

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

PHÙNG VĂN MINH

**PHÂN TÍCH TĨNH VÀ ĐỘNG CỦA TẮM NANO TRÊN
NỀN ĐÀN HỒI CÓ XÉT ĐẾN HIỆU ỨNG
FLEXOELECTRIC**

Chuyên ngành: Cơ học vật rắn

Mã số: 9 44 01 07

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

HÀ NỘI – NĂM 2023

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ - BỘ QUỐC PHÒNG

Người hướng dẫn khoa học:

PGS.TS Đỗ Văn Thơm
GS.TS Lê Minh Thái

Phản biện 1: GS.TSKH Nguyễn Đình Đức

Phản biện 2: GS.TSKH Nguyễn Tiến Khiêm

Phản biện 3: GS.TS Trần Văn Liên

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số **7017/QĐ-HV**, ngày 13 tháng 12 năm 2023 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật quân sự; họp tại: Học viện Kỹ thuật quân sự vào hồi:giờ..... ngày.....tháng.....năm 2024.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Kỹ thuật quân sự
- Thư viện Quốc gia

MỞ ĐẦU

Ngày nay, thế giới đang trải qua thời kỳ của cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ IV, ngành khoa học vật liệu vẫn thể hiện vai trò là một ngành quan trọng và quyết định trong các cuộc cạnh tranh toàn cầu ở mọi lĩnh vực, đặc biệt các lĩnh vực điện tử như bán dẫn, chip vi xử lý, cảm biến được sử dụng nhiều trong các thiết bị từ công nghiệp đến đời sống xã hội. Chính vì vậy, vật liệu có kích thước nano với các hiệu ứng đặc biệt rất được nhiều chuyên gia trên thế giới quan tâm nghiên cứu và phát triển. Một trong số các hiệu ứng đó là flexoelectric trong vật liệu điện môi. Được phát hiện ra từ thập niên 50 của thế kỷ trước, nhưng cho đến đầu những năm 2000 khi ngành khoa học vật liệu và các ngành khác phát triển mạnh, hiệu ứng này mới được quan tâm nghiên cứu sâu sắc. Do tầm quan trọng của vật liệu bán dẫn, vấn đề nghiên cứu đối với loại vật liệu này nói chung và phân tích tương tác điện-cơ của kết cấu có kích thước nano có hiệu ứng flexoelectric ngày càng được các chuyên gia quan tâm, nghiên cứu, và phát triển. Trong nước, gần đây nhất, Bộ KH&ĐT tổ chức sự kiện "Hội nghị cấp cao về Công nghiệp bán dẫn Việt Nam" để thảo luận các chủ đề như hiện trạng và tiềm năng phát triển ngành công nghiệp bán dẫn, nguồn nhân lực, từ đó hướng tới sự phát triển mạnh mẽ của ngành này. Các diễn đàn tương tự cũng được tổ chức bởi Bộ KH&CN cũng như Bộ GD&ĐT để tìm cơ hội và phát triển ngành công nghiệp bán dẫn tại Việt Nam. Chính vì vậy, nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài luận án với tiêu đề: ***“Phân tích tĩnh và động của tấm nano trên nền đàn hồi có xét đến hiệu ứng flexoelectric”*** là vấn đề thực tiễn, mang ý nghĩa khoa học và có tính thời sự.

+ **Mục đích của luận án:** Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn và lý thuyết biến dạng cắt cải tiến dạng hàm hypebol để thiết lập phương trình dao động của kết cấu tấm kích thước nano tựa trên nền đàn hồi có kể đến hiệu ứng uốn điện.

+ **Nhiệm vụ nghiên cứu:**

- Xây dựng các phương trình cơ bản của tấm kích thước nano trên nền đàn hồi có xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện dựa trên cơ sở của lý thuyết biến dạng cắt cải tiến dạng hàm hypebol.

- Xây dựng thuật toán phần tử hữu hạn, chương trình tính toán tĩnh và động; khảo sát ứng xử tĩnh và động của tấm kích thước nano tựa trên

nền đàn hồi có xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện để tìm ra tương tác cơ-điện của kết cấu này.

+ Đối tượng nghiên cứu:

- Tấm có kích thước nano kể đến ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện đặt trên nền đàn hồi hai hệ số với các điều kiện biên khác nhau.

- Tải trọng tác dụng lên tấm có kích thước nano là tải trọng tĩnh và tải trọng thay đổi theo thời gian.

+ Phạm vi nghiên cứu: Nghiên cứu ứng xử cơ học của tấm có kích thước nano chịu tải trọng tĩnh, đồng kể đến hiệu ứng uốn điện bằng phương pháp PTHH trên cơ sở lý thuyết biến dạng cắt cải tiến dạng hàm hypebol (hyperbolic sine function), và chưa kể đến hiệu ứng kích thước nhỏ.

+ Phương pháp nghiên cứu: Phương pháp phân tử hữu hạn dựa trên lý thuyết biến dạng cắt cải tiến sử dụng hàm hypebol và nguyên lý năng lượng toàn phần cực tiểu để thiết lập các phương trình cơ bản của bài toán uốn tĩnh, dao động riêng, và dao động cưỡng bức của kết cấu tấm kích thước nano có kể đến hiệu ứng uốn điện.

+ Cấu trúc của luận án: Gồm phần mở đầu, bốn chương, phần kết luận và kiến nghị, tài liệu tham khảo.

Mở đầu: Trình bày tính cấp thiết và cấu trúc của luận án.

Chương 1: Tổng quan về vấn đề nghiên cứu.

Chương 2: Xây dựng các phương trình cơ bản cho bài toán tĩnh và động lực học của tấm kích thước nano trên nền đàn hồi có xét đến hiệu ứng uốn điện.

Chương 3: Nghiên cứu đáp ứng tĩnh của tấm kích thước nano trên nền đàn hồi có xét đến hiệu ứng uốn điện.

Chương 4: Nghiên cứu đáp ứng động lực học của tấm kích thước nano đặt trên nền đàn hồi có xét đến hiệu ứng uốn điện.

Kết luận và kiến nghị

Trình bày những kết quả chính, đóng góp mới của luận án và các kiến nghị.

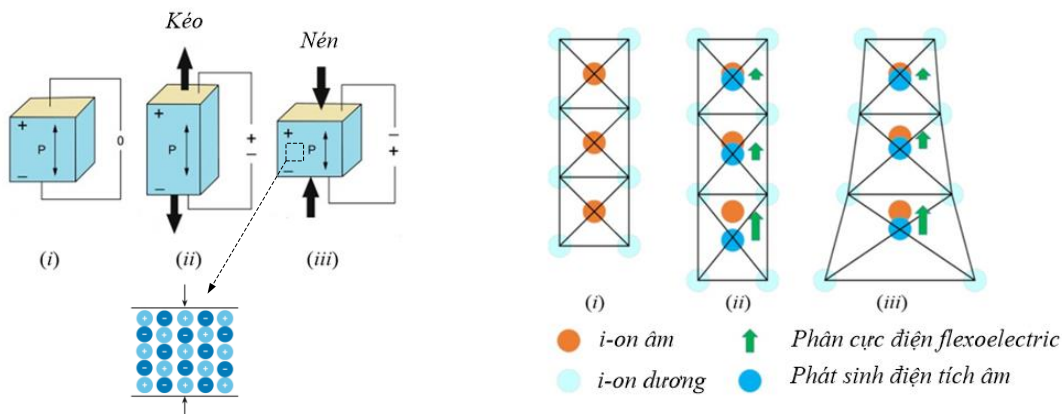
Tài liệu tham khảo

Chương 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Tổng quan về hiệu ứng uốn điện

1.1.1. Hiệu ứng uốn điện

Hiệu ứng uốn điện (tên tiếng Anh là "flexoelectric effect" hay "flexoelectricity") là hiện tượng phân cực điện đối với biến thiên biến dạng cơ học. Ở kích thước nano, khi mà các biến thiên biến dạng được sinh ra, hiệu ứng uốn điện sẽ thể hiện rõ rệt. Sự khác biệt giữa hiệu ứng áp điện và hiệu ứng uốn điện được thể hiện trực quan trên Hình 1.1.

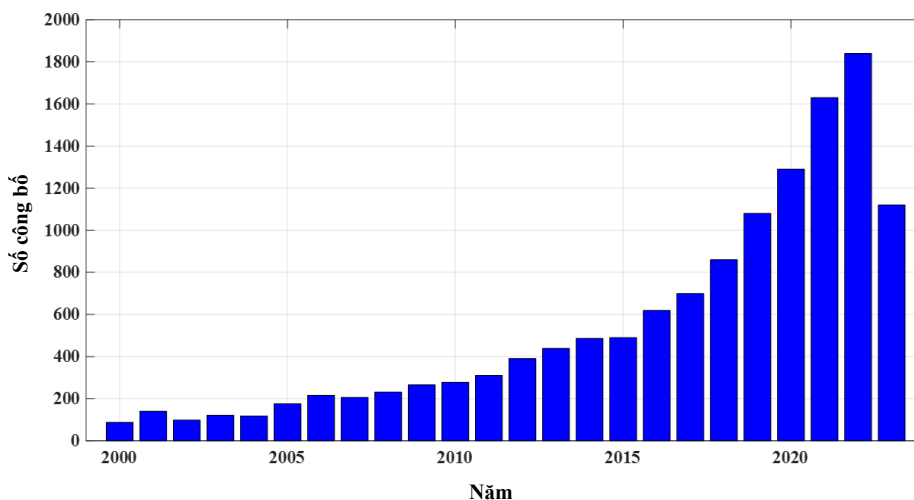


a) Hiệu ứng áp điện do biến dạng cơ học

b) Hiệu ứng uốn điện do biến thiên biến dạng

Hình 1.1. Sự khác nhau giữa hiệu ứng áp điện và hiệu ứng uốn điện [1]

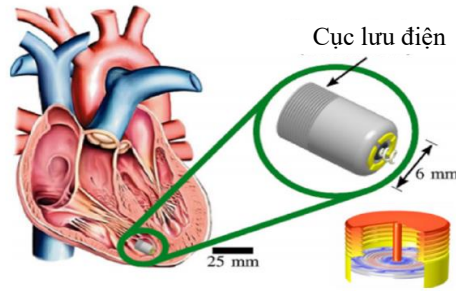
Trên Hình 1.2 mô tả xu hướng quan tâm của các nhà khoa học trên thế giới dựa trên dữ liệu từ Google Scholar cho các công bố liên quan đến từ khóa "flexoelectric" trong 22 năm gần nhất.



