ANALYTICAL SOLUTION OF MONOPILE-BASED OFFSHORE WIND TURBINES UNDER DYNAMIC LOADS

Huynh Van Quan*, Tran Huy Thiep
University of Transport and Communications

ARTICLE INFO

Received: 21/7/2022
Revised: 26/8/2022
Published: 26/8/2022

KEYWORDS

Offshore wind turbine
Monopile
Dynamic load
Plane motion
Cyclic analysis

ABSTRACT

Nowadays, renewable and sustainable energy resources such as offshore wind turbine energy are set to become mainstays of future energy supplies in all the world. Because of safety requirements in offshore wind turbine design, any proposed analytical solution is necessary. This paper proposes a novel solution to analyze the dynamic behaviors of offshore wind turbine monopile. In this case, the model is a rigid bar with 2 degrees of freedom, the general equations for plane motion are applied, displacements and rotation are got by simulation workflows in Simulink of Matlab. The numerical results which are obtained from the novel solution in cyclic foundation analysis agreed with other methods, the errors are as much as 3.0% and 5.0% lower for the cases with ADINA and FP-MultiPier programs, respectively. Further research should focus on complex loads such as seismic, wind, wave forces.

ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP PHÂN TÍCH ỨNG XỬ ĐỘNG CỦA MÓNG CỌC ĐƠN TRỤ ĐIỆN GIÓ XA BỜ

Huỳnh Văn Quân*, Trần Huy Thiệp
Trường Đại học Giao thông vận tải

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 21/7/2022
Ngày hoàn thiện: 26/8/2022
Ngày đăng: 26/8/2022

TỪ KHÓA

Trụ điện gió xa bờ
Móng cọc đơn
Tải trọng động
Chuyển động song phẳng
Phân tích theo chu kỳ

TÓM TẮT

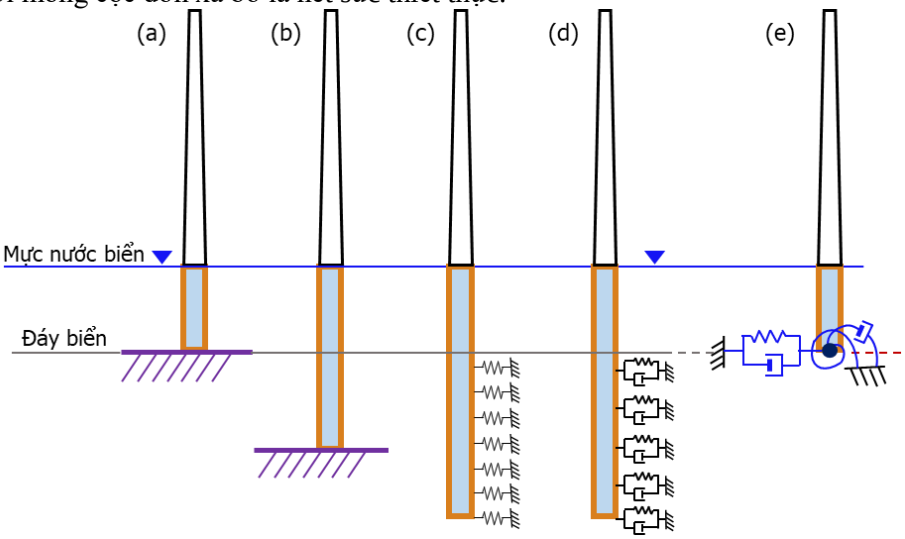
Ngày nay, nguồn năng lượng tái tạo đang được các nước trên thế giới chú tâm khai thác, điện gió là một ví dụ. Các công trình điện gió xa bờ được yêu cầu thiết kế an toàn tuyệt đối, việc hoàn thiện các công cụ phân tích là cần thiết. Bài báo đề xuất một giải pháp tính toán ứng xử động của móng cọc đơn trụ điện gió xa bờ, mô hình móng là phần tử cứng tuyệt đối có hai bậc tự do, phương trình vi phân vật rắn chuyển động song phẳng được sử dụng, mô phỏng bài toán theo thời gian được thực hiện bằng Matlab-Simulink. Kết quả số với tải trọng theo chu kỳ khá gần với các so sánh, lệch không quá 3% nếu tính toán theo phần mềm ADINA và lệch không quá 5% so với phần mềm FP-MultiPier. Giải pháp này là cơ sở để thực hiện các nghiên cứu tiếp theo với các tải trọng phức tạp như tải trọng gió, sóng biển hay động đất hay có sự xuất hiện của kết cấu phần trên.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6280

