

MỘT CHƯƠNG TRÌNH PHÂN TÍCH KẾT CẤU MỜ ỨNG DỤNG DỰA TRÊN XẤP XỈ TAYLOR BẬC NHẤT

Trương Việt Hùng^a, Phạm Hoàng Anh^{b,*}

^aKhoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi, số 175 phố Tây Sơn, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng, số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 14/09/2020, Sửa xong 20/10/2020, Chấp nhận đăng 22/10/2020

Tóm tắt

Bài báo này giới thiệu một chương trình phân tích kết cấu mờ để phân tích các kết cấu có các tham số mờ. Một kỹ thuật phân tích mờ cải tiến dựa trên khai triển Taylor bậc nhất đối với các đáp ứng của kết cấu kết hợp với phương pháp phân tích mờ theo lát cắt α được đề xuất nhằm giảm số lần phân tích kết cấu. Chương trình được xây dựng trên MATLAB theo hướng có thể kết nối với các chương trình phân tích kết cấu tiền định có sẵn. Hai ví dụ kết cấu hệ thanh phẳng với số lượng biến mờ tương đối lớn, một kết cấu dàn phẳng và một kết cấu khung phẳng, được khảo sát để minh họa cho hiệu quả của chương trình. Kết quả từ ví dụ cho thấy, chương trình đề xuất có thể xác định hàm thuộc của đáp ứng chuyển vị và nội lực của kết cấu có độ chính xác tương đối cao và chi phí tính toán thấp so với tính toán theo phương pháp tối ưu trực tiếp.

Từ khóa: phân tích kết cấu mờ; xấp xỉ Taylor; lát cắt α ; tham số mờ, tối ưu mức α .

AN EFFECTIVE FUZZY STRUCTURAL ANALYSIS PROCEDURE BASED ON FIRST-ORDER TAYLOR'S APPROXIMATION

Abstract

This paper presents an effective fuzzy structural analysis procedure for the behavior quantification of structures with fuzzy parameters. A modified fuzzy computation technique based on first-order Taylor's expansion of the structural response is integrated with the α -cut strategy to reduce the number of deterministic structural analyses. The procedure is implemented in MATLAB with the aim of linking to available deterministic structural analysis software. Two examples of bar-type structures, a 2D truss, and a 2D frame, are investigated to demonstrate the effectiveness of the proposed procedure. The numerical results show that the proposed procedure can capture relatively accurate membership function of the displacement and member force with low computational cost, compared with the fuzzy analysis using direct optimization.

Keywords: structural analysis; Taylor's approximation; α -cut strategy; fuzzy parameters; α -level optimization.

[https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14\(5V\)-13](https://doi.org/10.31814/stce.nuce2020-14(5V)-13) © 2020 Trường Đại học Xây dựng (NUCE)

1. Giới thiệu

Việc phân tích kết cấu cần dựa trên các thông tin về kết cấu, về các tác động lên kết cấu... Thực tế, các thông tin này thường chứa đựng các yếu tố ngẫu nhiên, không rõ ràng, không chính xác (thông tin không chắc chắn). Bên cạnh các phương pháp xác suất dựa trên thông tin được mô hình là các đại lượng ngẫu nhiên, phân tích và đánh giá kết cấu theo mô hình mờ cũng thu hút nhiều nghiên cứu [1, 2].

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: anhph2@nuce.edu.vn (Anh, P. H.)

Trong phân tích kết cấu theo mô hình mờ, phương pháp lát cắt α thường được ứng dụng, trong đó tất cả các biến mờ đầu vào được rời rạc theo một số mức thuộc giống nhau (các lát cắt α). Tương ứng với mỗi lát cắt α của các biến đầu vào, khoảng của đáp ứng mờ được xác định thông qua bài toán phân tích khoảng. Để xác định khoảng của đáp ứng mờ, hai hướng tiếp cận chính thường được dùng là: 1) số học khoảng và 2) tối ưu [1]. Trong đó, hướng tiếp cận theo tối ưu cho kết quả chính xác (về lý thuyết), thuận tiện trong thực thi và có thể kết hợp với các công cụ tính toán sẵn có (ví dụ như các chương trình phần tử hữu hạn). Một số nghiên cứu về phân tích mờ kết cấu theo tiếp cận tối ưu có thể kể đến như: Möller và cộng sự với thuật toán tiến hóa sửa đổi [3], Farkas và cộng sự với phương pháp tối ưu toàn cục rút gọn [4], Degrauwe và cộng sự với thuật toán tối ưu $G\alpha D$ [5], Phạm và cộng sự với thuật toán tiến hóa vi phân cải tiến [6].

