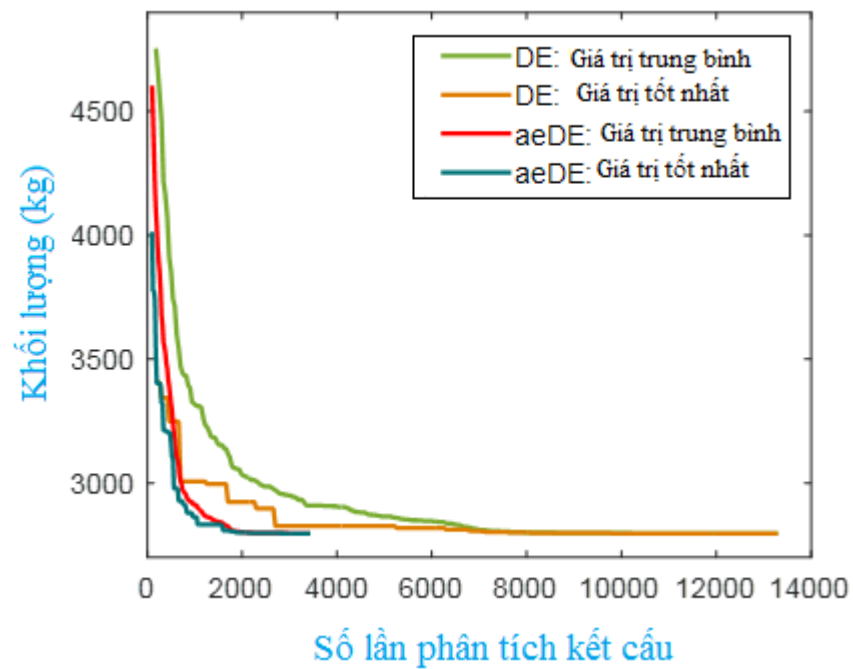


a)  $\omega = 10000$

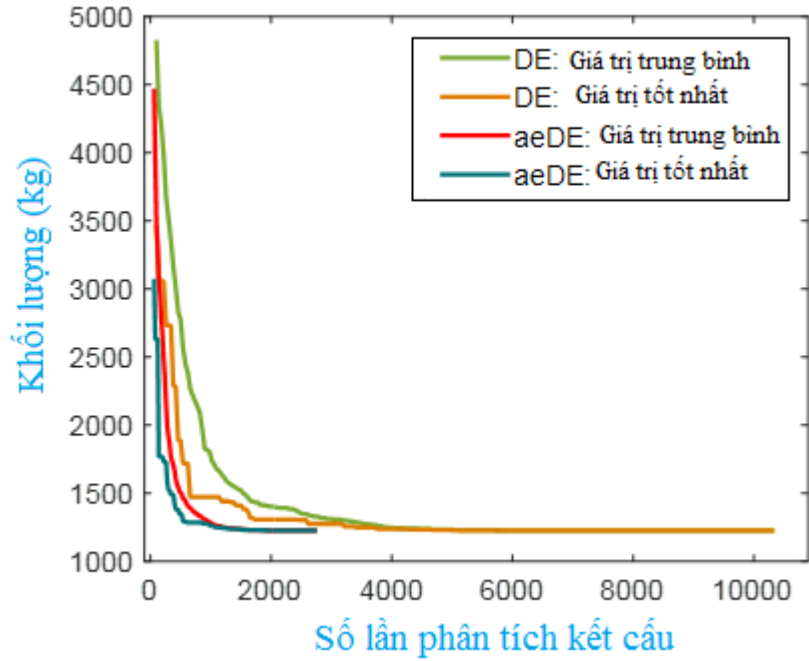
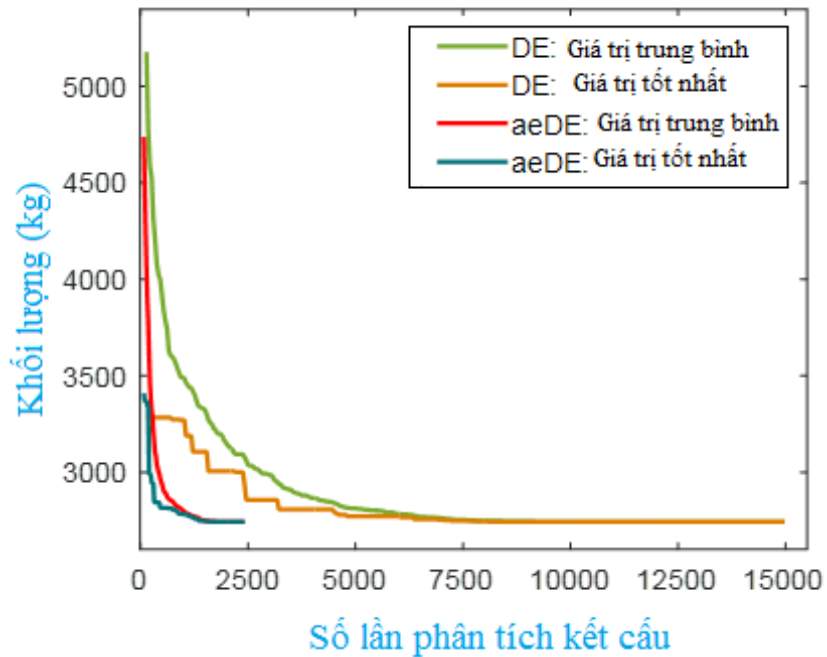


b)  $\omega = 28900$

Hình 3.14. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán ngầm hai đầu).

a)  $\omega = 400$ b)  $\omega = 729$ 

Hình 3.15. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngàm một đầu tự do).

a)  $\omega = 2500$ b)  $\omega = 13225$ 

Hình 3.16. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngàm một đầu tựa đơn).