* Corresponding author. *Email: quanhv_ph@utc.edu.vn*

1. Giới thiệu

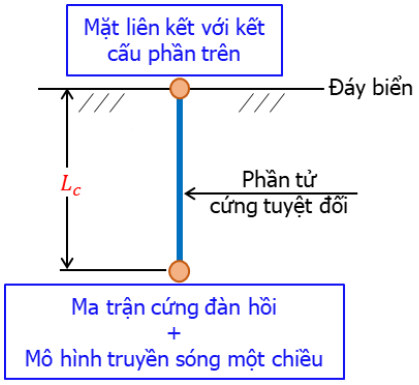
Theo thống kê của tổ chức chuyên nghiên cứu về các dự án điện gió trên thế giới, 4C Offshore có trụ sở tại Luân Đôn-Anh: đến thời điểm hiện tại, tháng 7 năm 2022, Việt Nam có 123 dự án, vị trí trụ điện gió có thể đặt xa bờ như tại Cà Mau, Bạc Liêu và trên đất liền như tại Ninh Thuận, Gia Lai [1]. Với trụ điện gió xa bờ, phương án móng khá phức tạp; tùy thuộc vào chiều sâu mực nước biển mà giải pháp có thể là móng trọng lực, móng cọc đơn, móng giếng chìm, móng ba chân hay móng ống thép liên hợp. Trong đó, móng cọc đơn là giải pháp phổ biến nhất, giúp tiết kiệm về kinh tế và đảm bảo về an toàn khai thác, thống kê năm 2014 đã chỉ ra rằng có đến 91% dự án triển khai đều sử dụng giải pháp móng này [2]. Do đó, những nội dung nghiên cứu về tính toán đối với móng cọc đơn xa bờ là hết sức thiết thực.



Hình 1. *Một số mô hình giản đơn phân tích móng cọc đơn* [3], [4]

Trước đây, trong tính toán móng cọc đơn xa bờ, một số mô hình giản đơn đã được áp dụng có dạng: Hình 1(a) - móng có liên kết ngàm ngay tại vị trí đáy biển, Hình 1(b) - móng có liên kết ngàm sâu dưới đáy biển để phù hợp hơn với ứng xử thực của cọc, Hình 1(c) - móng có liên kết là các lò xo đàn hồi phân bố theo chiều sâu [3], [4]. Bước tiếp cận tiến bộ hơn đó chính là mô hình Winkler, Hình 1(d) - móng được mô hình là một dầm thẳng đứng, đất nền được rời rạc hóa và được thay bằng hệ các sơ đồ tương đương bao gồm một lò xo tuyến tính/ phi tuyến và một vật cản nhớt mắt song song, phân bố từ đáy biển theo chiều sâu đến chân cọc [4]. Mô hình Winkler được sử dụng khá phổ biến cho đến tận ngày nay, một tên gọi khác của mô hình này là phương pháp đường cong $p - y$: khi mô hình làm việc, lò xo sinh ra phản lực ngang cục bộ là p tương ứng với chuyển vị ngang cục bộ của cọc là y, chúng là các hàm biến đổi theo độ sâu tính từ đáy biển [4], [5]. Ngoài ra, một dạng mô hình móng khác được [6], [7] đề xuất như Hình 1(e) - mô hình lò xo kép, móng có liên kết là hai bộ, lò xo và vật cản nhớt, chống dịch chuyển theo phương ngang và chống xoay, đặt ngay tại đáy biển.