Hình 1.2. Số lượng các công bố liên quan đến từ khóa "flexoelectric" trong 22 năm gần nhất

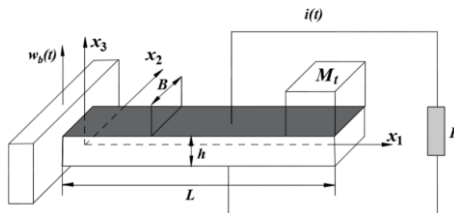
1.1.2. Ứng dụng của hiệu ứng uốn điện

- Ứng dụng trong chế tạo các thiết bị lưu điện cỡ nano mét:



Hình 1.3. Ứng dụng của hiệu ứng uốn điện trong chế tạo thiết bị trợ tim [2]

- Ứng dụng trong chế tạo các thiết bị cảm ứng (sensor) và thiết bị kích thích (actuator):



Hình 1.4. Ứng dụng của hiệu ứng uốn điện trong chế tạo các thiết bị cảm ứng (sensor) và thiết bị kích thích (actuator) [3]

1.2. Tổng quan về tính toán kết cấu kích thước nano có hiệu ứng uốn điện

1.2.1. Bài toán phân tích tĩnh và dao động riêng của kết cấu kích thước nano có kể đến hiệu ứng uốn điện

Về các kết cấu dạng tấm: Yan [4] sử dụng lý thuyết tấm cổ điển để nghiên cứu đáp ứng uốn tĩnh và dao động riêng của tấm nano áp điện có kể đến hiệu ứng uốn điện dựa trên lời giải chính xác.

Đối với kết cấu dạng vỏ sẽ có nhiều khó khăn hơn về mặt mô hình hóa và tính toán. Khorshidi và nhóm nghiên cứu [5] sử dụng phương pháp số để mô hình hóa và phân tích đặc tính dao động của vỏ nón nano uốn điện với các lớp áp điện.

1.2.2. Bài toán phân tích động lực học của kết cấu kích thước nano có kể đến hiệu ứng uốn điện

Với bài toán phân tích dao động cưỡng bức của các kết cấu nano có kể đến hiệu ứng uốn điện thực sự còn hạn chế. Có thể kể đến các công

trình tiêu biểu như Farzad và Mohammad [6] sử dụng phương pháp Galerkin để nghiên cứu dao động cưỡng bức của tấm có kể đến hiệu ứng uốn điện, trong đó, tấm được tựa trên nền đàn hồi Winkler-Pasternak.

1.2.3. Tình hình nghiên cứu trong nước về kết cấu có kích thước nano với hiệu ứng uốn điện

Tại Việt Nam, về ứng xử cơ học của kết cấu kích thước nano có kể đến hiệu ứng uốn điện, theo nghiên cứu của tác giả, hiện tại trong nước chưa có công bố liên quan đến hiệu ứng này.

1.3. Các vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu

Nghiên cứu đáp ứng tĩnh và động của các kết cấu kích thước nano có xét tới ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện bằng nhiều lý thuyết biến dạng cắt khác nhau, dưới tác dụng của các loại tải trọng tĩnh và động. Nghiên cứu đáp ứng tĩnh và động của các kết cấu kích thước nano uốn điện có tương tác với nền đàn hồi, trong đó nền đàn hồi có các hệ số độ cứng thay đổi.

1.4. Nhiệm vụ của luận án

Xây dựng được các quan hệ ứng xử cơ học và các phương trình cơ bản của tấm kích thước nano trên nền đàn hồi có kể đến hiện tượng uốn điện trên cơ sở lý thuyết biến dạng cắt cải tiến cho kết cấu nano và phương pháp phần tử hữu hạn. Thiết lập bộ chương trình tính toán trong môi trường MATLAB cho kết cấu tấm kích thước nano trên nền đàn hồi có kể đến hiệu ứng uốn điện. Khảo sát ảnh hưởng của các thông số hình học và vật liệu đến đáp ứng tĩnh và động của kết cấu kích thước nano có kể đến hiện tượng uốn điện.

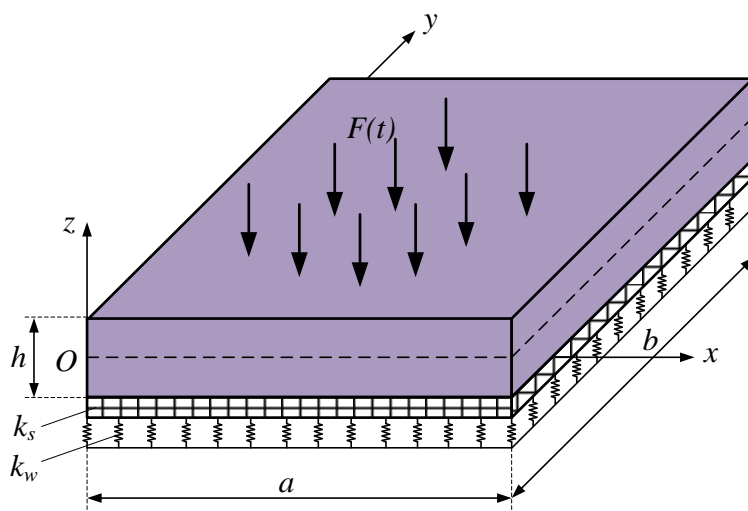
Kết luận chương 1

Trong chương này, tác giả đã tiến hành tổng quan các nội dung cơ bản về hiện tượng uốn điện bao gồm khái niệm, nguồn gốc, quá trình phát triển của các lý thuyết về hiệu ứng uốn điện. Chương 1 cũng thực hiện phân tích tóm tắt về ứng xử cơ học của kết cấu kích thước nano có kể đến hiệu ứng uốn điện. Từ đó, đưa ra những nội dung nghiên cứu còn chưa được quan tâm và công bố để làm cơ sở cho việc chọn lựa đề tài và xác định nhiệm vụ của luận án.

Chương 2. XÂY DỰNG CÁC PHƯƠNG TRÌNH CƠ BẢN CHO BÀI TOÁN TĨNH VÀ ĐỘNG LỰC HỌC CỦA TẤM KÍCH THƯỚC NANO TRÊN NỀN ĐÀN HỒI CÓ XÉT ĐẾN HIỆU ỨNG UỐN ĐIỆN

2.1. Mô hình bài toán và các giả thiết

Khảo sát tấm hình chữ nhật có kích thước nano với các thông số hình học như thể hiện trên Hình 2.1.



Hình 2.1. Mô hình tấm có kích thước nano tựa trên nền đàn hồi Winkler-Pasternak

2.2. Hiệu ứng uốn điện và các quan hệ ứng xử cơ học của tấm có kích thước nano chịu tải trọng tĩnh và tải trọng động

2.2.1. Trường chuyển vị

Theo lý thuyết biến dạng cắt dựa trên hàm hyperbol [7], [8], các chuyển vị u , v và w theo phương x , y và z tương ứng phụ thuộc vào tọa độ của điểm thuộc tấm có dạng sau:

$$\begin{cases} u(x, y, z, t) = -z \frac{\partial w_b(x, y, 0, t)}{\partial x} - f(z) \frac{\partial w_s(x, y, 0, t)}{\partial x} \\ v(x, y, z, t) = -z \frac{\partial w_b(x, y, 0, t)}{\partial y} - f(z) \frac{\partial w_s(x, y, 0, t)}{\partial y} \\ w(x, y, z, t) = w_b(x, y, 0, t) + w_s(x, y, 0, t) \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.2. Trường biến dạng

Vecto biến dạng của tấm được suy ra từ trường chuyển vị như sau:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = z\boldsymbol{\varepsilon}_b + f(z)\boldsymbol{\varepsilon}_s; \boldsymbol{\gamma} = \frac{\partial \zeta}{\partial z} z \boldsymbol{\gamma}_0 \quad (2.2)$$

2.2.3. Biến thiên biến dạng

Biến thiên biến dạng được biểu thị như sau:

$$\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta}_b + \frac{\partial f(z)}{\partial z} \boldsymbol{\eta}_s \quad (2.3)$$

2.2.4. Quan hệ ứng suất-biến dạng

Khi xem xét hiệu ứng uốn điện, các thành phần ứng suất và vectơ chuyển vị điện cho vật liệu điện môi có kích thước nano được biểu thị như sau [9]:

$$T_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} - e_{kij} E_k; \Psi_{ijm} = -f_{kijm} E_k; P_i = e_{ijk} \varepsilon_{jk} + \kappa_{ij} E_k + f_{ijkl} \eta_{jkl} \quad (2.4)$$

trong đó c_{ijkl} , e_{kij} , f_{kijm} , và κ_{ij} lần lượt là các thành phần của các tenxơ: Hằng số đàn hồi, áp điện, uốn điện và hằng số điện môi. Chúng là các thông số phụ thuộc vào vật liệu. T_{ij} là tenxơ ứng suất, P_i là vectơ chuyển vị điện và Ψ_{ijm} là tenxơ ứng suất mô-men hoặc tenxơ ứng suất bậc cao.

2.2.5. Cường độ điện trường

Biểu thức của cường độ điện trường như sau:

$$\begin{aligned} E_z = & \frac{e_{31}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_b}{\partial y^2} \right) z + \frac{e_{31}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_s}{\partial y^2} \right) f(z) \\ & + \frac{f_{14}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 w_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_b}{\partial y^2} \right) + \frac{f_{14}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 w_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_s}{\partial y^2} \right) \frac{\partial f(z)}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.3. Nguyên lý năng lượng toàn phần cực tiểu

Để thiết lập phương trình cân bằng cho kết cấu, luận án sử dụng nguyên lý năng lượng toàn phần cực tiểu, theo đó tổng công khả dĩ của các thành phần:

$$\delta U + \delta U^{found} - \delta W - \delta T = 0 \quad (2.6)$$

2.3.1. Thế năng biến dạng của tấm có kích thước nano

Với điều kiện mạch hở, năng lượng điện tự do Gibbs có dạng sau [9]:

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{T} + \boldsymbol{\gamma}^T \mathbf{S} + \boldsymbol{\eta}^T \boldsymbol{\Psi}) dV = \frac{1}{2} \int_V \left(\boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\gamma}^T \mathbf{S} - \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{e}_{31} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} E_z - \boldsymbol{\eta}^T \mathbf{f}_{14} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} E_z \right) dV \quad (2.7)$$

2.3.2. Thế năng biến dạng đàn hồi của nền

Vì tâm tựa trên nền đàn hồi nên biểu thức thế năng của tấm kể đến ảnh hưởng của nền đàn hồi có công thức sau:

$$U^{found} = \frac{1}{2} \int_S \left(k_w w^2 + k_s \left(\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) \right) dS \quad (2.8)$$

trong đó k_w và k_s là hai hệ số của nền đàn hồi.