### 3.2.2. Dầm composite với góc hướng sợi [45/0/90/-45]<sub>s</sub>

Kết quả thiết kế tối ưu của  $r_f$  và  $t_f$  cùng với khối lượng tối ưu tương ứng của các bài toán với góc hướng sợi [45/0/90/-45]<sub>s</sub> được trình bày chi tiết trong Bảng 3.7. Các kết quả đạt được ở Bảng 3.7 cũng cho thấy rằng chiều dày của các lớp ảnh hưởng đáng kể lên ứng xử của kết cấu và trọng lượng tối ưu của dầm. Khi xem xét chiều dày của các lớp  $t_f$  là biến thiết kế, trọng lượng tối ưu giảm đi đáng kể. Cụ thể, ở trường hợp dầm tựa đơn hai đầu, cho trường hợp ràng buộc tần số đầu tiên  $\omega = 400$ , khối lượng tối ưu của bài toán khi chỉ có biến thiết kế  $r_f$  là 2593kg, tuy nhiên khi xét thêm biến thiết kế chiều dày thì khối lượng giảm xuống đáng kể chỉ còn 888kg. Tương tự cho hầu hết các trường hợp khảo sát còn lại, khối lượng tối ưu của dầm cũng giảm xuống rất đáng kể. Tuy nhiên, ở trường hợp ràng buộc với tần số cao của dầm một đầu ngàm và một đầu tự do và dầm một đầu ngàm và một đầu tựa đơn, kết quả trọng lượng tối ưu khi xét đến biến thiết kế chiều dày  $t_f$  lại lớn hơn kết quả tối ưu khi không xét biến thiết kế chiều dày. Điều này là bởi vì ở các bài toán này, ràng buộc chế tạo được xem xét trên biến thiết kế  $r_f$  với  $0 \leq r_f \leq 0.968$ , trong khi ở bài toán ban đầu được khảo sát bởi Liu [11], điều kiện này không được xem xét và ràng buộc cho biến thiết kế  $r_f$  được khảo sát trong khoảng  $0 \leq r_f \leq 1$ . Trong trường hợp các bài toán được khảo sát cùng một điều kiện ràng buộc của biến thiết kế  $r_f$  thì kết quả trọng lượng tối ưu của bài toán khi xét đến biến thiết kế chiều dày sẽ nhỏ hơn đáng kể.

Như vậy, với các kết quả đạt được ở Bảng 3.7, một lần nữa có thể nhận thấy rằng chiều dày là một trong những biến thiết kế quan trọng giúp làm giảm đáng kể trọng lượng của kết cấu. Việc bố trí sắp xếp chiều dày của các lớp một cách hợp lý sẽ giúp việc thiết kế tiết kiệm đáng kể chi phí vật liệu.

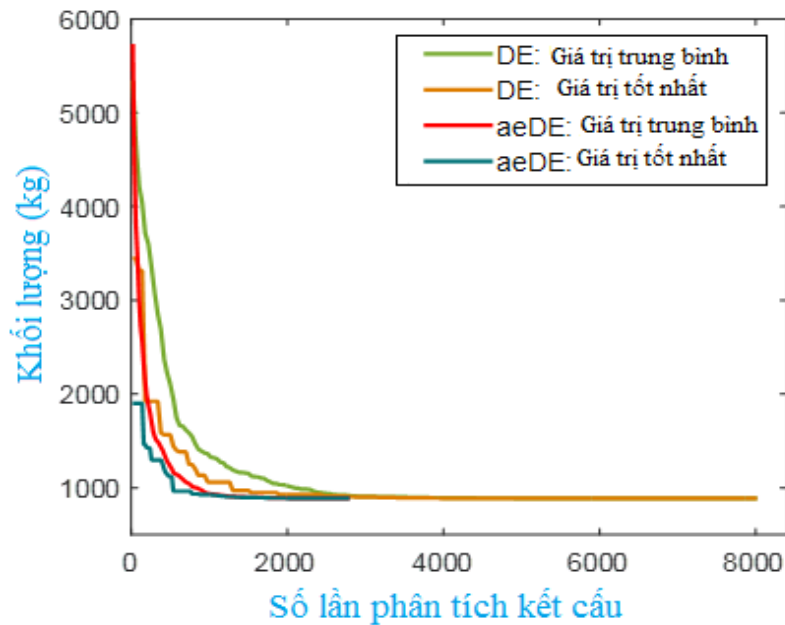
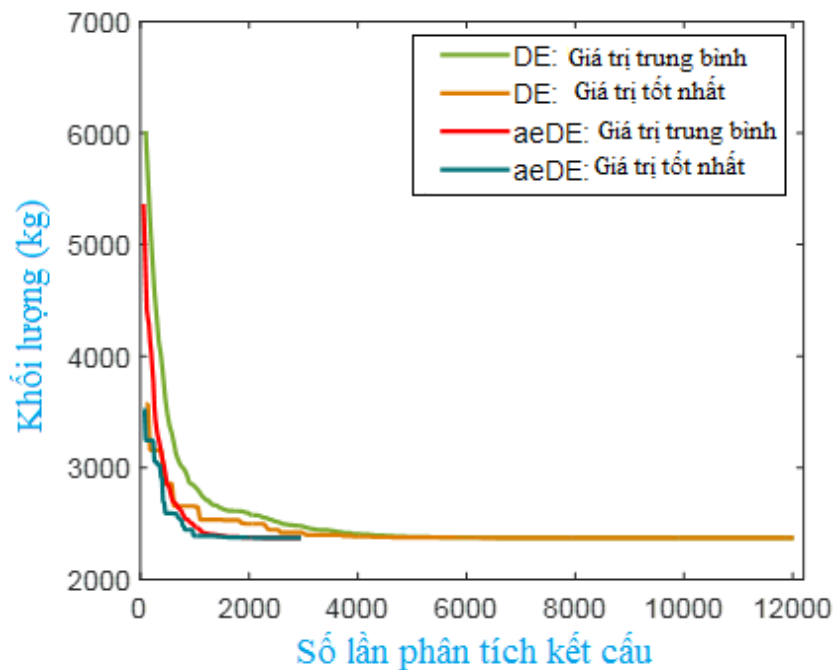
Bảng 3.7. Kết quả tối ưu của bài toán đạt được bởi phương pháp DE, aeDE và Liu [11].