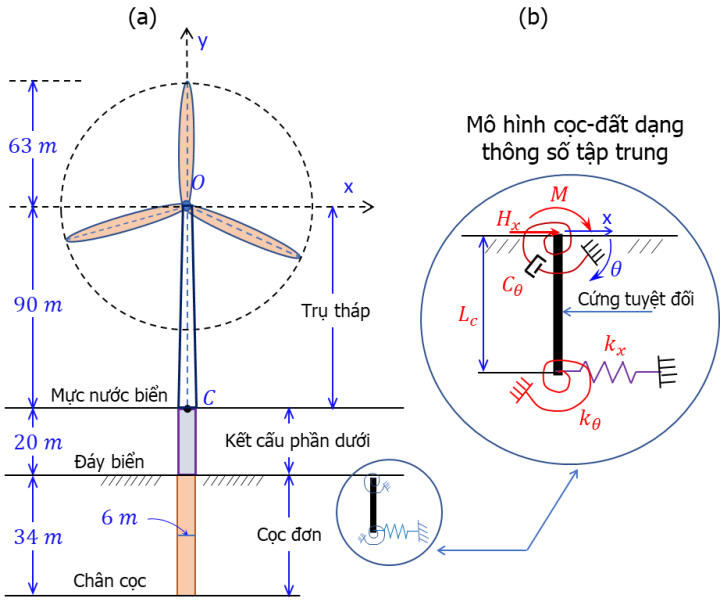
Bên cạnh việc phân tích ứng xử cọc bằng các phần mềm thương mại viết dưới dạng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM); một xu hướng khác được các tác giả quan tâm là móng được mô hình bằng một phần tử vĩ mô (macro-element), phần tử này chỉ đóng vai trò là điều kiện biên (xem Hình 2) trong tương tác đất nền-kết cấu khi phân tích tổng thể công trình điện gió theo FEM [8], [9]. Theo [9], phương pháp này có ưu điểm giúp mở ra các mô hình của móng cọc phức tạp hơn nhưng không làm phát sinh thêm khối lượng tính toán và giúp kết quả phân tích chính xác hơn so với phương pháp đường cong $p - y$.



Hình 2. *Kết cấu của mô hình phần tử vĩ mô* [8], [9]

Bài báo nhận thấy, có thể thực hiện phân tích động cho móng cọc đơn trụ điện gió xa bờ bằng cách kết hợp phần tử vĩ mô của [8] và [9] như sau: với các đặc điểm về độ cứng và chuyển động, đề xuất khảo sát mô hình móng như một vật rắn chuyển động song phẳng; tiến hành thành lập hệ phương trình vi phân chuyển động với tải trọng tác dụng là lực cắt và mô-men động được thu gọn về đỉnh cọc mà chưa xét đến tải trọng sóng biển, gió,...; phản ứng dưới dạng chuyển vị và góc xoay thu được bằng phép tích phân số theo thời gian thông qua công cụ Matlab-Simulink. Kết quả số sẽ được so sánh với các công bố trước đây; đồng thời, giá trị cực đại cũng được kiểm chứng thông qua phương pháp tĩnh tương đương của phần mềm phân tích nền móng chuyên dụng FP-MultiPier.

2. Đề xuất giải pháp phân tích ứng xử động cho móng cọc đơn

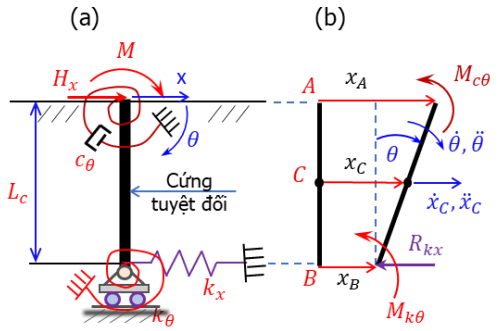


Hình 3. *Trụ điện gió xa bờ cùng với mô hình móng cọc của Carswell* [8]