Tuy nhiên, các phương pháp tối ưu nói chung đòi hỏi khối lượng tính toán lớn. Khối lượng tính toán do các yếu tố chủ yếu sau chi phối: 1) mức độ phức tạp của mô hình tính; 2) số lượng bài toán phân tích cần thực hiện. Để giảm khối lượng tính toán trong bài toán tối ưu, thông thường người ta dùng mô hình xấp xỉ thay thế. Các mô hình xấp xỉ yêu cầu khối lượng tính toán ít hơn mô hình tính phức tạp ban đầu. Một số nghiên cứu gần đây theo hướng sử dụng mô hình thay thế trong phân tích mờ có thể tìm thấy trong các tài liệu [7–15]. Cần lưu ý rằng, độ chính xác của các phương pháp này hoàn toàn phụ thuộc độ chính xác của mô hình thay thế. Hơn nữa, trong nhiều trường hợp việc xây dựng mô hình xấp xỉ có độ chính xác cao lại đòi hỏi khối lượng tính toán lớn hơn cả tính toán trực tiếp trên mô hình ban đầu.

Trong các bài toán thực tế, mô hình kết cấu thường phức tạp với số lượng các biến mờ lớn. Do đó cần thiết phải có những mô hình thay thế đơn giản nhằm giảm khối lượng tính toán. Tuy nhiên, cũng cần phải đảm bảo độ chính xác của kết quả phân tích mờ. Trong một số nghiên cứu gần đây [16–18], Phạm và các cộng sự giới thiệu một kỹ thuật phân tích mờ hiệu quả dựa trên xấp xỉ Taylor bậc nhất đối với đáp ứng của kết cấu. Trong bài báo này, kỹ thuật trên được vận dụng và cải tiến để xây dựng một chương trình phân tích mờ tự động trong MATLAB với tên gọi *FuzzyP*. Một số ví dụ phân tích tĩnh các kết cấu tuyến tính có tham số mờ được thực hiện để minh họa hiệu quả và tính ứng dụng của chương trình *FuzzyP*.

2. Phân tích mờ dựa trên xấp xỉ Taylor bậc nhất

2.1. Số mờ và phân tích mờ

Lý thuyết tập mờ được Zadeh [19] giới thiệu vào năm 1965. Các tập mờ có thể dùng để biểu diễn các đặc trưng của kết cấu (mô đun đàn hồi vật liệu, kích thước hình học, tải trọng...) khi các đại lượng này không thể xác định được chính xác. Khác với khái niệm tập tổ, trong đó một phần tử chỉ có thể có hai trạng thái là thuộc hoặc không thuộc tập, trong tập mờ, mức độ thuộc của một phần tử vào tập có thể không rõ ràng và được biểu diễn thông qua một *hàm thuộc*.

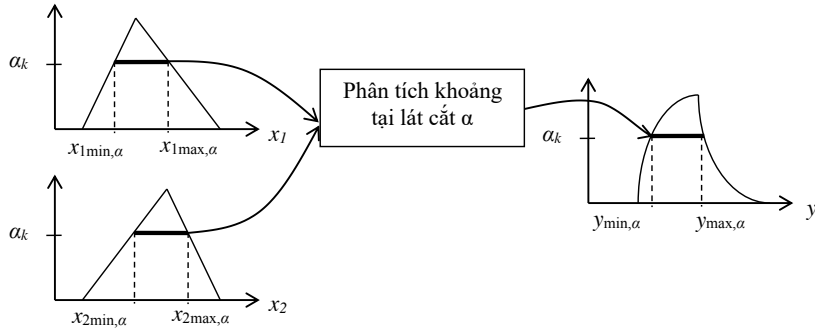
Một số mờ $\tilde{x}$ được định nghĩa như sau:

$$\tilde{x} = \{(x, \mu_{\tilde{x}}(x)) | x \in X, \mu_{\tilde{x}}(x) \in [0, 1]\} \quad (1)$$

với X là một tập và $\mu_{\tilde{x}}$ được gọi là hàm thuộc. Ứng với mỗi phần tử $x \in X$, giá trị $\mu_{\tilde{x}}(x)$ được gọi là mức độ thuộc về $\tilde{x}$ của x ; Giá trị 0 cho biết x không phải là phần tử thuộc $\tilde{x}$; giá trị 1 có nghĩa là x chắc chắn thuộc $\tilde{x}$; giá trị trong khoảng 0 đến 1 cho biết mức độ x thuộc $\tilde{x}$ là không chắc chắn.

Phương pháp phân tích kết cấu với các thông số đầu vào mờ thường được thực hiện theo lát cắt α . Trong phương pháp lát cắt α , tất cả các biến mờ đầu vào được rời rạc theo một số mức thuộc giống nhau (các lát cắt α). Tương ứng với mỗi lát cắt α của các biến đầu vào, khoảng của đáp ứng mờ (hay

biến mờ đầu ra) được xác định thông qua bài toán phân tích khoảng. Hình 1 minh họa phương pháp phân tích đáp ứng mờ $\tilde{y}$ theo lát cắt α đối với một hàm của hai biến mờ đầu vào, $y = y(x_1, x_2)$.