Điều kiện biên	Ràng buộc tần số $\omega$	Phương pháp	Biến phần trăm thể tích $r_f$ (%)				Biến thiết chiều dày $t_f$ (cm)				Khối lượng (kg)	Số lần phân tích kết cấu
			$r_f^{(1)}$	$r_f^{(2)}$	$r_f^{(3)}$	$r_f^{(4)}$	$t^{(1)}$	$t^{(2)}$	$t^{(3)}$	$t^{(4)}$		
H-H	400	DE	9.4	90.7	0	0	1	3	2	1	888.589	10260
		aeDE	9.4	90.7	0	0	1	3	2	1	888.589	3000
		Liu [11]	0	7.3	0	0	6	6	6	6	2593	-
	3600	DE	47.9	90.7	0	0	1	7	7	4	2371.817	12060
		aeDE	47.9	90.7	0	0	1	7	3	8	2371.819	2980
		Liu [11]	55.3	100	0	0	6	6	6	6	3030	-
C-C	10000	DE	17.9	90.7	0	0	1	6	6	1	1776.719	10940
		aeDE	17.9	90.7	0	0	1	6	6	1	1776.719	3280
		Liu [11]	0	59.9	0	0	6	6	6	6	2748	-
	16900	DE	0.539	90.7	0	0	1	7	1	9	2267.657	11140
		aeDE	0.539	90.7	0	0	1	7	8	2	2267.656	2760
		Liu [11]	28.1	100	0	0	6	6	6	6	2950	-
C-F	400	DE	0	88.7	0	0	1	7	2	8	2234.372	12740
		aeDE	0	88.7	0	0	1	7	2	8	2234.374	2480
		Liu [11]	16	100	0	0	6	6	6	6	2914	-
	900	DE	60.8	90.7	0	0	1	10	9	6	3262.121	14740
		aeDE	60.8	90.7	0	0	1	10	14	1	3262.131	2860
		Liu [11]	100	69	0	0	6	6	6	6	3070	-

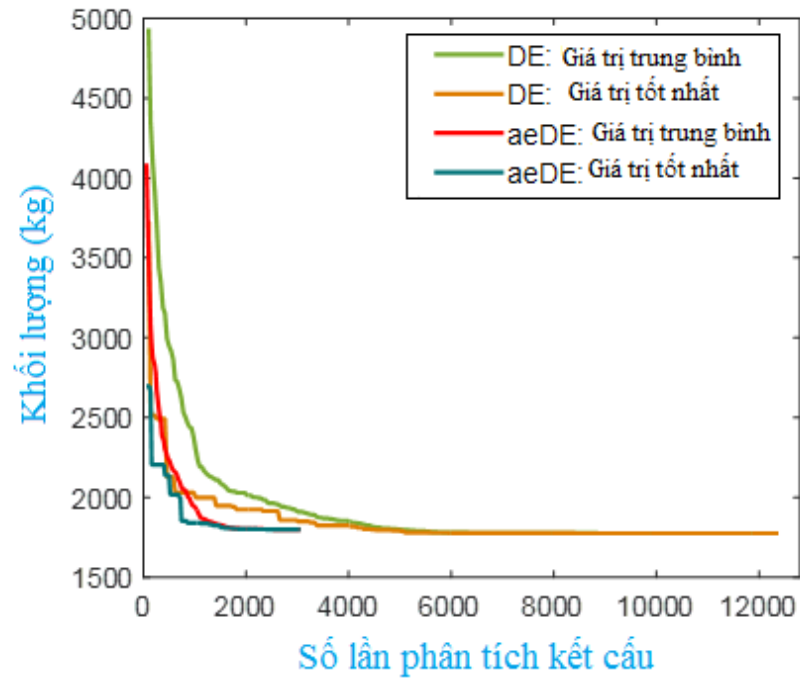
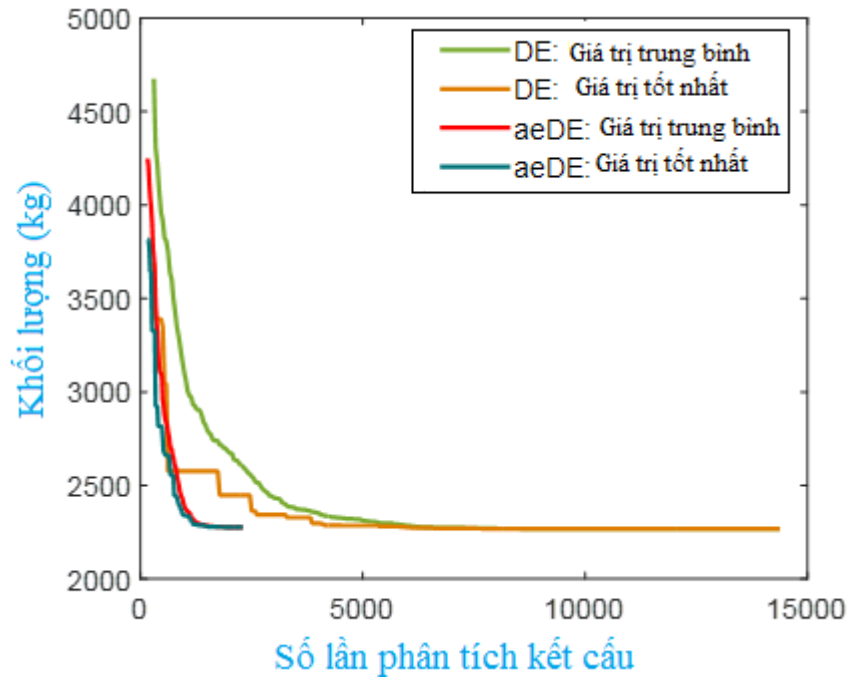


<b>C-H</b>	2500	DE	0	86.4	0	0	1	4	1	5	1348.796	11260
		aeDE	0	86.4	0	0	1	4	1	5	1348.796	2920
		Liu [11]	0	27	0	0	6	6	6	6	2652	-
	16900	DE	90.7	89.8	0	0	1	11	12	1	3209.496	10100
		aeDE	18.3	90.7	0	0	1	12	11	1	3223.364	3340
		Liu [11]	100	60	0	0	6	6	6	6	3044	-