2.3.3. Công của ngoại lực

Biểu thức của lực quán tính có dạng:

$$F_{qt} = \int_V \rho (\ddot{u} + \ddot{v} + \ddot{w}) dV \quad (2.9)$$

Công do ngoại lực tác dụng được tính như sau:

$$W = \int_S F \cdot w \cdot dS = \int_S F \{w_b + w_s\} dS \quad (2.10)$$

2.4. Phương trình phần tử hữu hạn giải bài toán tấm có kích thước nano tựa trên nền đàn hồi kể đến hiệu ứng uốn điện

2.4.1. Mô hình phần tử và véc-tơ chuyển vị nút phần tử

Trong luận án này, phần tử tấm là phần tử chữ nhật bốn nút như **Error! Reference source not found.**, trong đó mỗi nút có sáu bậc tự do.

$$\mathbf{q}_e = \sum_{i=1}^4 \left\{ w_{bi}, w_{si}, \left(\frac{\partial w_b}{\partial x} \right)_i, \left(\frac{\partial w_s}{\partial x} \right)_i, \left(\frac{\partial w_b}{\partial y} \right)_i, \left(\frac{\partial w_s}{\partial y} \right)_i \right\}^T$$

2.4.2. Các ma trận và véc-tơ phần tử

Ma trận độ cứng phần tử tấm được tính toán theo công thức:

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}_e = & \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(z\mathbf{B}_1^T + f(z)\mathbf{B}_2^T \right) \mathbf{C}_b \left(z\mathbf{B}_1 + f(z)\mathbf{B}_2 \right) + \mathbf{B}_3^T \mathbf{C}_s \mathbf{B}_3 \right\} |\mathbf{J}| drdsdz \\
& - \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(z\mathbf{B}_1^T + f(z)\mathbf{B}_2^T \right) e_{31} \mathbf{I}_3 \frac{e_{31}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}_b}{\partial y^2} \right) \cdot z \right\} |\mathbf{J}| drdsdz \\
& - \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(z\mathbf{B}_1^T + f(z)\mathbf{B}_2^T \right) \frac{e_{31} \cdot e_{31}}{\kappa_{33}} \mathbf{I}_3 \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}_s}{\partial y^2} \right) f(z) \right\} |\mathbf{J}| drdsdz \\
& - \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(z\mathbf{B}_1^T + f(z)\mathbf{B}_2^T \right) e_{31} \mathbf{I}_3 \frac{f_{14}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}_b}{\partial y^2} \right) \right\} |\mathbf{J}| drdsdz \\
& - \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(z\mathbf{B}_1^T + f(z)\mathbf{B}_2^T \right) e_{31} \mathbf{I}_3 \frac{f_{14}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}_s}{\partial y^2} \right) \frac{\partial f(z)}{\partial z} \right\} |\mathbf{J}| drdsdz \\
& - \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(\mathbf{B}_4^T + \frac{\partial f(z)}{\partial z} \mathbf{B}_5^T \right) f_{14} \mathbf{I}_2 \frac{e_{31}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}_b}{\partial y^2} \right) \cdot z \right\} |\mathbf{J}| drdsdz \\
& - \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(\mathbf{B}_4^T + \frac{\partial f(z)}{\partial z} \mathbf{B}_5^T \right) f_{14} \mathbf{I}_2 \frac{e_{31}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}_s}{\partial y^2} \right) f(z) \right\} |\mathbf{J}| drdsdz \\
& - \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(\mathbf{B}_4^T + \frac{\partial f(z)}{\partial z} \mathbf{B}_5^T \right) f_{14} \mathbf{I}_2 \frac{f_{14}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}_b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}_b}{\partial y^2} \right) \right\} |\mathbf{J}| drdsdz \\
& - \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left\{ \left(\mathbf{B}_4^T + \frac{\partial f(z)}{\partial z} \mathbf{B}_5^T \right) f_{14} \mathbf{I}_2 \frac{f_{14}}{\kappa_{33}} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{H}_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}_s}{\partial y^2} \right) \frac{\partial f(z)}{\partial z} \right\} |\mathbf{J}| drdsdz
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Ma trận độ cứng của nền đàn hồi có dạng:

$$\mathbf{K}_e^f = \int_{s_e} \left(k_w (\mathbf{H}_b + \mathbf{H}_s)^T (\mathbf{H}_b + \mathbf{H}_s) + k_s \left(\begin{aligned} & \left(\left(\frac{\partial \mathbf{H}_b}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{H}_s}{\partial x} \right)^T \left(\frac{\partial \mathbf{H}_b}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{H}_s}{\partial x} \right) \right) \\ & + \left(\left(\frac{\partial \mathbf{H}_b}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}_s}{\partial y} \right)^T \left(\frac{\partial \mathbf{H}_b}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}_s}{\partial y} \right) \right) \end{aligned} \right) dS q_e \tag{2.12}$$

Ma trận khối lượng phần tử có dạng:

$$\mathbf{M}_e = \int_V (\rho \mathbf{H}^T \mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{H}) dV = \int_{-h/2}^{h/2} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\rho \mathbf{H}^T \mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{H}) |J| dr ds dz \quad (2.13)$$

Véc-tơ ngoại lực có dạng:

$$\mathbf{F}_e = \int_{S_e} (\mathbf{H}_b + \mathbf{H}_s)^T \bar{\mathbf{F}}_s dS = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\mathbf{H}_b + \mathbf{H}_s)^T \bar{\mathbf{F}}_s |J| dr ds \quad (2.14)$$

2.4.3. Phương trình dao động

Sau khi tập hợp các ma trận và véc-tơ phần tử, ta thu được hệ phương trình vi phân dao động của toàn bộ kết cấu như sau:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K} + \mathbf{K}^f) \mathbf{q} = \mathbf{F} \quad (2.15)$$

Kết luận chương 2

Trong chương này, tác giả đã đưa ra mô hình cơ học của kết cấu tấm có kích thước nano kể đến hiệu ứng uốn điện cũng như các giả thiết được sử dụng. Các quan hệ cơ học và đặc biệt là cường độ điện trường do hiệu ứng uốn điện cho tấm được thiết lập theo cơ sở lý thuyết biến dạng cắt cải tiến dựa trên hàm hyperbol và phương pháp phần tử hữu hạn. Luận án sử dụng hàm dạng Hermite để xấp xỉ trường chuyển vị của một điểm trong phần tử tấm, sử dụng nguyên lý năng lượng toàn phần cực tiểu, phương trình cân bằng năng lượng của phần tử tấm được thiết lập. Từ đó, các ma trận và véc-tơ của phần tử cũng như của toàn bộ kết cấu được xác định. Phương trình vi phân dao động của tấm có kích thước nano ở dạng phần tử hữu hạn được thiết lập.

Chương 3. NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG TĨNH CỦA TẤM KÍCH THƯỚC NANO TRÊN NỀN ĐÀN HỒI CÓ XÉT ĐẾN HIỆU ỨNG UỐN ĐIỆN

3.1. Ví dụ kiểm chứng

3.1.1. Ví dụ kiểm chứng 1

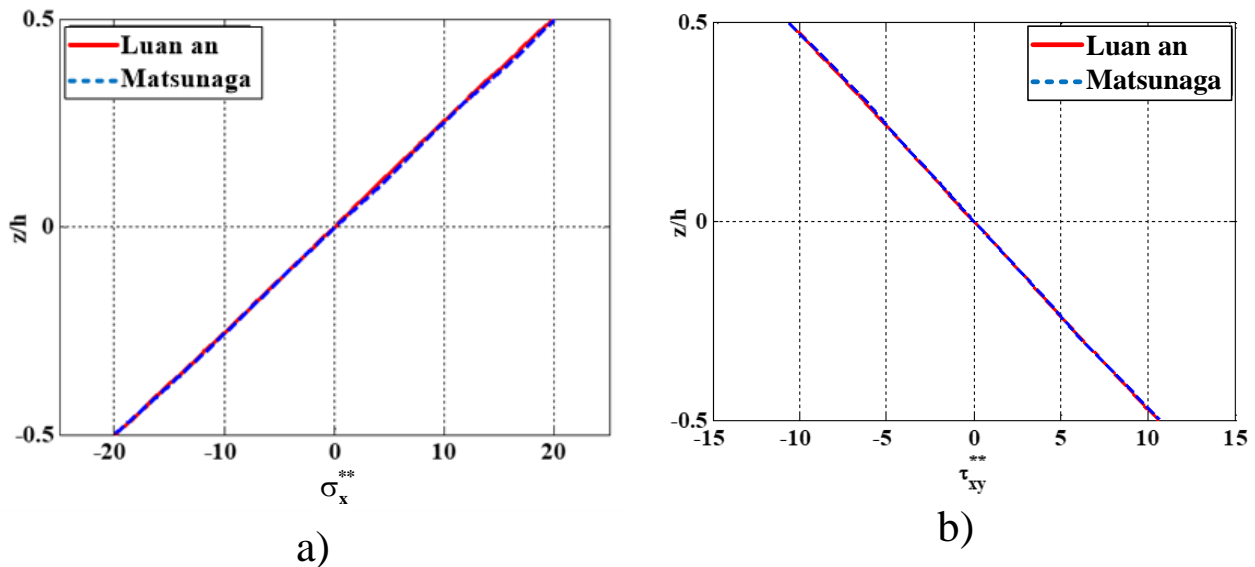
Xét một tấm tựa trên nền đàn hồi có các kích thước $a=b=0.2\text{m}$, $h=a/10$. Cơ tính của vật liệu tấm: $E=320.24\text{ GPa}$, hệ số Poisson $\nu=0.26$. Tấm chịu liên kết tựa đơn trên bốn cạnh SSSS, và chịu tải trọng tĩnh phân bố đều q_0 .