Hình 1. Mô tả phân tích mờ theo lát cắt α [16]

Trên Hình 1, các giá trị $y_{\min, \alpha}$ và $y_{\max, \alpha}$ là giá trị cận dưới và cận trên của y tương ứng với $x_1 \in [x_{1\min, \alpha}, x_{1\max, \alpha}]$, $x_2 \in [x_{2\min, \alpha}, x_{2\max, \alpha}]$. $y_{\min, \alpha}$ và $y_{\max, \alpha}$ xác định hai điểm của hàm thuộc $\mu_{\tilde{y}}(y)$ của đáp ứng mờ $\tilde{y}$. Như vậy, có thể thu được xấp xỉ rời rạc của hàm thuộc $\mu_{\tilde{y}}(y)$ bằng việc lặp lại quy trình tính toán ở một số mức thuộc như sau [3]:

$$y_{\min, \alpha} = \min_{x_i \in [x_{i\min, \alpha}, x_{i\max, \alpha}]} [y(x_1, \dots, x_n)] \quad (2a)$$

$$y_{\max, \alpha} = \max_{x_i \in [x_{i\min, \alpha}, x_{i\max, \alpha}]} [y(x_1, \dots, x_n)] \quad (2b)$$

trong đó, $x_{i\min, \alpha}$ và $x_{i\max, \alpha}$ là cận dưới và cận trên của x_i tương ứng với lát cắt α .

2.2. Khai triển Taylor bậc nhất đối với đáp ứng của kết cấu

Xét hệ kết cấu có n tham số mờ x_i ($i = 1, 2, \dots, n$). Ứng xử y của kết cấu được viết tổng quát dưới dạng:

$$y = f(x_1, \dots, x_n) \quad (3)$$

Hàm thuộc của y có thể được xác định thông qua giải các bài toán tối ưu (2a) và (2b) ở trên cho một số mức thuộc α . Tuy nhiên, bài toán tối ưu (2) có thể phi tuyến, có nhiều biến, và thường đòi hỏi khối lượng tính toán lớn.

Với mục đích thiết lập một công cụ hiệu quả để phân tích mờ kết cấu, xấp xỉ Taylor bậc một được áp dụng để chuyển ứng xử y trong biểu thức (3) về dạng sau [16]:

$$y \cong y^* = y^0 + \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^0) \dot{y}_i^0 \quad (4)$$

trong đó, y^* là giá trị xấp xỉ của y ; $\dot{y}_i^0$ là đạo hàm riêng của y theo biến x_i , xác định tại $\mathbf{x}^0 = \{x_1^0, \dots, x_n^0\}$; y^0 là giá trị của y xác định tại $\mathbf{x}^0$. Giá trị đạo hàm riêng $\dot{y}_i^0$ được tính xấp xỉ bằng phương pháp sai phân tiến như sau:

$$\dot{y}_i^0 \cong \frac{f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_i^0 + \delta x_i, \dots, x_n^0) - y^0}{\delta x_i} \quad (5)$$

trong đó, δx_i là một giá trị biến thiên nhỏ của x_i được lấy bằng $0,001x_i$ trong nghiên cứu này. Việc tính toán các đạo hàm riêng theo (5) yêu cầu n lần phân tích trực tiếp kết cấu, bằng 1/2 tổng số lần phân tích kết cấu cần thiết để tính toán đạo hàm riêng theo phương pháp sai phân trung tâm như đề xuất trong các tài liệu [16–18].

2.3. Xác định hàm thuộc của đáp ứng kết cấu

Với xấp xỉ Taylor bậc nhất, các giá trị cực trị của y^* được xác định bởi:

$$\begin{aligned} y_{\min}^* &= y^0 + \sum_{i=1}^n \min\{(x_i - x_i^0)\dot{y}_i^0\} \\ y_{\max}^* &= y^0 + \sum_{i=1}^n \max\{(x_i - x_i^0)\dot{y}_i^0\} \end{aligned} \quad (6)$$

Do đó, ứng với mỗi mức α , ta có thể ước lượng cận dưới và cận trên của y^* như sau:

$$\begin{aligned} y_{\min,\alpha}^* &= y^0 + \sum_{i=1}^n \min\{(x_{i,\min,\alpha} - x_i^0)\dot{y}_i^0, (x_{i,\max,\alpha} - x_i^0)\dot{y}_i^0\} \\ y_{\max,\alpha}^* &= y^0 + \sum_{i=1}^n \max\{(x_{i,\min,\alpha} - x_i^0)\dot{y}_i^0, (x_{i,\max,\alpha} - x_i^0)\dot{y}_i^0\} \end{aligned} \quad (7)$$

Do đáp ứng y có thể có quan hệ phi tuyến đối với các tham số x_i , biểu thức (4) chỉ cho ta xấp xỉ của y . Do đó, các giá trị cận được xác định theo biểu thức (7) không phải là các cận chính xác của y . Các cận dưới và trên của y tại mức α sẽ được tính toán theo hai phân tích trực tiếp sau [16]:

$$\begin{aligned} y_{\min,\alpha} &= f(C_\alpha^L) \\ y_{\max,\alpha} &= f(C_\alpha^U) \end{aligned} \quad (8)$$

trong đó, C_α^L và C_α^U là hai tổ hợp biến tương ứng với giá trị cận dưới và cận trên của y^* tại mức α xác định theo (7).