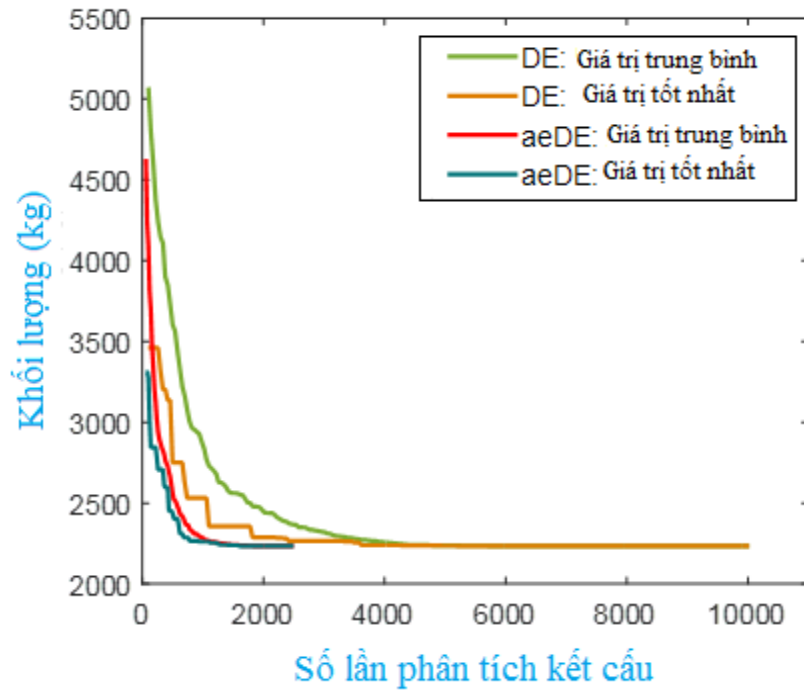
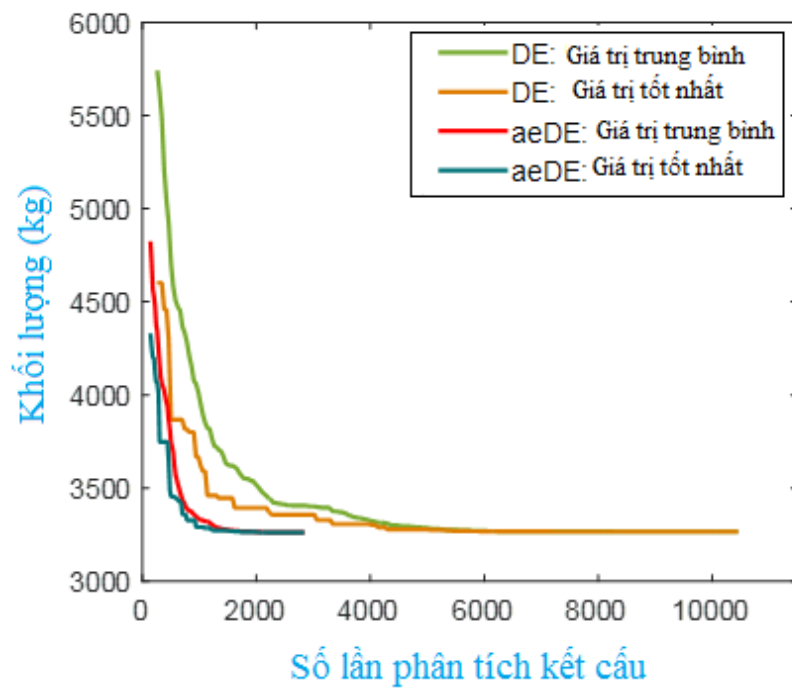
Lịch sử hội tụ của cả hai phương pháp DE và aeDE cho tất cả các bài toán được thể hiện ở Hình 3.17 đến Hình 3.20. Các kết quả một lần nữa cũng chỉ ra rằng phương pháp cải tiến aeDE luôn có tốc độ hội tụ tốt hơn rất nhiều so với phương pháp DE. Kết quả này một lần nữa cũng chỉ ra rằng aeDE là một sự lựa chọn tốt để giải bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm với biến thiết kế phân trăm thể tích và biến chiều dày đồng thời.

a)  $\omega = 400$ b)  $\omega = 3600$ 

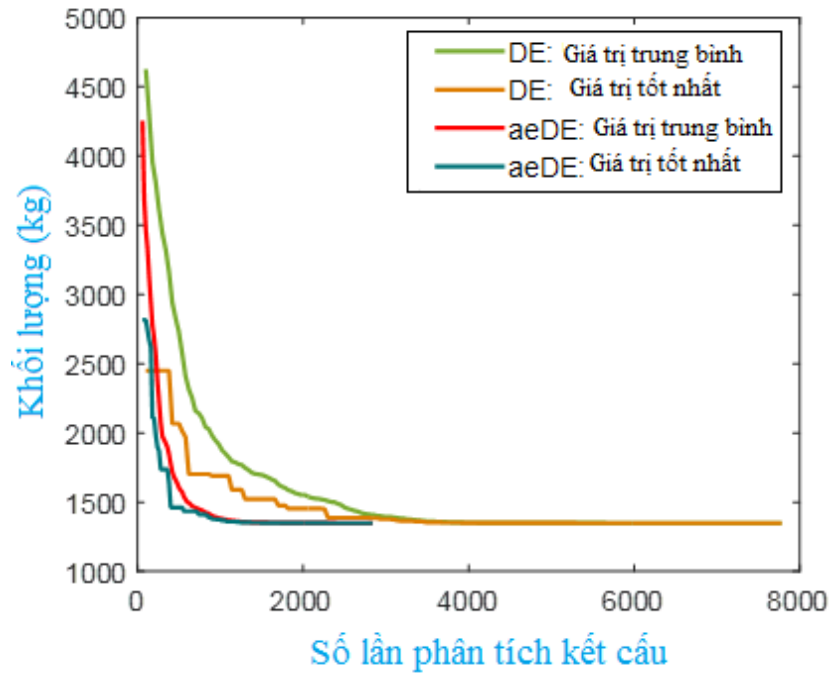
Hình 3.17. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán tựa đơn hai đầu).