Bảng 3.1. Độ võng không thứ nguyên của tấm tựa đơn bốn cạnh với nền đàn hồi hai hệ số

K_w^*	K_s^*	$a/h=10$					
		[10]	[11]	Luận án			
				8x8 phần tử	10x10 phần tử	12x12 phần tử	14x14 phần tử
1	5	3.3455	3.3455	3.3797	3.3643	3.3560	3.3512
	10	2.7505	2.7504	2.7743	2.7635	2.7578	2.7545

3.1.2. Ví dụ kiểm chứng 2

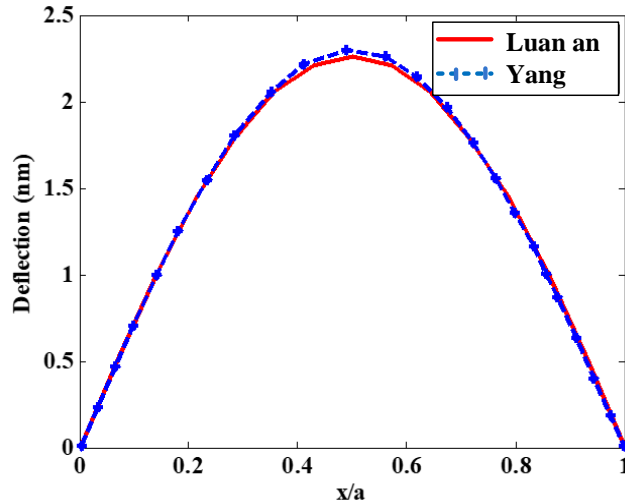
Xét một tấm hình vuông có kích thước hình học và thông số vật liệu: $a/b=1$, $a/h=10$, $E=380\text{ GPa}$, và $\nu=0.3$.



Hình 3.1. Sự phân bố ứng suất theo phương chiều dày của tấm vuông chịu tải trọng hình sin

3.1.3. Ví dụ kiểm chứng 3

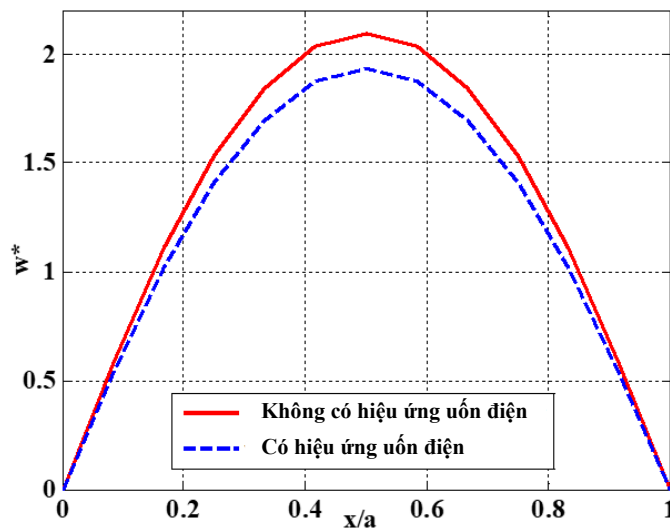
Cuối cùng là ví dụ kiểm chứng độ võng không thứ nguyên lớn nhất của tấm có kích thước nano tựa đơn bốn cạnh với các kích thước $h=20$ nm và $a=b=50h$. Cơ tính của vật liệu: $c_{11}=102$ GPa, $c_{12}=31$ GPa, $c_{33}=35.50$ GPa, $e_{31}=-17.05$ C/m², $\kappa_{33}=1.76 \cdot 10^{-8}$ C/(Vm) và hệ số uốn điện $f_{14}=10^{-7}$ C/m. Tấm chịu tác dụng của tải trọng phân bố đều với cường độ $q_0=-0.05$ MPa.



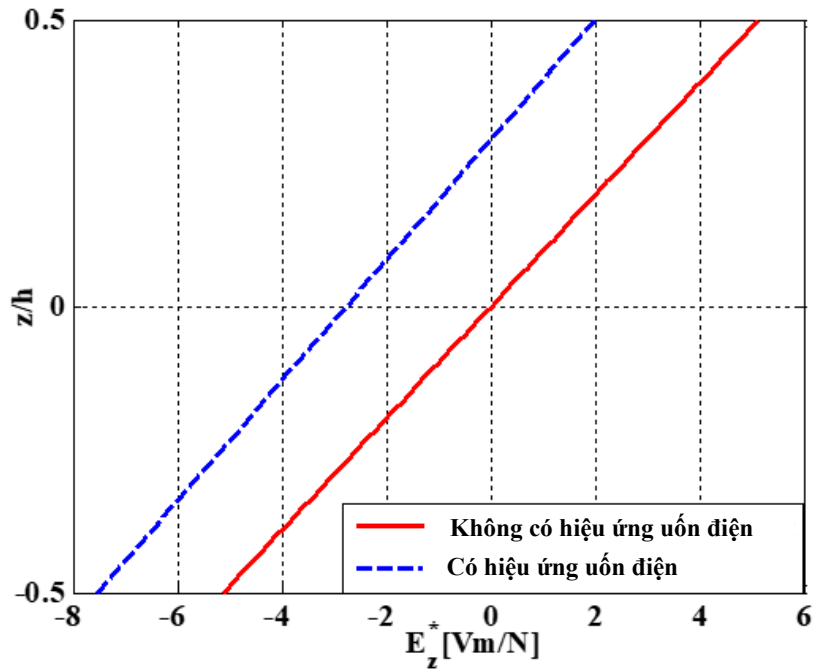
Hình 3.2. So sánh độ võng không thứ nguyên lớn nhất của tấm có kích thước nano kể đến hiệu ứng uốn điện, SSSS, $y=b/2$

3.2. Khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng đến đáp ứng tĩnh của tấm

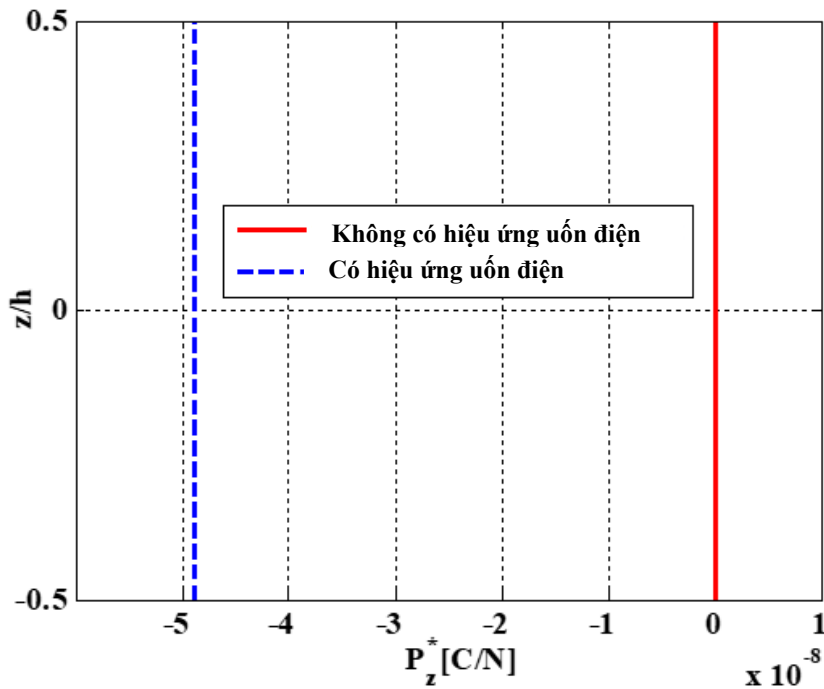
3.2.1. Ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện



Hình 3.3. Độ võng w^* của tấm tại $y=b/2$ trong trường hợp có và không có hiệu ứng uốn điện



Hình 3.4. Sự phân bố cường độ điện trường E_z dọc theo chiều dày trong trường hợp có và không có hiệu ứng uốn điện

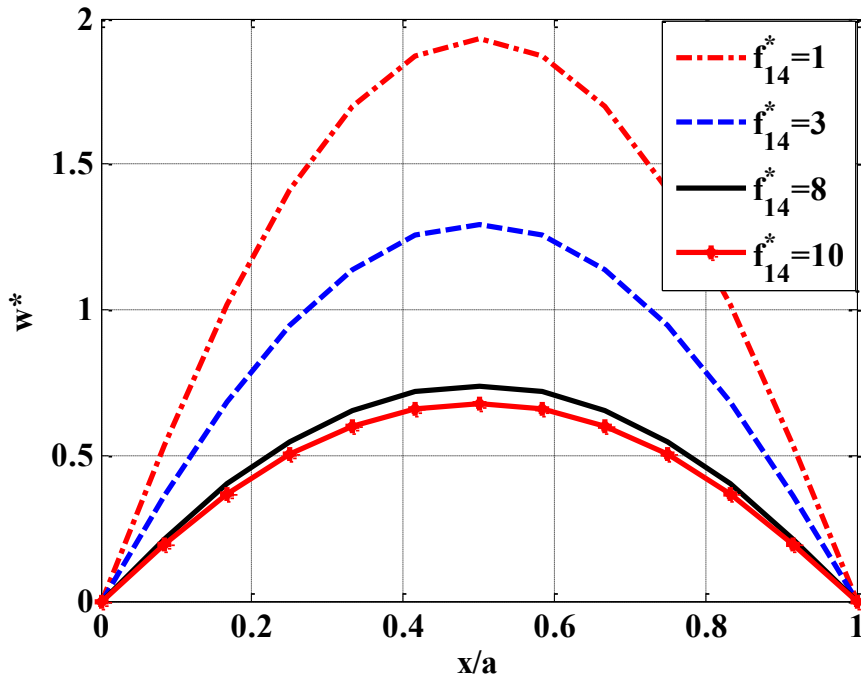


Hình 3.5. Sự phân bố P_z theo chiều dày của tấm trong trường hợp có và không có hiệu ứng uốn điện