Theo thuật toán đề xuất ở trên, bài toán phân tích mờ đối với đáp ứng y được đưa về $n + 2m + 1$ bài toán phân tích tiền định (với m là số mức thuộc), bao gồm 1 lần để xác định y^0 , n lần để xác định các thành phần đạo hàm riêng $\dot{y}_i^0$, và $2m$ lần tính các cận của y .

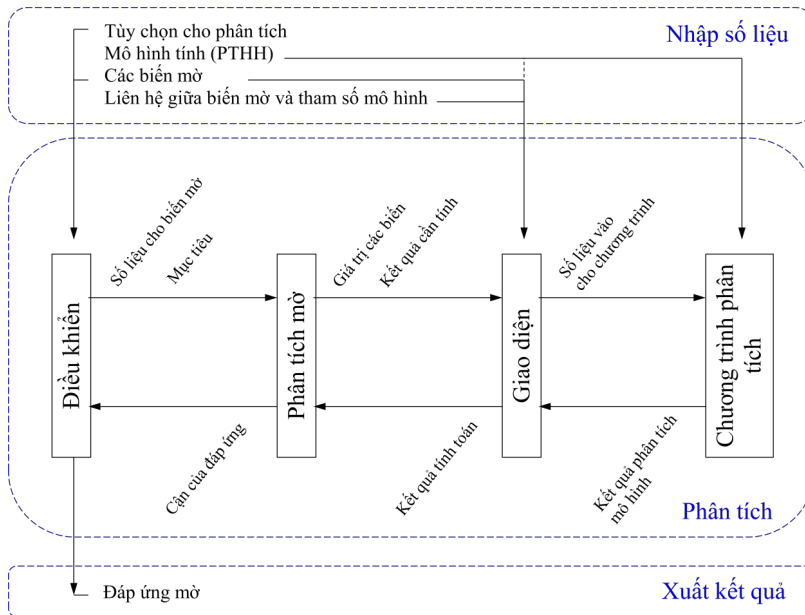
3. Mô hình hóa và phân tích kết cấu

Trong nghiên cứu, các mô hình tính toán kết cấu đơn giản thường có thể thực hiện bằng tay và được lồng ghép vào chương trình phân tích mờ. Tuy nhiên, đối với các kết cấu phức tạp trong thực tế, thì cần có sự trợ giúp bằng các chương trình, phần mềm phân tích chuyên dụng. Việc phát triển một công cụ mô hình hóa và phân tích mới dùng trong phân tích mờ đòi hỏi nhiều công sức và chi phí. Với việc chuyển bài toán phân tích mờ về một số hữu hạn bài toán phân tích tiền định, việc mô hình hóa và phân tích mờ kết cấu có thể thực hiện bởi các công cụ tính toán sẵn có (các chương trình PTHH, các phần mềm tính toán...) [20].

Việc kết nối giữa thuật toán phân tích mờ với chương trình/phần mềm phân tích kết cấu được thực hiện thông qua các bước:

1. Mô hình hóa kết cấu với các thông số đầu vào mặc định (ví dụ dùng các giá trị tin tưởng của các thông số);
2. Thiết lập mối liên hệ giữa các thông số mờ với các đặc trưng của mô hình tính toán;
3. Thiết lập giao diện với chương trình/phần mềm tính toán.

Trong nghiên cứu này, các tác giả đã xây dựng một chương trình phân tích mờ có tên *FuzzyP* trong MATLAB dựa trên quy trình đề xuất bởi De Munck và cs. [20]. Hình 2 mô tả sơ đồ khối của chương trình *FuzzyP*. Đối với các ví dụ số ở bài báo này, việc phân tích kết cấu được thực hiện bởi bộ công cụ (Toolbox) PTHH độc lập đã được phát triển bởi nhóm tác giả từ trước trên MATLAB. Tuy vậy, chương trình có thể được tùy chỉnh để kết nối với các phần mềm phân tích kết cấu khác. Ví dụ, phần mềm thương mại SAP2000 cung cấp cho người dùng giao diện lập trình ứng dụng mở (OAPI) cho phép kết nối với nhiều ngôn ngữ kỹ thuật khác nhau như MATLAB, VBA [21, 22].