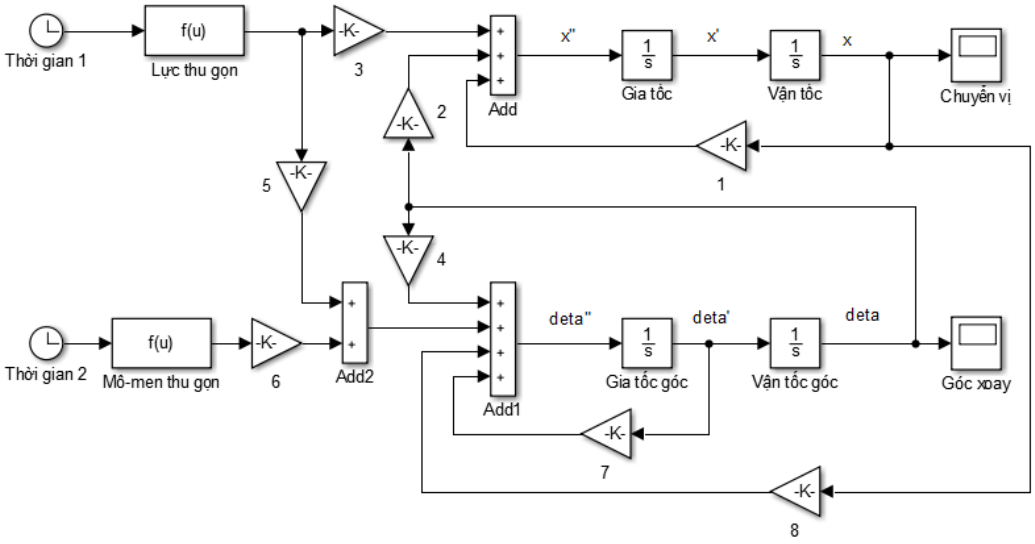
Theo [8], [9], phần tử vĩ mô móng cọc đơn công trình điện gió xa bờ, Hình 3(a), với các thông số tập trung có dạng như Hình 3(b). Trong mô hình này, móng được mô hình bằng một đoạn cọc có mặt cắt ngang của cọc thực, chiều dài L_C, bắt đầu tại đáy biển và kéo dài sâu vào trong đất; có độ cứng tuyệt đối; liên kết tại đầu cọc, đáy biển, là một thiết bị cản xoay có hệ số cản C_θ; liên kết tại chân mô hình, sâu bên dưới đáy biển, gồm lò xo thẳng có độ cứng k_x và lò xo xoắn có độ

cứng k_θ. Các tham số này có thể được xác định bằng kết quả phân tích theo phương pháp phần tử hữu hạn [8] hoặc có thể suy ra bằng các công thức tính toán theo [10], [11].

Để phù hợp với tải trọng khảo sát, bài báo chưa xét đến bậc tự do theo phương đứng, Hình 4(a) được bổ sung gối di động theo phương ngang tại B, hệ có 2 bậc tự do: chuyển vị ngang x và chuyển vị góc xoay θ. Gọi x_A, x_C và x_B tương ứng là chuyển vị ngang tại đỉnh A, khối tâm C và chân mô hình B, Hình 4(b). Vì mô hình đề xuất (ACB) là vật rắn có độ cứng tuyệt đối, chuyển vị theo phương ngang và xoay trong mặt phẳng thẳng đứng (x, y), đặc điểm này theo Cơ học kỹ thuật gọi là chuyển động song phẳng. Do đó, bài báo đề xuất sử dụng phương trình vi phân vật rắn chuyển động song phẳng để khảo sát ACB trong Hình 4.



Hình 4. *Mô hình khảo sát có dạng chuyển động song phẳng*



Hình 5. *Sơ đồ tích phân số phương trình chuyển động với Matlab-Simulink*

Lực tác dụng lên ACB gồm: lực chủ động thu gọn tại đầu cọc, lực cắt H_x và mô-men uốn M; mô-men chống xoay của lò xo xoắn, $M_{k\theta} = k_\theta\theta$; mô-men cản của vật cản nhớt, $M_{c\theta} = C_\theta\dot{\theta}$; lực đàn hồi của lò xo thẳng, $R_{kx} = k_x x_B = k_x\left(x_c - \frac{L_C}{2}\theta\right)$. Với $\dot{\theta}$ và $\ddot{\theta}$ tương ứng là vận tốc góc và gia tốc góc; $\ddot{x}_C$ là gia tốc theo phương ngang của khối tâm C; M_C và J_C tương ứng là khối lượng và mô-men quán tính khối lượng của ACB. Mô hình đề xuất chưa xét đến bậc tự do theo phương đứng nên hai phương trình vi phân chuyển động song phẳng của ACB là:

$$\begin{cases} M_C\ddot{x}_C = H_x - R_{kx} \\ J_C\ddot{\theta} = M + H_x\frac{L_C}{2} + R_{kx}\frac{L_C}{2} - M_{k\theta} - M_{c\theta} \end{cases} \quad (1)$$