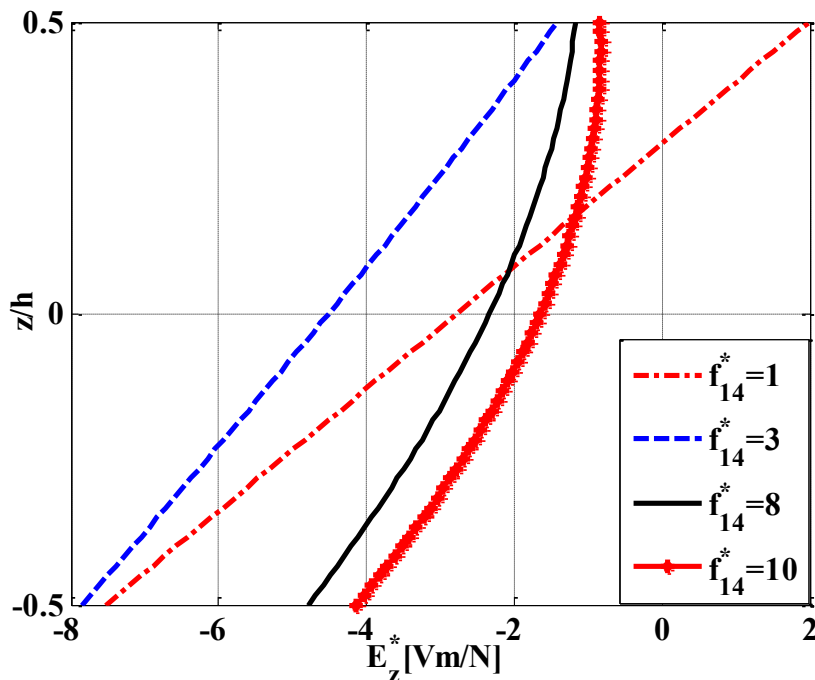
3.2.2. Ảnh hưởng của hệ số uốn điện

Để khảo sát ảnh hưởng của hệ số f_{14} đến ứng xử của tấm nano (SSSS, $K_w^* = 100$, $K_s^* = 10$), cho giá trị của f_{14}^* tăng dần từ 1 đến 10. Độ võng của

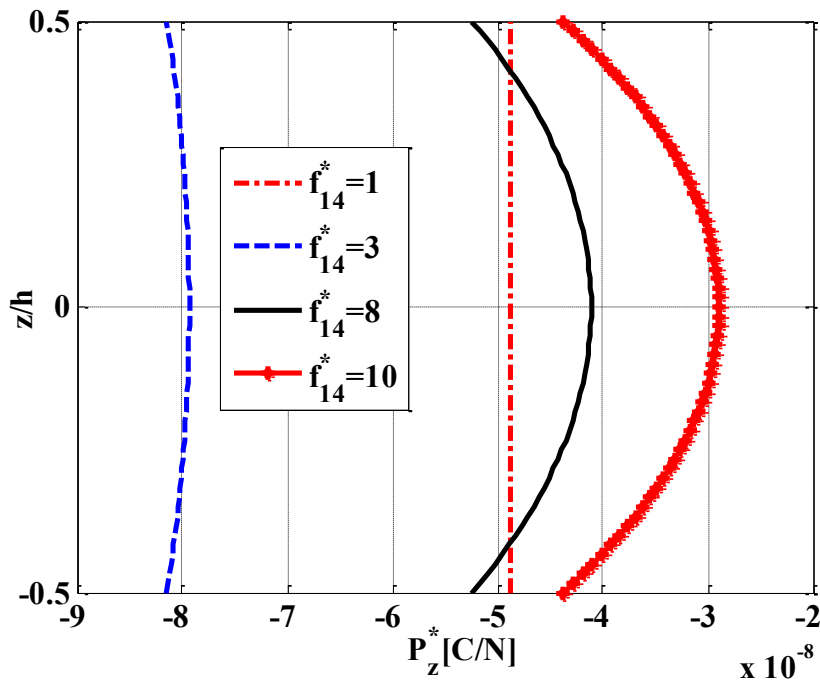
tâm tại đường $y=b/2$ được thể hiện trong Hình 3.6; sự phân bố dọc theo hướng chiều dày tại tâm tâm của các thành phần E_z , P_z và ứng suất được trình bày trên Hình 3.7 đến **Error! Reference source not found.**



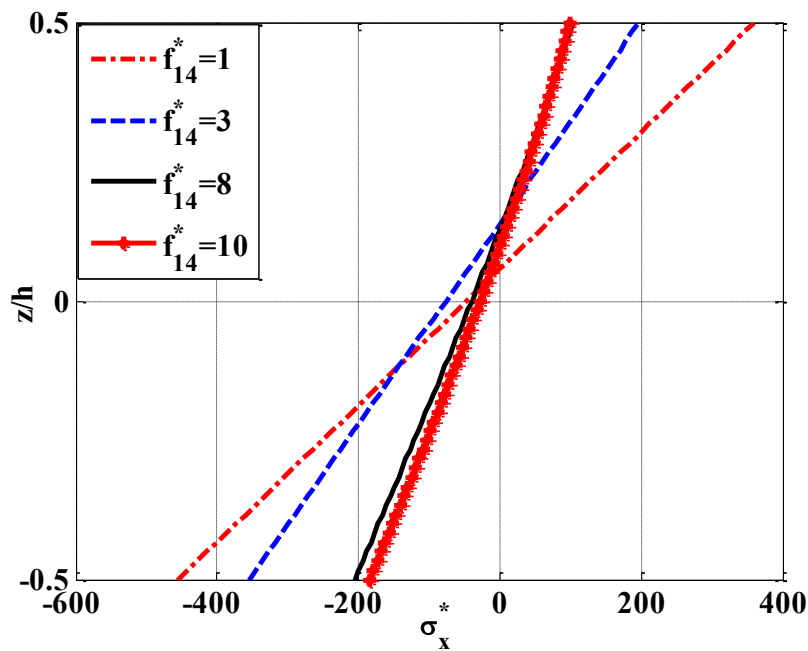
Hình 3.6. Độ võng của tâm tại đường $y = b/2$ với các giá trị khác nhau của f_{14}^*



Hình 3.7. Sự phân bố cường độ điện trường E_z dọc theo chiều dày với các giá trị khác nhau của f_{14}^*



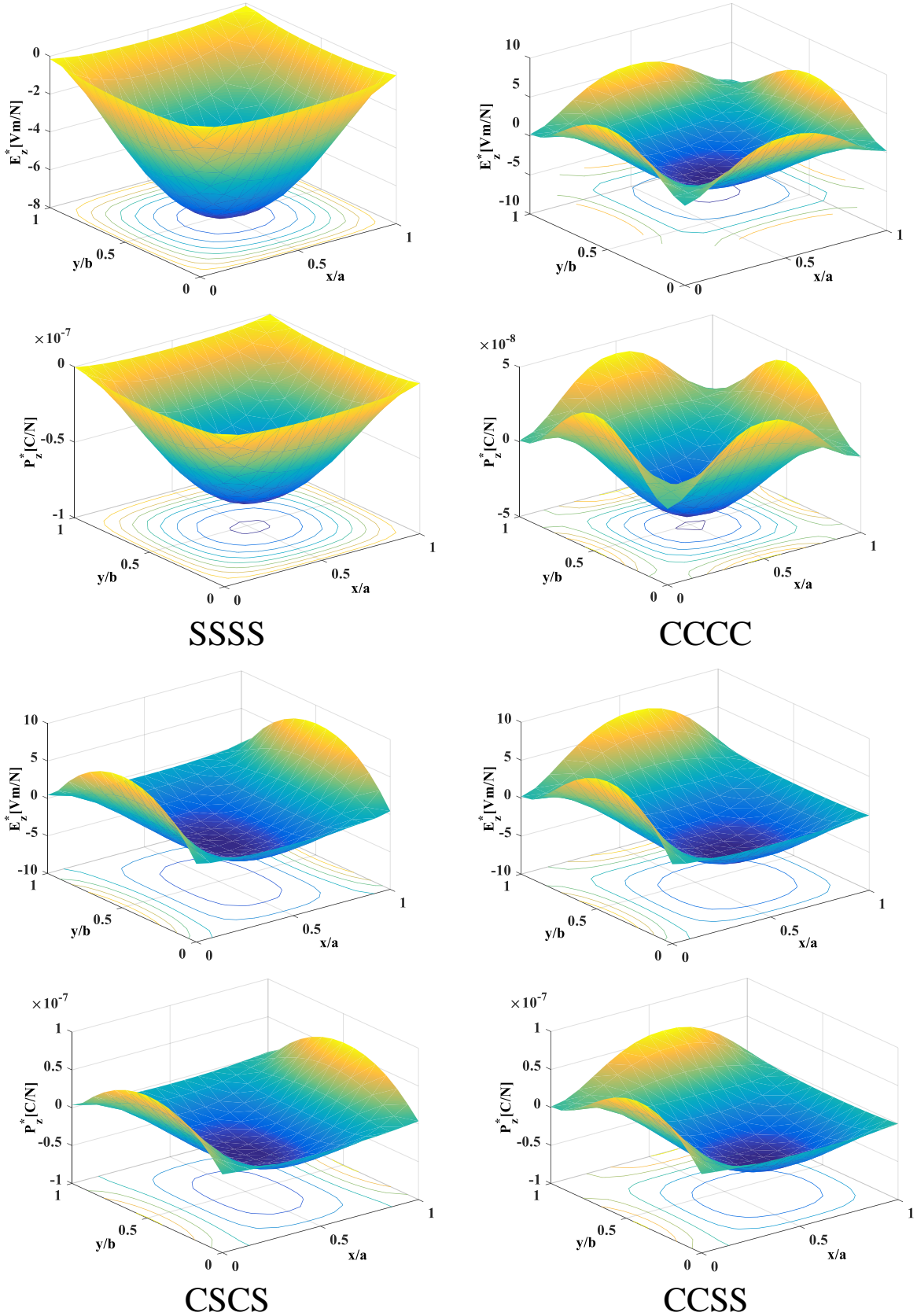
Hình 3.8. Sự phân bố P_z dọc theo chiều dày với các giá trị khác nhau của f_{14}^*



Hình 3.9. Sự phân bố ứng suất pháp σ_x^* dọc theo chiều dày với các giá trị khác nhau của f_{14}^*

3.2.3. Ảnh hưởng của điều kiện biên

Các bề mặt phân bố của E_z và P_z dọc theo các cạnh x và y được trình bày trong Hình 3. 10.