a)  $\omega = 10000$ b)  $\omega = 16900$ 

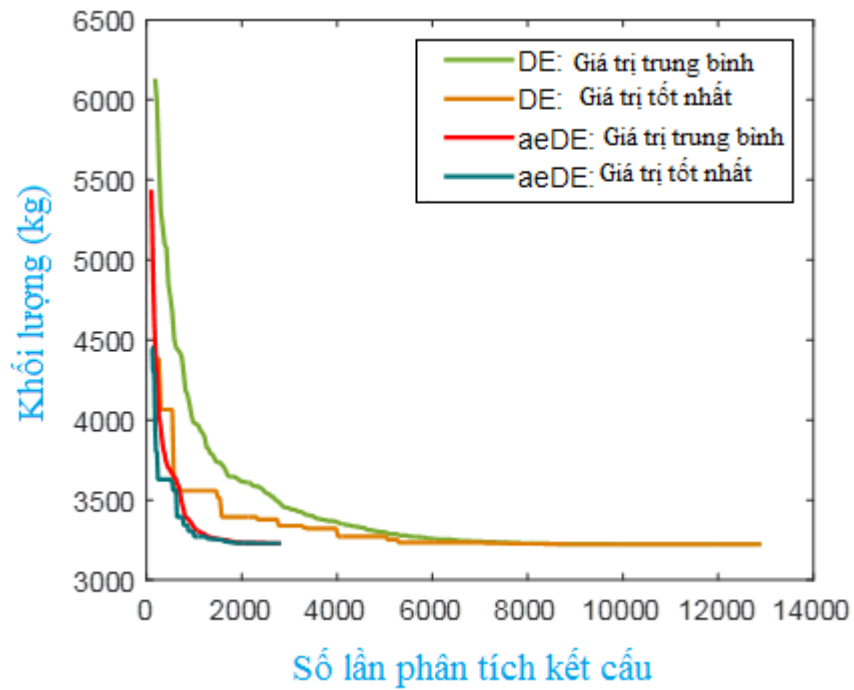
Hình 3.18. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán ngàm hai đầu).

a)  $\omega = 400$ b)  $\omega = 900$ 

Hình 3.19. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngàm một đầu tự do).



a)  $\omega = 2500$



b)  $\omega = 16900$

Hình 3.20. So sánh tốc độ hội tụ của phương pháp DE và aeDE (bài toán một đầu ngầm một đầu tựa đơn).

## Chương 4 KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

### 4.1. Kết luận

Luận văn được thực hiện nhằm giải bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm composite với nhiều điều kiện biên thiết kế khác nhau. Bài toán tối ưu được thành lập với hàm mục tiêu là cực tiểu trọng lượng của kết cấu dầm. Biến thiết kế là phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi và chiều dày của các lớp. Ràng buộc của bài toán yêu cầu tần số dao động đầu tiên của dầm phải lớn hơn một giá trị cho trước nhằm đảm bảo kết cấu tránh được những vùng cộng hưởng. Để giải bài toán tối ưu đặt ra, một tiếp cận số bao gồm phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp tối ưu hóa - giải thuật tiến hóa DE và giải thuật cải tiến aeDE được sử dụng. Trong đó, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng để phân tích ứng xử của kết cấu dầm và giải thuật tối ưu hóa DE và aeDE được sử dụng để giải bài toán tối ưu.

Nghiên cứu trong luận văn có thể được xem là một nghiên cứu mở rộng của nghiên cứu đã được thực hiện trước đó bởi Liu [11]. So với nghiên cứu của Liu [11], nghiên cứu trong luận văn có những ưu điểm và điểm mới như sau:

- Trong nghiên cứu của Liu [11], ứng xử của dầm được phân tích bằng phương pháp giải tích nên phương pháp sẽ gặp nhiều hạn chế khi được áp dụng cho các bài toán với nhiều điều kiện biên cùng lúc hoặc cho các điều kiện biên phức tạp. Để khắc phục những nhược điểm này, luận văn đã phát triển một mô hình số sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để phân tích ứng xử kết cấu dầm nhằm xử lý linh hoạt hơn cho các bài toán với nhiều điều kiện biên khác nhau.

- Phương pháp tối ưu hóa được Liu [11] sử dụng để giải bài toán tối ưu là một phương pháp xấp xỉ thuộc nhóm các phương pháp tìm kiếm lời giải tối ưu dựa trên thông tin đạo hàm. Do đó nó sẽ gặp nhiều hạn chế như: lời giải tối ưu sẽ kẹt ở nghiệm địa phương, khó mở rộng và áp dụng cho bài toán với biến thiết kế rời rạc. Để vượt qua những nhược điểm này, luận văn sử dụng giải thuật tối ưu hóa DE và aeDE là các phương pháp thuộc nhóm các phương pháp tìm kiếm lời giải tối ưu trực tiếp dựa vào thông tin hàm mục tiêu và các hàm ràng buộc. Nhờ đó lời giải tối ưu của bài toán đạt được thường sẽ là nghiệm toàn cục và phương pháp sẽ dễ dàng mở rộng và áp dụng cho các bài toán

với nhiều loại biến thiết kế khác nhau. Cụ thể trong luận văn, bài toán tối ưu hóa đã xét thêm biến thiết kế là chiều dày của các lớp như là những biến thiết kế rời rạc. Hiệu quả của việc xét thêm biến thiết kế mới cũng như việc áp dụng giải thuật tối ưu DE và aeDE để giải bài toán tối ưu đã được chứng minh thông qua các kết quả số đạt được ở chương 3.

- Thêm vào đó, trong nghiên cứu của Liu [11], ràng buộc chế tạo không được xem xét cho biến thiết kế phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi. Do đó các kết quả đạt được sẽ rất khó để sử dụng cho việc chế tạo. Trong luận văn này, ràng buộc này cũng đã được thêm vào cho biến phần trăm thể tích. Do đó các kết quả đạt được trong luận văn sẽ gần với điều kiện sản xuất thực tế hơn.

Hiệu quả và tính tin cậy của các phương pháp được phát triển trong luận văn đã được kiểm chứng và đánh giá ở Chương 3 kết quả số. Các kết quả số đã chỉ ra rằng các phương pháp được phát triển trong luận văn cho kết quả rất tốt và có độ tin cậy cao.

- So sánh về kết quả phân tích ứng xử kết cấu dầm, lời giải đạt được bởi phương pháp phần tử hữu hạn rất gần với lời giải giải tích đạt được bởi Liu [11]. Sai số lớn nhất giữa hai phương pháp dư là 0.083%.

- So sánh về kết quả thiết kế tối ưu, cho trường hợp bài toán tối ưu chỉ xét một loại biến thiết kế là phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi, kết quả đạt được bởi phương pháp DE và aeDE luôn cho kết quả tốt bằng hoặc hơn so với các kết quả đạt được bởi Liu [11]. Cho trường hợp bài toán tối ưu xem xét đồng thời cả hai loại biến thiết kế là phần trăm thể tích của vật liệu nền và sợi và chiều dày các lớp, kết quả trọng lượng tối ưu đạt được giảm đi đáng kể. Và các kết quả cũng chỉ ra rằng việc bố trí sắp xếp chiều dày của các lớp một cách hợp lý sẽ làm kết cấu nhẹ hơn rất nhiều và giúp tiết kiệm một lượng vật liệu đáng kể.