Hệ phương trình (1) được viết dưới dạng phân ly biến số, vi phân cấp 2, công thức (2); và dạng véc-tơ, công thức (3).

$$\begin{cases} \ddot{x}_C = -\frac{k_x}{M_C}x_c + \frac{k_x L_C}{2M_C}\theta + \frac{H_x}{M_C} \\ \ddot{\theta} = -\frac{C_\theta}{J_C}\dot{\theta} + \frac{k_x L_C}{2J_C}x_c - \frac{k_x (L_C)^2 + 4k_\theta}{4J_C}\theta + \frac{2M + H_x L_C}{2J_C} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} \ddot{x}_C \\ \ddot{\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{C_\theta}{J_C} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_C \\ \dot{\theta} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{k_x}{M_C} & \frac{k_x L_C}{2M_C} \\ \frac{k_x L_C}{2J_C} & -\frac{k_x (L_C)^2 + 4k_\theta}{4J_C} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_C \\ \theta \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{H_x}{M_C} \\ \frac{2M + H_x L_C}{2J_C} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Phương trình (3) được mô phỏng theo thời gian với phần mềm Matlab-Simulink, sơ đồ như Hình 5, tích phân số được thực hiện bằng phương pháp Euler.

3. Kết quả số và bàn luận

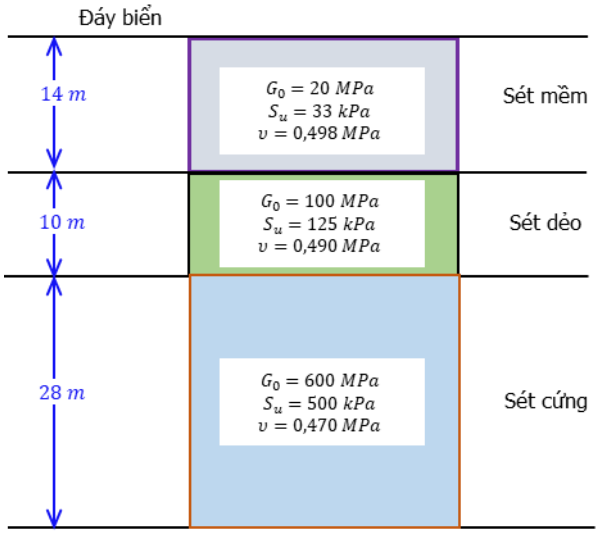
Để có cơ sở so sánh kết quả từ giải pháp được đề xuất với các tác giả khác đã nghiên cứu, bài báo sử dụng lại mô hình phân tích trụ điện gió xa bờ của [8], Hình 3(a), móng cọc đơn có dạng ống trụ tròn, dài 34 m tính từ đáy biển, mặt cắt ngang có đường kính ngoài 6 m, bề dày 0,09 m. Địa chất đất nền đặt cọc được mô tả như Hình 6, các lớp đất đều có khối lượng riêng là 2000 kg/m^3. Tải trọng kích thích gây ra dao động tự do được thực hiện bằng cách: cho một chuyển vị theo phương ngang có giá trị 0,1 m tại đỉnh tháp. Trên cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn, phân tích qua phần mềm ADINA, kết quả phân tích: các thông số tương đương của hệ đất-móng được xác định như Bảng 1, kết quả này được [12] kiểm tra và tin cậy sử dụng; tần số dao động tự do của đỉnh cọc, $f = 1/T = 0{,}307$ Hz, tương ứng với tần số vòng, $\omega = 2\pi f = 0{,}614\pi$ rad/s; ngoài ra, [8] cũng đã thực hiện phân tích kiểm chứng với phần mềm INFIDEL; kết quả dưới dạng lực thu gọn tại đỉnh cọc và chuyển vị được tổng hợp trong các cột (2) và (4) của Bảng 2.