Hình 3. 10. Bề mặt phân bố của E_z và P_z

đọc theo các cạnh x và y , $z = -\frac{h}{2}$

Kết luận chương 3

Trong Chương 3, tác giả trình bày thuật toán tính toán tấm có kích thước nano nằm trên nền đàn hồi chịu tải trọng tĩnh và xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện. Một số kết quả chính đạt được trong chương này như sau:

- Đã xây dựng thuật toán và chương trình tính toán NFS_2023 để tính toán tấm có kích thước nano tựa trên nền đàn hồi chịu tải trọng tĩnh và xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện.

- Kết quả khảo sát cho thấy có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến đáp ứng uốn tĩnh của các tấm nano tựa trên nền đàn hồi và có xét đến ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện. Tuy nhiên, có những yếu tố ảnh hưởng lớn như tham số f_{14} thể hiện ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện, tham số hình học của tấm và độ cứng của nền đàn hồi. Vì vậy, khi thiết kế các tấm nano cho các yêu cầu đặc biệt, các kỹ sư cần lưu ý các vấn đề trên để kết cấu hoạt động đạt hiệu quả cao.

Chương 4. NGHIÊN CỨU ĐÁP ỨNG ĐỘNG LỰC HỌC CỦA TẤM KÍCH THƯỚC NANO ĐẶT TRÊN NỀN ĐÀN HỒI CÓ XÉT ĐẾN HIỆU ỨNG UỐN ĐIỆN

4.1. Ví dụ kiểm chứng cho bài toán dao động riêng

4.1.1. Ví dụ kiểm chứng 1

Xét một tấm vuông tựa đơn bốn cạnh có thông số hình học $a/b=1$, chiều dày tấm $h=a/10$ và $a/20$, cơ tính vật liệu $E=380$ Gpa, $\rho = 3800$ kg/m³ và $\nu = 0.3$.

Bảng 4.1. Bảng kết quả tần số dao động riêng không thứ nguyên đầu tiên $\bar{\omega}$

K_w^*	K_s^*	a/h	Phương pháp giải tích [12]	Luận án			
				4x4 phần tử	8x8 phần tử	10x10 phần tử	16x16 phần tử
100	0	10	0.1162	0.1129	0.1154	0.1157	0.1160
	100		0.1619	0.1591	0.1612	0.1614	0.1617

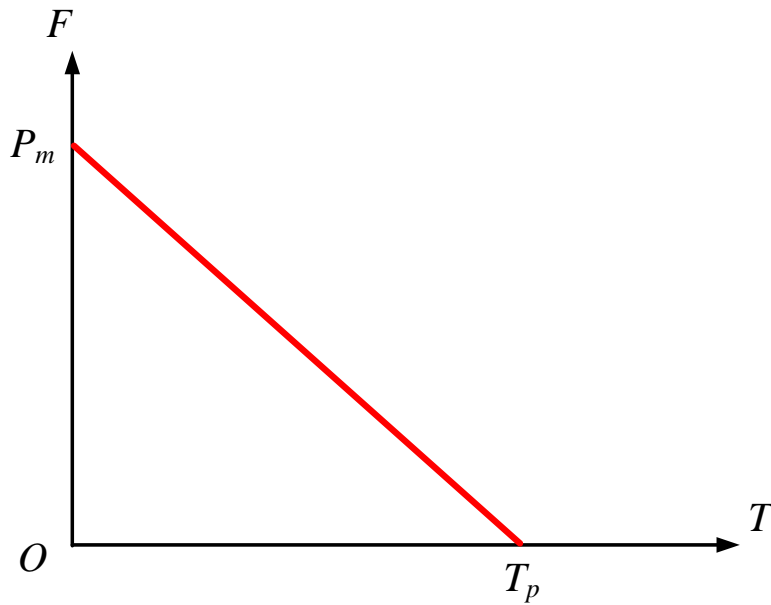
4.1.2. Ví dụ kiểm chứng 2

Bảng 4.2. So sánh các tần số cơ bản ω (GHz) của tấm kích thước nano có kể đến hiệu ứng uốn điện

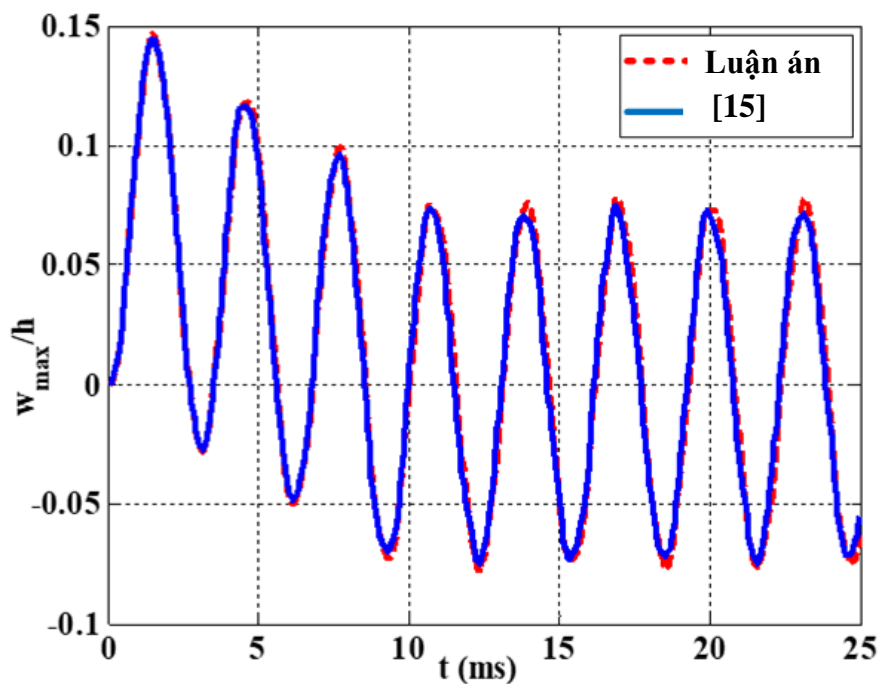
a/h	Công thức chính xác [9]	Luận án			
		16 phần tử	64 phần tử	100 phần tử	256 phần tử
50	0.48132	0.46445	0.47666	0.47824	0.47998
100	0.28243	0.27058	0.27838	0.27938	0.28048
150	0.22723	0.21622	0.22291	0.22377	0.22471

4.2. Ví dụ kiểm chứng cho bài toán động lực học

Kết quả tính toán chuyển vị tại giữa tấm biến đổi theo thời gian được so sánh với kết quả tính bằng lời giải Navier trong công trình của Song và cộng sự [13] thể hiện trên Hình 4.2.



Hình 4.1. Mô hình tải trọng biến đổi theo thời gian



Hình 4.2. So sánh chuyển vị giữa tám biến đổi theo thời gian

4.3. Khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng đến dao động riêng của tấm có kích thước nano

4.3.1. Ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện

Trong tiểu mục này, luận án trình bày ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện đối với dao động riêng của tấm nano trên nền đàn hồi. Giá trị của f_{14} thay đổi để tham số f_{14}^* nhận các giá trị từ 0 đến 5.

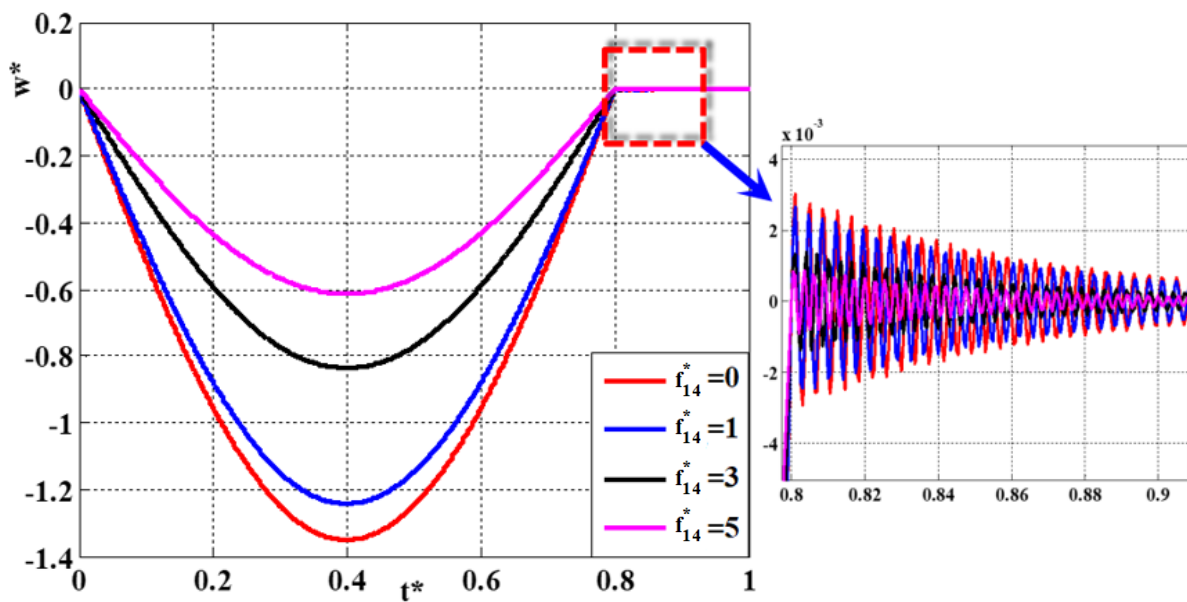
Bảng 4.3. Sự phụ thuộc của các tần số dao động riêng ω_i^* của tấm nano có bốn cạnh tựa đơn vào tham số f_{14}^* , $K_w^* = 10$, $K_s^* = 2$

f_{14}^*	ω_i^*					
	ω_1^*	ω_2^*	ω_3^*	ω_4^*	ω_5^*	ω_6^*
0	2.2558	5.4243	8.4853	10.6913	13.5706	18.0115
1	2.3992	5.8007	9.0909	11.4799	14.5822	19.4298
2	2.7403	6.5600	10.1685	12.7563	16.0864	21.2302
3	3.1312	7.2516	11.0135	13.6602	17.0669	22.2509
4	3.4858	7.7584	11.5672	14.2157	17.6427	22.8143
5	3.7778	8.1120	11.9296	14.5697	18.0051	23.1685