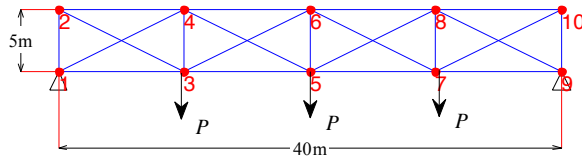
Hình 2. Sơ đồ khối chương trình phân tích mờ FuzzyP

4. Ví dụ áp dụng

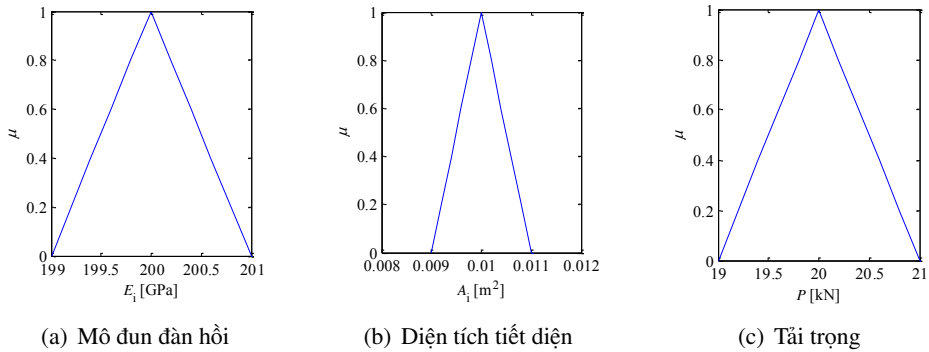
4.1. Kết cấu dàn phẳng

Ví dụ đầu tiên là một kết cấu dàn phẳng như Hình 3. Dàn gồm 21 thanh, chịu tải trọng tập trung P . Các tham số mờ bao gồm mô đun đàn hồi của vật liệu mỗi thanh E_i , diện tích tiết diện thanh A_i , và tải trọng, với biến thiên cực đại so với giá trị tin tưởng tương ứng là $\pm 0,5\%$, $\pm 10\%$, và $\pm 5\%$ (được tham khảo từ tài liệu [23]). Toàn bộ các biến mờ được giả thiết là độc lập, có hàm thuộc dạng tam giác và cho trên Hình 4. Như vậy, tổng số biến mờ trong bài toán này là 45 biến. Mục tiêu là xác định chuyển thẳng đứng tại nút 5 (v_5) và chuyển vị ngang tại nút 2 (u_2). Giả thiết biến mờ độc lập làm tăng số lượng biến mờ và tăng mức độ phức tạp của bài toán với mục đích minh họa cho hiệu quả của phương pháp đề xuất.

Việc xác định các chuyển vị mờ được thực hiện tại các mức thuộc $\alpha = 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2$; và 0 . Chương trình phân tích mờ FuzzyP. m được dùng để xác định hàm thuộc của v_5 và u_2 . Để kiểm tra

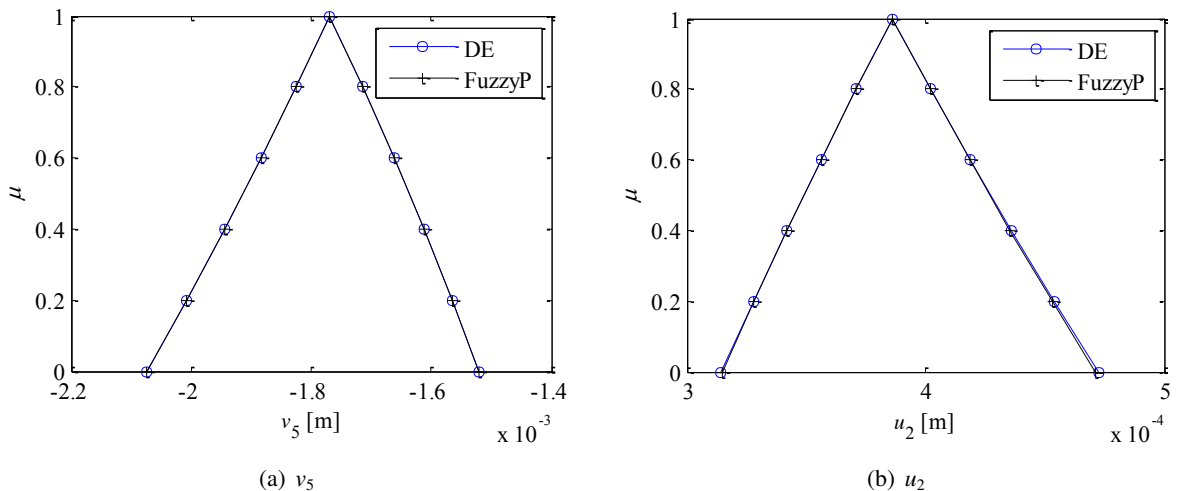


Hình 3. Sơ đồ kết cấu cầu dầm phẳng 21 thanh



Hình 4. Tham số mờ của cầu

mức độ chính xác của FuzzyP, phương pháp phân tích mờ sử dụng tối ưu trực tiếp bằng thuật toán tiến hóa vi phân (DE) [6] cũng được thực hiện. Kết quả tính toán hàm thuộc của u_5 và v_2 bởi FuzzyP và DE được cho trên Hình 5. Bảng 1 liệt kê giá trị cận dưới và cận trên của các chuyển vị tính theo FuzzyP và DE, nghĩa là chuyển vị tương ứng mức thuộc $\alpha = 0$. Các kết quả tính theo FuzzyP được thực hiện với 3 trường hợp tương ứng với giá trị biến thiên của các tham số khi xác định đạo hàm riêng là 0,1%, 0,01%, và 1%.