Bảng 1. *Các thông số tương đương của mô hình cọc đơn* [8]

Đại lượng	L_C (m)	k_x (N/m)	k_θ (Nm/rad)	C_θ (Nms/rad)
Giá trị	7,60	$3{,}89 \times 10^9$	$1{,}14 \times 10^{11}$	$9{,}34 \times 10^8$

Bảng 2. *Kết quả phân tích của Carswell* [8]

Công cụ phân tích	Lực cắt H_x (kN)	Mô-men M (MNm)	Chuyển vị x_A (m)	Góc xoay θ (rad)
INFIDEL	158	16	$1{,}19 \times 10^{-3}$	$1{,}52 \times 10^{-4}$
ADINA	156	15,9	$1{,}28 \times 10^{-3}$	$1{,}62 \times 10^{-4}$

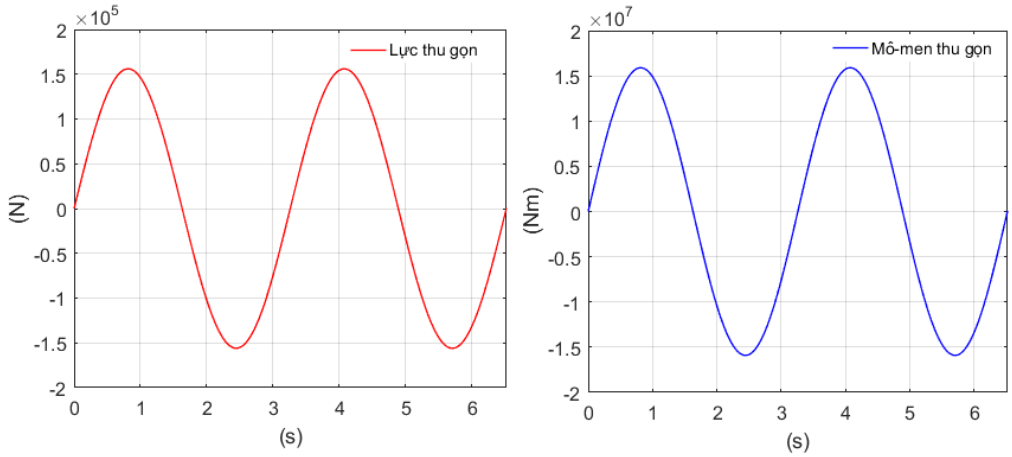


Hình 6. *Phân bố lớp đất địa chất tại vị trí đặt móng* [8]

Tiến hành mô phỏng giá trị lực cắt và mô-men, kết quả phân tích từ ADINA, Bảng 2, dưới dạng chu kỳ với thời gian t: $H_x = 156 \sin 0{,}614\pi t$ kN, $M = 15{,}9 \sin 0{,}614\pi t$ MNm, biểu diễn như Hình 7. Với chiều dài L_C đã được xác định trong Bảng 1, cùng với các thông số đặc trưng của cọc, khối lượng và mô-men quán tính của mô hình được xác định như sau:

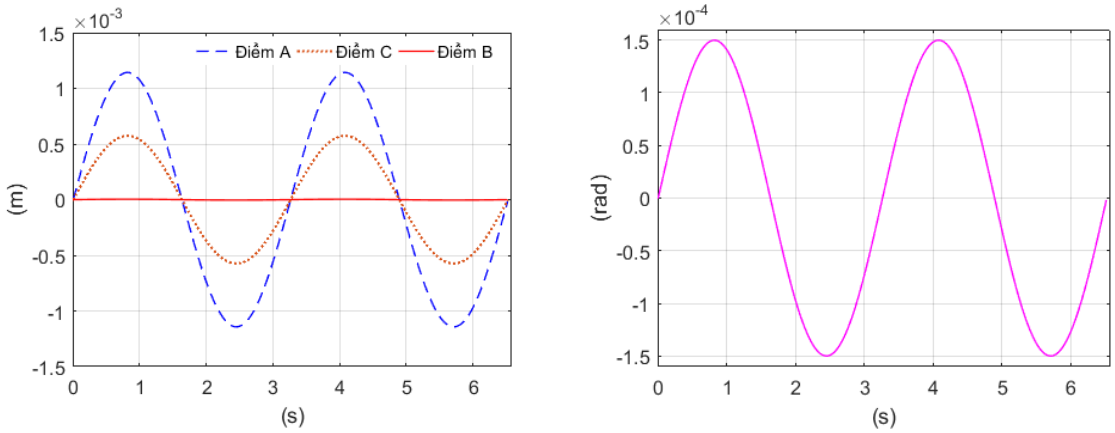
$$M_C = L_C \frac{\pi}{4}(D_n^2 - D_t^2)\gamma = 7{,}6 \times \frac{\pi}{4}(6^2 - 5{,}91^2) \times 8500 = 54357{,}12 \text{ kg}$$

$$J_C = M_C \frac{L_C^2}{12} = 54357{,}12 \times \frac{7{,}6^2}{12} = 261638{,}94\ kgm^2$$