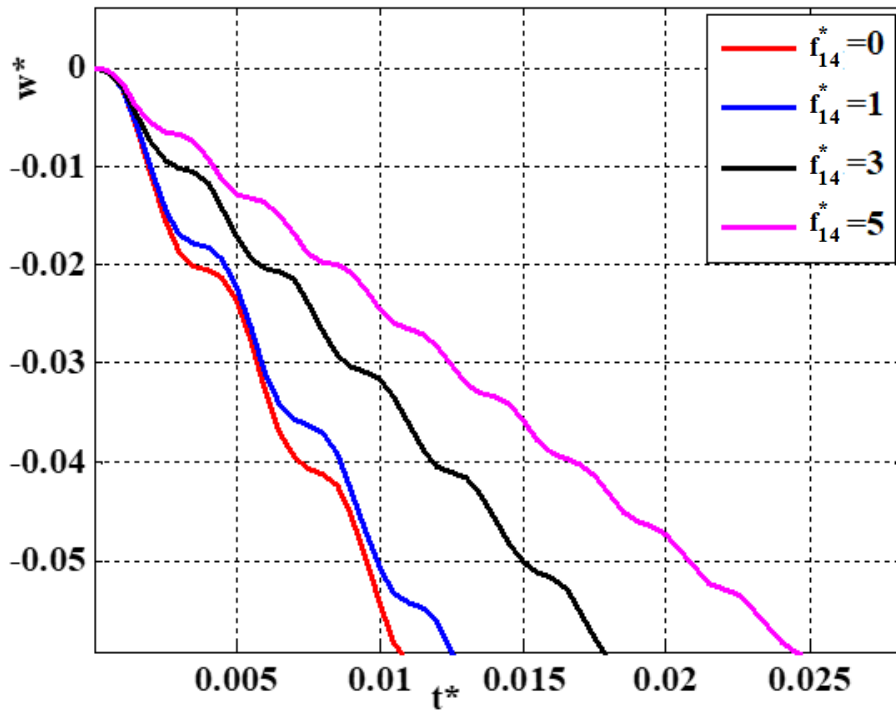
4.4. Khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng đến đáp ứng động của tấm có kích thước nano

4.4.1. Ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện

Xem xét tấm nano tựa đơn bốn cạnh nằm trên nền hai hệ số ($K_w^* = 100$, $K_s^* = 10$). Để thấy rõ ảnh hưởng của thông số f_{14} đến đáp ứng động của tấm, hệ số này được thay đổi sao cho f_{14}^* nhận giá trị từ 0 đến 5 (Khi $f_{14}^* = 0$ tương ứng với trường hợp bỏ qua hiệu ứng uốn điện). Các kết quả về đáp ứng chuyển vị w^* và ứng suất theo thời gian σ_x^* được thể hiện trong Hình 4.3 và Hình 4.4.

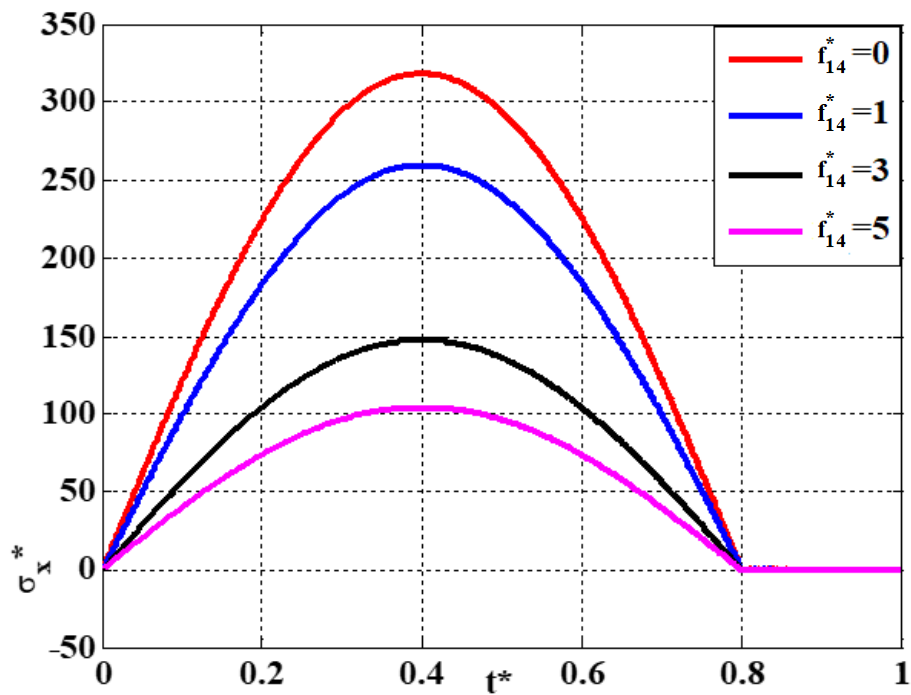


a) Xét trong khoảng thời gian $t^* = 0-1$



b) Xét trong khoảng thời gian $t^* = 0-0.025$

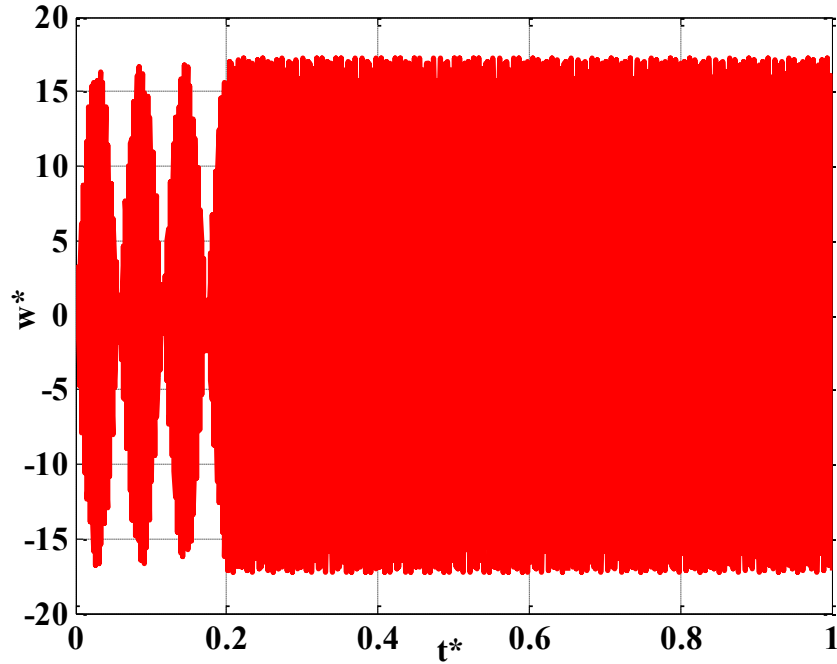
Hình 4.3. Đáp ứng chuyển vị w^* phụ thuộc vào thời gian và hệ số f_{14}^* , $t^* = t/t_1$, $\omega = \pi$



a) σ_x^*

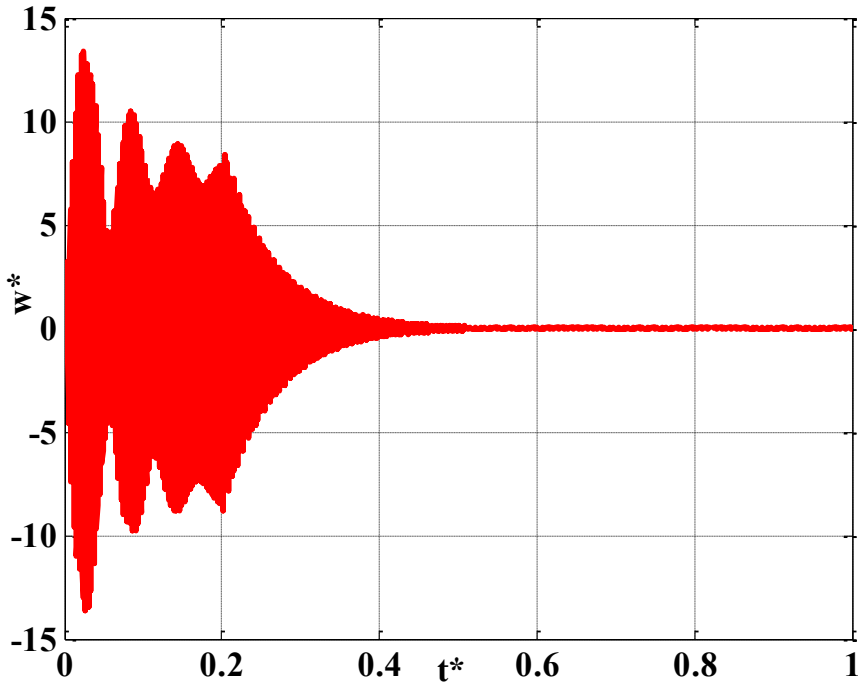
Hình 4.4. Đáp ứng ứng suất σ_x^* và τ_{xz}^* phụ thuộc vào thời gian và hệ số f_{14}^* , $\omega = \pi$