Hình 5. Hàm thuộc chuyển vị của kết cấu cầu xác định bởi FuzzyP và DE

Từ kết quả trên Hình 5 và Bảng 1 có thể thấy, kết quả tính toán đối với v_5 không có sự sai khác giữa FuzzyP và DE, còn kết quả tính toán đối với u_2 do FuzzyP và DE có sai khác không đáng kể.

Kết quả thu được khẳng định độ chính xác của FuzzyP trong phân tích chuyển vị mờ của dàn. Ngoài ra, biến thiên của δx_i trong khoảng 0,01% đến 1% không ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả thu được.

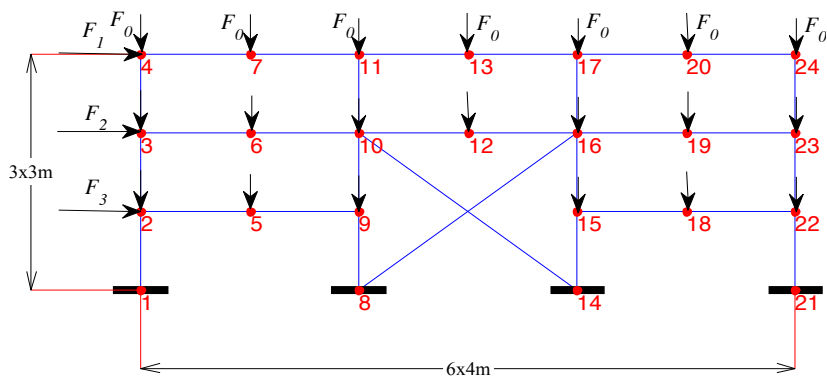
Bảng 1. Cận dưới và cận trên của chuyển vị kết cấu dàn tính theo FuzzyP và DE

Chuyển vị	Biến thiên δx_i (%)	Giá trị cận dưới			Giá trị cận trên		
		FuzzyP	DE	Sai lệch (%)	FuzzyP	DE	Sai lệch (%)
v_5 [mm]	0,10	-2,0740		0	-1,5191		0
	0,01	-2,0740	-2,0740	0	-1,5191	-1,5191	0
	1,00	-2,0740		0	-1,5191		0
u_2 [mm]	0,10	0,3147		0,06	0,4715		-0,30
	0,01	0,3147	0,3145	0,06	0,4715	0,4729	-0,30
	1,00	0,3147		0,06	0,4715		-0,30

4.2. Kết cấu khung phẳng

Ví dụ thứ hai là một kết cấu khung phẳng chịu tải trọng như trên Hình 6. Kết cấu khung bao gồm các cột thép, dầm SUS304, và hai thanh giằng thép với kích thước tiết diện cho trên Hình 6. Mô hình PTHH của khung có 24 nút và 30 phần tử thanh. Các tham số mờ của khung bao gồm mô đun đàn hồi của vật liệu mỗi thanh và tải trọng. Giả thiết biến thiên cực đại của mô đun đàn hồi là $\pm 8\%$, của tải trọng thẳng đứng là $\pm 15\%$, và của tải trọng ngang là $\pm 18\%$, so với giá trị tin tưởng. Toàn bộ các biến mờ được giả thiết có hàm thuộc tam giác với số liệu cho trong Bảng 2. Như vậy, bài toán có tổng cộng 53 biến mờ.

Cột: $b = 0,12$ m; $h = 0,3$ m Dầm: $b = 0,1$ m; $h = 0,22$ m Giằng: $b = 0,12$ m; $h = 0,3$ m



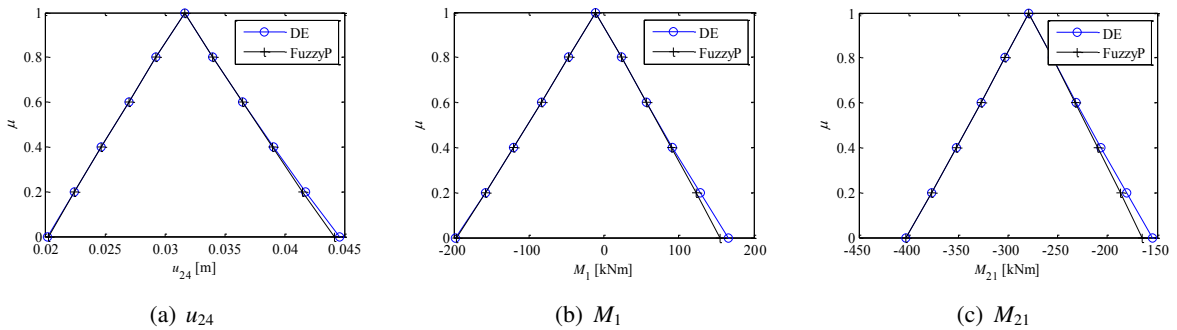
Hình 6. Sơ đồ kết cấu khung phẳng 30 thanh