Hình 7. *Biểu đồ lực và mô-men thu gọn tại đỉnh cọc theo thời gian*

Thay các hàm lực, mô-men theo thời gian và các thông số tương đương của mô hình vào phương trình (3); theo [13], để đảm bảo tính chính xác của tích phân số, yêu cầu bước thời gian tối thiểu $\Delta t = 0{,}1T = \frac{0{,}1}{f} = \frac{0{,}1}{0{,}307} = 0{,}3257$ s, nghiên cứu này thực hiện tích phân số theo sơ đồ mô phỏng như Hình 5 với $\Delta t = 0{,}0001$ s bé hơn rất nhiều so với $0{,}1T = 0{,}3257$ s. Để quan sát các biểu đồ được thuận lợi, kết quả sẽ được thể hiện trong 2 chu kỳ, tương ứng $2T = 2 \times \frac{1}{0{,}307} = 6{,}52$ s.



(a) (b)

Hình 8. *Các phản ứng của mô hình cọc theo thời gian: (a) chuyển vị ngang và (b) chuyển vị góc xoay*

Biểu đồ chuyển vị ngang của cọc (các điểm A, B và C) cùng với chuyển vị góc xoay được thể hiện trong Hình 8, giá trị cực đại được tổng hợp ở hàng (1) của Bảng 3. Vì mô hình móng cọc có độ cứng tuyệt đối, nên chuyển vị ngang tại các điểm đặc trưng và góc xoay quan hệ theo công thức: $x_C = x_B + \frac{L_C}{2}\theta = x_A - \frac{L_C}{2}\theta$. Trên Hình 8, các biểu đồ chuyển vị đều có dạng tuần hoàn theo thời

gian, kết quả này phù hợp với tải trọng kích thích đầu vào. Trong Hình 8 (a), chuyển vị tại điểm B rất bé so với chuyển vị tại A và C, kết quả này phù hợp với giả thiết: liên kết tại B không phải liên kết gối mà bao gồm các lò xo đàn hồi chống chuyển vị theo phương ngang và góc xoay.

Bên cạnh đó, để có cơ sở kiểm chứng, bài báo thực hiện phân tích tĩnh tương đương với phần mềm chuyên dụng về nền móng công trình, FP-MultiPier; kết quả được trình bày ở hàng (2) của Bảng 3. Tỷ lệ độ lệch giữa các công cụ phân tích khác nhau so với phương pháp đề xuất tính theo công thức, $\frac{V_{hàng\ i}-V_{hàng\ 1}}{V_{hàng\ 1}}$%, kết quả ở cột (3) và (5) của Bảng 3.

Bảng 3. *So sánh giá trị cực đại của các công cụ phân tích so với công cụ đề xuất*

TT	Công cụ phân tích	Chuyển vị x_A		Góc xoay θ	
		Giá trị (m)	Tỷ lệ (%)	Giá trị (rad)	Tỷ lệ (%)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	Bài báo đề xuất	$1{,}15 \times 10^{-3}$	-	$1{,}51 \times 10^{-4}$	-
2	FP-MultiPier	$1{,}20 \times 10^{-3}$	4,17	$1{,}56 \times 10^{-4}$	3,21
3	ADINA [8]	$1{,}19 \times 10^{-3}$	2,36	$1{,}52 \times 10^{-4}$	0,66
4	INFIDEL [8]	$1{,}28 \times 10^{-3}$	11,30	$1{,}62 \times 10^{-4}$	6,79

Kết quả phân tích ở Bảng 3 cho thấy, chuyển vị ngang tại đỉnh cọc và góc xoay được phân tích từ giải pháp đề xuất khá gần với kết quả từ phần mềm ADINA của Carswell [8], tương ứng là 2,36% và 0,66%; kết quả phân tích so với phần mềm FP-MultiPier có độ lệch bé hơn 5%. Trong khi đó, nếu so sánh chính kết quả do [8] thực hiện, chuyển vị ngang và góc xoay của INFIDEL lệch so với ADINA có tỷ lệ tương ứng là 7,56% và 6,58%.