- So sánh tính hiệu quả giữa hai phương pháp tối ưu được áp dụng là DE và aeDE, các kết quả đạt được chỉ ra rằng của cả hai phương pháp đều cho kết quả rất tốt. Tuy nhiên, aeDE có tốc độ hội tụ tốt hơn và chi phí tính toán thấp hơn rất nhiều so với DE.

Như vậy, với những kết quả đạt được, luận văn đã góp phần phát triển một tiếp cận tính toán mới cho việc giải bài toán tối ưu hóa cho kết cấu dầm composite bằng phương pháp số. Tiếp cận mới này đã khắc phục được phần nào những hạn chế trong nghiên cứu của Liu [11]. Kết quả đạt được đã chỉ ra rằng với cách tiếp cận mới này, hiệu quả của việc thiết kế tối ưu cho kết cấu dầm composite sẽ tăng lên đáng kể và giúp các kỹ sư

thiết kế tiết kiệm được một lượng lớn vật liệu so với các tiếp cận đã được đề xuất bởi Liu [11].

## **4.2. Hướng phát triển của đề tài**

Mặc dù đã nỗ lực rất nhiều trong suốt quá trình thực hiện luận văn, tuy nhiên luận văn khó có thể tránh khỏi những thiếu sót. Vì vậy tác giả mong nhận được những đóng góp quý giá từ quý thầy cô nhằm bổ sung những kiến thức còn thiếu sót để luận văn được hoàn chỉnh hơn. Bên cạnh đó, dựa vào những kết quả đã đạt được, tác giả cũng mong đề tài nhận được sự quan tâm và phát triển hơn nữa từ các nhà nghiên cứu. Luận văn có thể được mở rộng theo các hướng nghiên cứu sau:

- Tính toán, thiết kế tối ưu hóa dựa trên độ tin cậy cho kết cấu dầm composite chịu ràng buộc về tần số và ràng buộc tĩnh (ứng suất, chuyển vị, v.v.);
- Tính toán, thiết kế tối ưu đa mục tiêu cho kết cấu dầm composite chịu ràng buộc về tần số và ràng buộc tĩnh (ứng suất, chuyển vị, v.v.).



## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Cardoso JB, Sousa LG, Castro J a., Valido a. J. Optimal design of laminated composite beam structures. *Struct Multidiscip Optim* 2002;24:205–11. doi:10.1007/s00158-002-0230-2.
- [2] Cardoso JB, Valido AJ. Cross-section optimal design of composite laminated thin-walled beams. *Comput Struct* 2011;89:1069–76. doi:10.1016/j.compstruc.2010.12.009.
- [3] Sedaghati R, Zabihollah A, Ahari M. Sensitivity Analysis and Optimal Design of Smart Peizolaminated Composite Beams. *AIAA J* 2006;44:2987–96. doi:10.2514/1.21564.
- [4] Blasques JP, Stolpe M. Maximum stiffness and minimum weight optimization of laminated composite beams using continuous fiber angles. *Struct Multidiscip Optim* 2010;43:573–88. doi:10.1007/s00158-010-0592-9.
- [5] Hamdaoui M, Robin G, Jrad M, Daya EM. Optimal design of frequency dependent three-layered rectangular composite beams for low mass and high damping. *Compos Struct* 2015;120:174–82. doi:10.1016/j.compstruct.2014.09.062.
- [6] Murugan MS, Suresh S, Ganguli R, Mani V. Target vector optimization of composite box beam using real-coded genetic algorithm: a decomposition approach. *Struct Multidiscip Optim* 2006;33:131–46. doi:10.1007/s00158-006-0030-1.
- [7] Suresh S., Sujit P.B. RAK. Particle swarm optimization approach for multi-objective composite box-beam design. *Compos Struct* 2007;81:598–605. doi:10.1016/j.compstruct.2006.10.008.
- [8] Valido AJ, Barradas Cardoso J, Cardoso JB. Geometrically nonlinear composite beam structures: design sensitivity analysis. *Eng Optim* 2003;35:531–51. doi:10.1080/03052150310001604784.
- [9] Neto MA, Yu W, Leal RP. Generalized Timoshenko modelling of composite beam structures: sensitivity analysis and optimal design. *Eng Optim* 2008;40:891–906. doi:10.1080/03052150802086821.
- [10] Kathiravan R, Ganguli R. Strength design of composite beam using gradient and particle swarm optimization. *Compos Struct* 2007;81:471–9. doi:10.1016/j.compstruct.2006.09.007.

- [11] Liu Q. Analytical sensitivity analysis of eigenvalues and lightweight design of composite laminated beams. *Compos Struct* 2015;134:918–26. doi:10.1016/j.compstruct.2015.09.002.
- [12] Vo-Duy T, Nguyen-Minh N, Dang-Trung H, Tran-Viet A, Nguyen-Thoi T. Damage assessment of laminated composite beam structures using damage locating vector (DLV) method. *Front Struct Civ Eng* 2015;9:457–65. doi:10.1007/s11709-015-0303-0.
- [13] Tran Van Dan . Tối ưu hóa dựa trên độ tin cậy tấm composite laminate bằng giải thuật di truyền và phần tử CS-DSG3, luận văn ThS, trường Đại học Bách khoa, TpHCM, 2013.
- [14] Nguyen Viet Cuong. Tối ưu hóa dựa trên độ tin cậy tấm composite nhiều lớp sử dụng giải thuật lặp tuần tự SORA, luận văn ThS, Trường đại học công nghệ TpHCM (HUTECH), 2015.
- [15] J.N.Reddy. *Mechanics of Laminated Composite Plates and Sheels* 1997:855.
- [16] Thinh TI, Khoa NN. *Phương pháp phần tử hữu hạn* 2007.
- [17] Jean-Marie Berthelot. *Composite Materials\_Mechanical Behavior and Structural Analysis*. n.d.
- [18] Jones RM. *Mechanics of composite materials*. 2nd ed. Philadelphia, PA: Taylor & Francis; 1999.
- [19] J.N. Reddy. *Theory and analysis of elastic plates and shells* 2006.
- [20] Liu Q. Analytical sensitivity analysis of frequencies and modes for composite laminated structures. *Int J Mech Sci* 2015;90:258–77. doi:10.1016/j.ijmecsci.2014.11.018.
- [21] Nguyễn Thời Trung & Nguyễn Xuân Hùng. *Phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng Matlab*. Nhà xuất bản Xây dựng; 2015.
- [22] Nocedal J, Wright SJ, Wright SJ, Robinson SM. *Numerical Optimization*. Springer-Verlag; 2006.
- [23] Holland JH. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press; 1992. doi:citeulike-article-id:125979.
- [24] Storn R, Price K. Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *J Glob Optim* 1997;11:341–59.