Trong ví dụ này, chuyển vị ngang tại nút 24 (u_{24}), mô men uốn tại nút 1 (M_1) và 21 (M_{21}) được xem xét. Hình 7 biểu diễn hàm thuộc của các đáp ứng kết cấu tính theo FuzzyP và DE. Bảng 3 liệt kê giá trị các cận của đáp ứng kết cấu ($\alpha = 0$). Có thể thấy trong trường hợp kết cấu khung đang xét, các kết quả tính bằng DE bao các kết quả tính bằng FuzzyP. Tuy nhiên sai số tính theo FuzzyP so với DE

Bảng 2. Thông tin về các tham số mờ của khung

Tham số		Cận dưới $\alpha = 0$	$\alpha = 1$	Cận trên $\alpha = 0$
Cột	E_c (GPa)	193,2	210	226,8
Dầm	E_d (GPa)	191,2588	207,89	224,5212
Giằng	E_g (GPa)	184	200	216
Tải trọng	F_0 (kN)	340	400	460
	F_1 (kN)	820	1000	1180
	F_2 (kN)	656	800	944
	F_3 (kN)	492	600	708

là tương đối nhỏ, nhất là với các giá trị cận dưới. Một điểm đáng lưu ý từ kết quả phân tích là mô men tại chân cột M_1 có thể đổi dấu khi mức độ mờ của các biến đầu vào là lớn.



Hình 7. Hàm thuộc đáp ứng của kết cấu khung xác định bởi FuzzyP và DE

Ngoài ra, với độ biến thiên của tham số là 0,1%, không có sự khác biệt về kết quả tính toán bởi FuzzyP khi sử dụng phương pháp sai phân tiến (SP tiến) và sai phân trung tâm (SP t. tâm) (Bảng 3).

Bảng 3. Cận dưới và cận trên của đáp ứng mờ của kết cấu khung tính theo FuzzyP và DE

Chuyển vị	Phương pháp tính đạo hàm riêng	Giá trị cận dưới			Giá trị cận trên		
		FuzzyP	DE	Sai lệch (%)	FuzzyP	DE	Sai lệch (%)
u_{24} [mm]	SP tiến	20,1756	20,1134	0,31	44,1428	44,6205	-1,07
	SP t. tâm	20,1756	20,1134	0,31	44,1428	44,6205	-1,07
M_1 [kNm]	SP tiến	-195,976	-197,235	0,64	154,872	165,860	-6,62
	SP t. tâm	-195,976	-197,235	0,64	154,872	165,860	-6,62
M_{21} [kNm]	SP tiến	-402,886	-402,886	0	-165,094	-154,559	-6,81
	SP t. tâm	-402,886	-402,886	0	-165,094	-154,559	-6,81

Ưu điểm nổi bật của FuzzyP là yêu cầu khối lượng tính toán nhỏ hơn rất nhiều so với tính toán bằng DE. Trong ví dụ dầm, tổng số lần phân tích kết cấu mà FuzzyP thực hiện là $45 + 2 * 5 + 1 = 56$, còn với ví dụ khung là $53 + 2 * 5 + 1 = 64$. Con số này là rất nhỏ so với con số hàng chục nghìn lần phân tích kết cấu mà DE cần tới để tính toán mỗi hàm thuộc.

5. Kết luận

Bài báo này giới thiệu một chương trình phân tích mờ để phân tích tĩnh các kết cấu có tham số mờ. Chương trình có tên FuzzyP được xây dựng trên MATLAB và có thể kết nối với các chương trình phân tích kết cấu sẵn có. Ưu điểm lớn nhất của chương trình là yêu cầu khối lượng tính toán thấp hơn nhiều so với việc phân tích mờ bằng phương pháp tối ưu trực tiếp. Qua hai ví dụ kết cấu hệ thanh với số lượng biến mờ tương đối lớn cho thấy FuzzyP có thể cho kết quả hàm thuộc của đáp ứng chuyển vị và nội lực khá chính xác. So với việc tính đạo hàm riêng theo phương pháp sai phân trung tâm, phương pháp đề xuất dùng sai phân tiến cho cùng kết quả, trong khi số lần phân tích kết cấu giảm một nửa. Tuy nhiên, cũng cần kiểm tra mức độ chính xác của FuzzyP với các kết cấu phức tạp hơn, đặc biệt là các kết cấu phi tuyến.