4. Kết luận

Bài báo đã đề xuất một giải pháp phân tích ứng xử động cho móng cọc đơn trụ điện gió xa bờ. Trong đó, mô hình móng của các nghiên cứu đã thực hiện trước đó được bài báo này phát triển ra một hướng nghiên cứu mới, bằng cách áp dụng hệ phương trình vi phân chuyển động song phẳng của vật rắn. Với việc khai báo tải trọng tác dụng và các thông số tương đương của hệ đất nền-móng, thông qua công cụ Matlab-Simulink, cho phép xác định được ngay các ứng xử của mô hình móng. Thông qua ví dụ tính toán cụ thể, tải trọng tuần hoàn theo thời gian, độ lệch các chuyển vị thu được so với nghiên cứu đã thực hiện và do bài báo kiểm chứng đều không quá 5%. Nội dung bài báo chỉ mới dừng lại đối với mô hình có chuyển vị theo phương ngang và góc xoay, cần tiếp tục nghiên cứu với trường hợp có xuất hiện tải trọng theo phương đứng cũng như các loại tải trọng phức tạp hơn và có sự xuất hiện của kết cấu phần trên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] 4coffshore company, “Global offshore winfarm database.” [Online]. Available: https://www.4coffshore.com/windfarms/. [Accessed Jul. 18, 2022].

[2] K. Y. Oh, W. Nam, M. S. Ryu, J.-Y. Kim, and B. I. Epureanu, "A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 88, pp. 16-36, 2018.

[3] E. Bush and L. Manuel, “Foundation models for offshore wind turbines,” in *47th AIAA aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition*, Florida, 2009, pp. 1-7.

[4] Y. Yang, M. Bashir, C. Li, and J. Wang, "Analysis of seismic behaviour of an offshore wind turbine with a flexible foundation," *Ocean Engineering*, vol. 178, pp. 215-228, 2019.

[5] S. Aasen, A. M. Page, K. S. Skau, and T. A. Nygaard, "Effect of foundation modelling on the fatigue lifetime of a monopile-based offshore wind turbine," *Wind Energ. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 361–376, 2017.

[6] S. Jung, S. R. Kim, and A. Patil, "Effect of monopile foundation modeling on the structural response of a 5-MW offshore wind turbine tower," *Ocean Engineering*, vol. 109, pp. 479-488, 2015.

[7] C. Sun and V. J. M. S. Jahangiri, "Bi-directional vibration control of offshore wind turbines using a 3D pendulum tuned mass damper," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 105, pp. 338-360, 2015.

[8] W. Carswell, J. Johansson, F. Løvholt, S. R. Arwade, C. Madshus, D. J. DeGroot, and A. T. Myers, "Foundation damping and the dynamics of offshore wind turbine monopiles," *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 724-736, 2015.

[9] A. M. Page, K. S. Skau, H. P. Jostad, and G. R. Eiksund, "A new foundation model for integrated analyses of monopile-based offshore wind turbines," *Energy Procedia*, vol. 137, pp. 100-107, 2017.

[10] G. Gazetas, "Foundation Vibrations," in *Foundation Engineering Handbook*, 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991, pp. 553-593.

[11] G. Mylonakis and D. Roumbas, "Lateral Impedance of Single Piles in Inhomogeneous Soil," in *Proc. 4th Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, 2001, pp. 1-6.

[12] W. Song, C. Sun, Y. Zuo, V. Jahangiri, Y. Lu, and Q. Han, "Conceptual study of a real-time hybrid simulation framework for monopile offshore wind turbines under wind and wave loads," *Frontiers in Built Environment*, vol. 6, pp. 1-20, 2020.

[13] A. K. Chopra, *Dynamics of Sructures*, 1st ed. New Jersy: Prentice Hall, 1995.