- doi:10.1023/A:1008202821328.
- [25] Dorigo M, Stützle T. Ant Colony Optimization. 2004. doi:10.4249/scholarpedia.1461.
- [26] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. Neural Networks, 1995 Proceedings, IEEE Int Conf 1995;4:1942–8 vol.4. doi:10.1109/ICNN.1995.488968.
- [27] Altenbach H, Altenbach J, Kissing W. Mechanics of Composite Structural Elements. 1st ed. Heidelberg: Springer; 2004.
- [28] Das S, Suganthan PN. Differential evolution: A survey of the state-of-the-art. IEEE Trans Evol Comput 2011;15:4–31. doi:10.1109/TEVC.2010.2059031.
- [29] Ho-Huu V, Nguyen-Thoi T, Vo-Duy T, Nguyen-Trang T. An adaptive elitist differential evolution for optimization of truss structures with discrete design variables. Comput Struct 2016;165:59–75. doi:10.1016/j.compstruc.2015.11.014.
- [30] Das S, Abraham A, Chakraborty UK, Konar A. Differential Evolution Using a Neighborhood-Based Mutation Operator. Evol Comput IEEE Trans 2009;13:526–53. doi:10.1109/TEVC.2008.2009457.
- [31] Wolpert DH, Macready WG. No free lunch theorems for optimization. IEEE Trans Evol Comput 1997;1:67–82. doi:10.1109/4235.585893.
- [32] Qin AK, Huang VL, Suganthan PN. Differential Evolution Algorithm With Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization. Evol Comput IEEE Trans 2009;13:398–417. doi:10.1109/TEVC.2008.927706.
- [33] Jia G, Wang Y, Cai Z, Jin Y. An improved ( $\mu + \lambda$ )-constrained differential evolution for constrained optimization. Inf Sci (Ny) 2013;222:302–22. doi:10.1016/j.ins.2012.01.017.
- [34] Padhye N, Bhardawaj P, Deb K. Improving differential evolution through a unified approach. J Glob Optim 2013;55:771–99. doi:10.1007/s10898-012-9897-0.
- [35] Mohan C, Nguyen HT, Optimization C. A Controlled Random Search Technique Incorporating the Simulated Annealing Co ... Comput Optim Appl 1999;132:103–32.
- [36] Deep K, Singh KP, Kansal ML, Mohan C. A real coded genetic algorithm for solving integer and mixed integer optimization problems. Appl Math Comput 2009;212:505–18. doi:10.1016/j.amc.2009.02.044.
- [37] Chen TY, Chen HC. Mixed–discrete structural optimization using a rank-niche

- evolution strategy. *Eng Optim* 2009;41:39–58. doi:10.1080/03052150802344535.
- [38] Datta D, Figueira JR. A real-integer-discrete-coded particle swarm optimization for design problems. *Appl Soft Comput* 2011;11:3625–33. doi:10.1016/j.asoc.2011.01.034.
- [39] Datta D, Dutta S. A binary-real-coded differential evolution for unit commitment problem. *Int J Electr Power Energy Syst* 2012;42:517–24. doi:10.1016/j.ijepes.2012.04.048.
- [40] Kaveh A, Mahdavi VR. Colliding Bodies Optimization method for optimum discrete design of truss structures. *Comput Struct* 2014;139:43–53. doi:10.1016/j.advengsoft.2014.01.002.

## PHỤ LỤC

### Code Matlab cho kết quả số

```

addpath DE-functions AnalysisFreq
clc; clear all; close all
format long
t_val = 'rf-thick'; % 'rf' or 'rf-thick'
bc     = 'C-H'; % dieu kien bien
w_     = 2500;
% H-H : 400, 5625
% C-C : 10000, 28900
% C-F : 400, 729
% C-H : 2500, 13225
write_text_command_window
Para.Ef = 294e9; Para.vf = 0.2; Para.rhof = 1.81e3;
Para.Em = 4.2e9; Para.vm = 0.3; Para.rhom = 1.24e3;
Para.fiber = [0 90 45 -45 -45 45 90 0]; %[0/90/45/-45]
Para.l = 14.4;
Para.b = 0.3;
Para.h = 0.48;
% paprameters of optimization
switch t_val
    case 'rf'
        dim = 4;
        Lb = [0 0 0 0];
        Ub = [1 1 1 1];
        Options.NoInteger = 0;
    case 'rf-thick'
        dim = 8; rfmax = 0.9069;
        Lb = [ones(1,4) zeros(1,4)]; % cm
        Ub = [20*ones(1,4) rfmax*ones(1,4)];
        Options.NoInteger = 4;
end
Options.Popsize = 20;
Options.tol = 1e-6;
Options.Totalgen = 500;
Options.Display = 'yes';
Options.eps2in = 1.5;
Options.eps2max = 6;
Object = @(x)Objf_mass( x,Para,t_val );
Consf = @(x)ConstrNumerical( x,bc,w_,Para,t_val );
xsave = [];
for ii = 1:1
    step = ii
    [ xopt,fopt,FES] = aeDE2(
Object,Consf,dim,Lb,Ub,Options );