Tài liệu tham khảo

- [1] Moens, D., Hanss, M. (2011). [Non-probabilistic finite element analysis for parametric uncertainty treatment in applied mechanics: Recent advances](#). *Finite Elements in Analysis and Design*, 47(1):4–16.
- [2] Faes, M., Moens, D. (2019). [Recent trends in the modeling and quantification of non-probabilistic uncertainty](#). *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1–39.
- [3] Möller, B., Graf, W., Beer, M. (2000). [Fuzzy structural analysis using \$\alpha\$ -level optimization](#). *Computational Mechanics*, 26(6):547–565.
- [4] Farkas, L., Moens, D., Vandepitte, D., Desmet, W. (2008). [Application of fuzzy numerical techniques for product performance analysis in the conceptual and preliminary design stage](#). *Computers & Structures*, 86(10):1061–1079.
- [5] Degrauwe, D., De Roeck, G., Lombaert, G. (2006). Fuzzy frequency response function of a composite floor subject to uncertainty by application of the gad algorithm. *III European Conference on Computational Mechanics*, Springer, 290–290.
- [6] Pham, H. A., Nguyen, X. T., Nguyen, V. H. (2014). Fuzzy structural analysis using improved differential evolutionary optimization. *Proceedings of the International Conference on Engineering Mechanics and Automation (ICEMA 3)*, Hanoi, 492–498.
- [7] Jensen, H. A., Sepulveda, A. E. (2000). [Use of approximation concepts in fuzzy design problems](#). *Advances in Engineering Software*, 31(4):263–273.
- [8] Akpan, U. O., Koko, T. S., Orisamolu, I. R., Gallant, B. K. (2001). [Practical fuzzy finite element analysis of structures](#). *Finite Elements in Analysis and Design*, 38(2):93–111.
- [9] Adhikari, S., Chowdhury, R., Friswell, M. I. (2011). High dimensional model representation method for fuzzy structural dynamics. *Journal of Sound and Vibration*, 330(7):1516–1529.
- [10] Valdebenito, M. A., Jensen, H. A., Beer, M., Pérez, C. A. (2013). Approximate fuzzy structural analysis applying Taylor series and intervening variables. *10th world congress on structural and multidisciplinary optimization (WCSMO)*, Orlando, FL, USA.
- [11] Valdebenito, M. A., Jensen, H. A., Beer, M., Pérez, C. A. (2014). Approximation concepts for fuzzy structural analysis. *Vulnerability, Uncertainty, and Risk: Quantification, Mitigation, and Management*, 135–144.
- [12] Valdebenito, M. A., Pérez, C. A., Jensen, H. A., Beer, M. (2016). [Approximate fuzzy analysis of linear structural systems applying intervening variables](#). *Computers & Structures*, 162:116–129.
- [13] Valdebenito, M. A., Beer, M., Jensen, H. A., Chen, J., Wei, P. (2020). [Fuzzy failure probability estimation applying intervening variables](#). *Structural Safety*, 83:101909.
- [14] Tuấn, N. H., Huỳnh, L. X., Anh, P. H. (2014). [Fuzzy structural analysis subjected to harmonic forces using the improvement response surface method and assessing the safety level](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐHXD*, 8(5):12–21.
- [15] Tuan, N. H., Huynh, L. X., Anh, P. H. (2015). [A fuzzy finite element algorithm based on response surface method for free vibration analysis of structure](#). *Vietnam Journal of Mechanics*, 37(1):17–27.

- [16] Anh, P. H. (2018). [A fast fuzzy finite element approach for laterally loaded pile in layered soils](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-NUCE*, 12(3):1–9.
- [17] Pham, H.-A., Truong, V.-H., Tran, M.-T. (2020). [Fuzzy static finite element analysis for functionally graded structures with semi-rigid connections](#). *Structures*, 26:639–650.
- [18] Pham, H.-A., Truong, V.-H., Vu, T.-C. (2020). [Fuzzy finite element analysis for free vibration response of functionally graded semi-rigid frame structures](#). *Applied Mathematical Modelling*, 88:852–869.
- [19] Zadeh, L. A. (1965). [Fuzzy sets](#). *Information and Control*, 8(3):338–353.
- [20] De Munck, M., Moens, D., Desmet, W., Vandepitte, D. (2004). [An automated procedure for interval and fuzzy finite element analysis](#). *Proceedings of ISMA*, Citeseer, 9:3023–3033.
- [21] Pham, H. A., Dang, V. H. (2016). Automated optimal design of truss structures using modified DE and SAP2000 open application programming interface (OAPI). *Proceeding of the 4th International Conference on Engineering Mechanics And Automation (ICEMA 4)*, Hà Nội, Việt Nam, 368–375.
- [22] Hiếu, N. T., Tuấn, V. A., Cường, N. Q. (2019). [Tối ưu trọng lượng khung thép cột đặc dàn vì kèo sử dụng thuật toán tiến hóa vi phân](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD)-ĐH XD*, 13(5V):55–64.
- [23] Dinh-Cong, D., Van Hoa, N., Nguyen-Thoi, T. (2020). [An effective optimization-based parameterized interval analysis approach for static structural response with multiple uncertain parameters](#). *Engineering with Computers*, 36(4):1889–1902.