4.4.2. Ảnh hưởng của tần số lực kích động

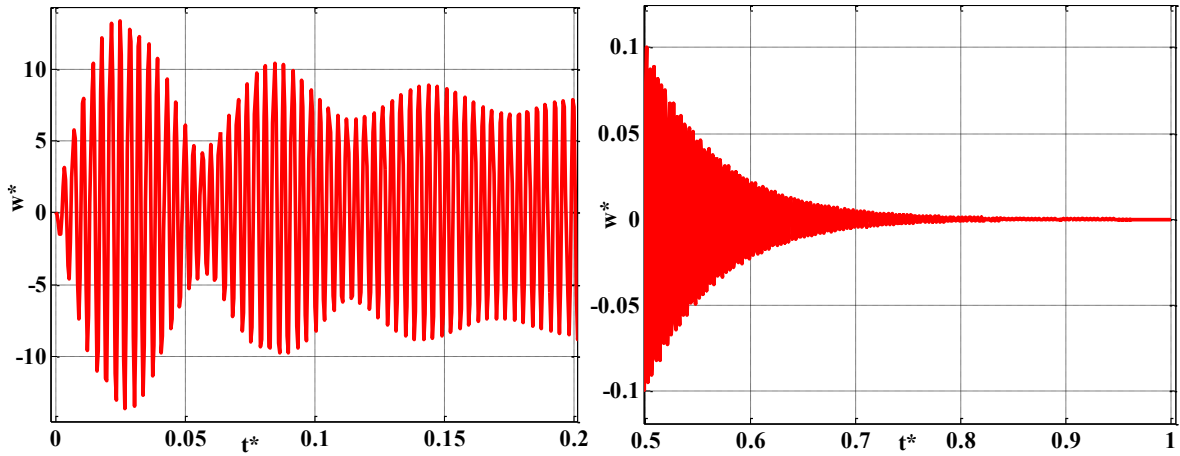


a) Xét trong khoảng thời gian $t^* = 0-1$, $t_1 = 0.2t$

Hình 4.5. Đáp ứng chuyển vị w^* theo thời gian trong trường hợp bỏ qua cản, tần số của ngoại lực bằng tần số dao động riêng đầu tiên của tấm ($\omega = \omega_{t_1}$)



a) Xét trong khoảng thời gian $t^* = 0-1$, $t_1 = 0.2t$



b) Xét khoảng thời gian $t^* = 0-0.2$ c) Xét khoảng thời gian $t^* = 0.5-1$
 Hình 4.6. Đáp ứng chuyển vị w^* theo thời gian trong trường hợp có xét đến cản, tần số của ngoại lực bằng tần số dao động riêng đầu tiên của tấm ($\omega = \omega_{t_1}$)

Kết luận chương 4

Trong chương này trình bày bài toán dao động tự do và dao động cưỡng bức của tấm kích thước nano đặt trên nền đàn hồi có xét đến hiệu ứng uốn điện. Từ thuật toán, chương trình tính và kết quả phân tích, tác giả rút ra một số kết quả chính như sau:

- Xây dựng thuật toán và chương trình tính toán NFFV_2023 và NFD_2023 để phân tích bài toán dao động tự do và dao động cưỡng bức.
- Kết quả khảo sát cho thấy có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến dao động tự do và dao động cưỡng bức của tấm nano đặt trên nền đàn hồi, đặc biệt là ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện.

Từ những kết quả này, khi thiết kế các tấm nano cho các yêu cầu đặc biệt, các kỹ sư cần lưu ý các vấn đề trên để cấu trúc hoạt động đạt hiệu suất cao.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Những đóng góp mới của luận án

- Xây dựng được mô hình, thuật toán phân tử hữu hạn và các chương trình tính toán để giải bài toán uốn tĩnh, dao động riêng và dao động cưỡng bức của tấm kích thước nano đặt trên nền đàn hồi với hiệu ứng uốn điện.

- Khảo sát ảnh hưởng của các thông số như đặc tính vật liệu, kích thước hình học, độ cứng nền đàn hồi, điều kiện biên, v.v. đến đáp ứng uốn tĩnh, dao động riêng và dao động cưỡng bức của tấm kích thước nano đặt trên nền đàn hồi có kể đến hiệu ứng uốn điện.

- Ảnh hưởng của hiệu ứng uốn điện đến đáp ứng uốn tĩnh, dao động riêng và dao động cưỡng bức của tấm có kích thước nano đặt trên nền đàn hồi hai hệ số được nghiên cứu toàn diện.

2. Kiến nghị

Dựa trên kết quả đã đạt được của luận án, một vài hướng nghiên cứu có thể phát triển như sau:

- Phân tích ứng xử cơ học của kết cấu có kích thước nano kể đến hiệu ứng flexoelectric và hiệu ứng kích thước nhỏ.

- Kết hợp phương pháp số và giải tích để nghiên cứu ứng xử cơ học của các kết cấu dầm, tấm và vỏ có kích thước nano kể đến hiệu ứng flexoelectric.

- Sử dụng lý thuyết biến dạng cắt bậc cao để khảo sát dao động của dầm, tấm kích thước nano kể đến hiệu ứng flexoelectric dưới tác dụng của các loại tải trọng cơ học đặt trong môi trường đa vật lý.

- Nghiên cứu ổn định tĩnh và động của tấm kích thước nano có xét đến hiệu ứng flexoelectric trong môi trường đàn nhớt chịu nhiều loại tải trọng khác nhau.

- Tính toán tấm nano có hiệu ứng flexoelectric và biến dạng lớn.

- Nghiên cứu ứng xử cơ học của các kết cấu dạng vỏ có kích thước nano kể đến hiệu ứng flexoelectric trong các môi trường đa vật lý.

- Tính toán tối ưu hình dạng và tối ưu vật liệu cho tấm, vỏ có kích thước nano kể đến hiệu ứng flexoelectric.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Huang, L. Qi, W. Huang, L. Shu, S. Zhou, and X. Jiang, “Flexoelectricity in dielectrics: Materials, structures and characterizations,” *J. Adv. Dielectr.*, vol. 8, no. 2, 2018, doi: 10.1142/S2010135X18300025.
- [2] A. Tripathy, B. Saravanakumar, S. Mohanty, S. K. Nayak, and A. Ramadoss, “Comprehensive Review on Flexoelectric Energy Harvesting Technology: Mechanisms, Device Configurations, and Potential Applications,” *ACS Appl. Electron. Mater.*, vol. 3, no. 7, pp. 2898–2924, 2021, doi: 10.1021/acsaelm.1c00267.
- [3] Y. Su, X. Lin, R. Huang, and Z. Zhou, “Analytical electromechanical modeling of nanoscale flexoelectric energy harvesting,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 11, 2019, doi: 10.3390/app9112273.
- [4] Z. Yan, “Size-dependent bending and vibration behaviors of piezoelectric circular nanoplates,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 3, 2016, doi: 10.1088/0964-1726/25/3/035017.
- [5] S. Khorshidi, S. Chakouvari, H. Askari, and L. Cveticanin, “Free Vibrations of Flexoelectric FGM Conical Nanoshells with Piezoelectric Layers: Modeling and Analysis,” *Energies*, vol. 15, no. 9, 2022, doi: 10.3390/en15092973.
- [6] F. Ebrahimi and M. R. Barati, “Dynamic modeling of embedded nanoplate systems incorporating flexoelectricity and surface effects,” *Microsyst. Technol.*, vol. 25, no. 1, pp. 175–187, 2019, doi: 10.1007/s00542-018-3946-7.
- [7] H. T. Thai and D. H. Choi, “Finite element formulation of various four unknown shear deformation theories for functionally graded plates,” *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 75, pp. 50–61, 2013, doi: 10.1016/j.finel.2013.07.003.
- [8] M. Touratier, “An efficient standard plate theory,” *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 29, no. 8, pp. 901–916, 1991, doi: 10.1016/0020-7225(91)90165-Y.
- [9] W. Yang, X. Liang, and S. Shen, “Electromechanical responses of piezoelectric nanoplates with flexoelectricity,” *Acta Mech.*, vol. 226, no. 9, pp. 3097–3110, 2015, doi: 10.1007/s00707-015-1373-8.
- [10] J. B. Han and K. M. Liew, “Numerical differential quadrature method for Reissner/Mindlin plates on two-parameter foundations,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 39, no. 9, pp. 977–989, 1997, doi: 10.1016/s0020-7403(97)00001-5.

- [11] H. T. Thai, M. Park, and D. H. Choi, “A simple refined theory for bending, buckling, and vibration of thick plates resting on elastic foundation,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 73, pp. 40–52, 2013, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2013.03.017.
- [12] A. H. Baferani, A. R. Saidi, and H. Ehteshami, “Accurate solution for free vibration analysis of functionally graded thick rectangular plates resting on elastic foundation,” *Compos. Struct.*, vol. 93, no. 7, pp. 1842–1853, 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.01.020.
- [13] M. Song, S. Kitipornchai, and J. Yang, “Free and forced vibrations of functionally graded polymer composite plates reinforced with graphene nanoplatelets,” *Compos. Struct.*, vol. 159, pp. 579–588, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.09.070.

CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Lê Minh Thái, Đoàn Trắc Luật, Phùng Văn Bình, **Phùng Văn Minh**, Đỗ Văn Thơm* (2021). “Finite element modeling of mechanical behaviors of piezoelectric nanoplates with flexoelectric effects”, *Archive of Applied Mechanics*, 92, 163-182. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-02048-3> (NXB Springer Nature, SCIE, Q2, IF=2.467).
2. Đoàn Hồng Đức, Đỗ Văn Thơm*, Phạm Hồng Công, **Phùng Văn Minh**, Nguyễn Xuân Nguyên (2022). “Vibration and static buckling behavior of variable thickness flexoelectric nanoplates”, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. <https://doi.org/10.1080/15397734.2022.2088558> (NXB Taylor & Francis, SCIE, Q2, IF=4.364).
3. **Phùng Văn Minh***, Lê Minh Thái, Đoàn Trắc Luật, Nguyễn Đình Anh Vũ (2022). “Static bending analysis of nanoplates on discontinuous elastic foundation with flexoelectric effect”, *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật – Học viện KTQS*, 17(5), 47-57. <https://doi.org/10.56651/lqdtu.jst.v17.n05.529>.
4. Trương Thị Hương Huyền, **Phùng Văn Minh***, Trần Văn Ké, Đỗ Văn Thơm (2022). “Forced vibration analysis nanoplates resting on elastic foundations taking into account flexoelectric effect”, *HN Cơ học toàn quốc lần thứ XI*.
5. **Phùng Văn Minh**, Lê Minh Thái, Nguyễn Thái Dũng, Abdelouahed Tounsi, Nguyễn Thị Cẩm Nhung, Đỗ Văn Thơm* (2023). “An overview of the flexoelectric phenomenon, potential applications, and proposals for further research directions”, *International Journal of Mechanics & Materials in Design*. <https://doi.org/10.1007/s10999-023-09678-1> (NXB Springer Nature, SCIE, Q1, IF=3.5).