```

```

    xsave = [xsave; xopt, fopt, FES];
end
% write text from command window to file
switch t_val
    case 'rf'
        save(['Results-no-t/' sprintf(bc)], 'xsave');
        diary(['Results-no-t/' sprintf(bc)])
    case 'rf-thick'
        save(['Results-with-t/' sprintf(bc)], 'xsave');
        diary(['Results-with-t/' sprintf(bc)])
end
diary off

%% Main_Dynamic.m

clear all;clc
format long
Ef    = 294e9;
vf    = 0.2;
rhof  = 1.81e3;
Em    = 4.2e9;
vm    = 0.3;
rhom  = 1.24e3;
ply   = [0 90 45 -45 -45 45 90 0];
rf    = [50 50 50 50 50 50 50 50]/100;
l     = 14.4;
h     = 0.48;
b     = 0.3;
z     = -h/2:h/length(ply):h/2;
% weight = Objf_mass_no_t(rf,rhom,rhof,z,l,b)
%% Tinh omega^2 theo cong thuc Q.Liu
% omega^2 = (alpha_i/L)^4*(D11/sum(p(k)*(z(k+1)-z(k))))
p     = 0;
D11   = 0;
for k = 1:length(ply)
    theta = ply(k);
    p = p + (rf(k)*rhof + (1 - rf(k))*rhom)*(z(k+1)-z(k));
    [Q] = Call_Q( Ef,vf,Em,vm,rf ,rhof,rhom);
    [ C ] = cal_Q_layer( Q{k},theta );
    D11 = D11 + C(1,1)*((z(k+1))^3-(z(k))^3);
end
mass = p*l*b
D11 = 1/3*D11;
option = 'C-C';
[alpha] = bc_condition (option);
om = (alpha/l).^4*(D11/p)
%% Boundary Conditions
function [alpha] = bc_condition (option)

```

```

switch option
    case 'H-H'
        alpha = [pi, 2*pi, 3*pi, 4*pi];
    case 'C-C'
        alpha = [4.73004, 7.85321, 10.99561, 14.13717];
    case 'C-F'
        alpha = [1.87510, 4.69409, 7.85475, 10.99554];
    case 'C-H'
        alpha = [3.92660, 7.06858, 10.21017, 13.35177];
end
function [freq] = AnalyticalFreq(x,bc,Para,t_val)
fiber= Para.fiber;
Ef    = Para.Ef;
vf    = Para.vf;
rhof  = Para.rhof;
Em    = Para.Em;
vm    = Para.vm;
rhom  = Para.rhom;
l     = Para.l;
b     = Para.b;
switch t_val
    case 'rf'
        h = Para.h;
        t = h/length(fiber)*ones(1,length(fiber));
        rf = [x(1) x(2) x(3) x(4) x(4) x(3) x(2) x(1)];
    case 'rf-thick'
        t = [x(1) x(2) x(3) x(4) x(4) x(3) x(2)
x(1)]/100;
        rf = [x(5) x(6) x(7) x(8) x(8) x(7) x(6) x(5)];
        h = sum(t);
end
z = [-h/2, -h/2+t(1), -h/2+sum(t(1:2)), -
h/2+sum(t(1:3)), -h/2+sum(t(1:4)), ...
-h/2+sum(t(1:5)), -h/2+sum(t(1:6)), -
h/2+sum(t(1:7)), -h/2+sum(t(1:8))];
% Tinh omega^2 theo cong thuc Q.Liu
% omega^2 = (alpha_i/L)^4*(D11/sum(p(k))*(z(k+1)-z(k)))
p = 0;
D11= 0;
for k = 1:length(fiber)
    theta = fiber(k);
    p = p + (rf(k)*rhof + (1 - rf(k))*rhom)*(z(k+1)-z(k));
    [Q] = Call_Q( Ef,vf,Em,vm,rf,rhof,rhom);
    [ C ] = cal_Q_layer( Q{k},theta );
    D11 = D11 + C(1,1)*((z(k+1))^3-(z(k))^3);
end

D11 = 1/3*D11;

```

```

% option = 'C-C';
[alpha] = bc_condition(bc);
freq = (alpha(1)/l).^4*(D11/p);

%% aeDE.m

function [ xval,fval,FES,iter ] = aeDE(
Object,Consf,dim,Lb,Ub,Options )
Popsiz  = Options.Popsiz;
tol      = Options.tol;
Totalgen = Options.Totalgen;
Display  = Options.Display;
NoInteger= Options.NoInteger;
eps2     = Options.eps2in;
eps2max  = Options.eps2max;
load('IniPop.mat');
% for j = 1:Popsiz
%     for k = 1:dim
%         if k <= NoInteger
%             Pop(j,k) = Lb(k) + round((Ub(k)-
Lb(k)).*rand);
%         else
%             Pop(j,k) = Lb(k) + (Ub(k)-Lb(k)).*rand;
%         end
%     end
% end
% danh gia ham muc tieu cho moi ca the trong dan so
% [Fx,gxp] = EvalPenalty(Pop, Object, Consf);
[Fx,gxp] = EvalPenalty2(Pop, Object, Consf, 1e-4, eps2);
FES = Popsiz;
if strcmp(Display,'yes')
    fprintf('\n                Best\t\t Mean\n')
    fprintf('Generation\tf-count\t f(x)\n')
end
delta = 10; iter = 1;
while iter < Totalgen
    % Update eps2
    eps2 = eps2 + eps2max/Totalgen;
    if strcmp(Display,'yes')
        fprintf('\t%i\t\t%i\t\t\t %f\t %f\t %f\n',...
            iter,FES,min(Fx),mean(Fx),min(gxp))
    end
    iter = iter + 1;
    % Generate the offspring population
    lu = [Lb;Ub];
    offpop = AdaptiveReproduce(Fx, Pop, Popsiz, lu, dim,
delta, NoInteger);

```



```

    % Evaluate "offpop" by slightly revising the current
    program
    [Fnew,gxo] = EvalPenalty2(offpop, Object, Consf, 1e-4,
    eps2);
    % Update Pop, Fx
    [Fit,idb] = sort([Fx; Fnew]);
    Offpop    = [Pop; offpop];
    gxx       = [gxp;gx0];
    Fx        = Fit(1:Popsiz);
    Pop       = Offpop(idb(1:Popsiz),:);
    gxp       = gxx(idb(1:Popsiz));
    FES = FES + Popsiz;
    % Check stopping condttition
    [Fbest,idb] = min(Fx);
    delta = abs(abs(mean(Fx))/abs(Fbest)-1);
    if delta < tol
        xval = Pop(idb,:); fval = Fbest;

disp(' _____
_')
        fprintf('Optimal solution of aeDE is found at FES:
%i, fval = %s, xval = %s
\n',FES,mat2str(fval),mat2str(xval));
        break
    end
    if iter >= Totalgen
        fval = Fbest; xval = Pop(idb,:);

disp(' _____
_')
        fprintf('Optimal solution of aeDE is found at FES:
%i, fval = %s, xval = %s
\n',FES,mat2str(fval),mat2str(xval));
        break
    end
end
end

```