

STUDY ON THE CALCULATION OF MOORING LINE WITH CLUMP WEIGHTS FOR A FLOATING STRUCTURE USING NONLINEAR ANALYSIS IN SAP2000

Pham Quoc Hoan*, Doan Dac Thanh

Vietnam Maritime University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 20/4/2025 Revised: 15/7/2025 Published: 15/7/2025	This article proposes a new model for calculating a single mooring line with clump weights using the finite element method implemented in Sap2000 software. By analyzing the behavior of the mooring line, the authors introduce a model that utilizes the Cable element - designed to resist only axial forces - in combination with the Nonlinear solver and the P-Delta Plus option. This configuration allows for accurate modeling of large displacements and deformations by continuously updating the stiffness matrix during the analysis. The proposed model effectively simulates the behavior of flexible mooring lines under significant loading conditions, accounting for large displacements and nonlinear geometric effects. It enables the determination of key response parameters such as mooring line deformation, inclination angle, axial tension, lateral displacement of the floating body, and forces acting on the anchor pulley. To verify the model's accuracy, its results were compared against those from an analytical solution presented in a previously published study. The discrepancy between the two sets of results was found to be minimal, confirming the model's reliability. With the advantage of being implemented in Sap2000 - a widely used structural analysis software in Vietnam - the model is intuitive, easy to construct, and yields reliable results. It shows strong potential for widespread application, not only in the analysis of single mooring lines with clump weights but also in similar problems involving flexible cable systems.
KEYWORDS Mooring line Floating structure Finite element method Sap2000 Nonlinear analysis	

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN DÂY NEO VẬT NỔI CÓ VẬT TREO TRÊN PHẦN MỀM SAP2000 NONLINEAR

Phạm Quốc Hoàn*, Đoàn Đức Thành

Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận bài: 20/4/2025 Ngày hoàn thiện: 15/7/2025 Ngày đăng: 15/7/2025	Nội dung bài báo đề xuất mô hình mới phục vụ tính toán dây neo đơn trong trường hợp có vật treo bằng phương pháp phần tử hữu hạn sử dụng phần mềm Sap2000. Thông qua việc phân tích ứng xử của dây neo, nhóm tác giả đã đề xuất mô hình sử dụng phần tử Cable – loại phần tử chỉ chịu tải trọng dọc trục và bộ giải Nonlinear và tùy chọn P-delta Plus. Sự kết hợp này cho phép mô tả chính xác biến dạng lớn và liên tục cập nhật ma trận độ cứng trong quá trình tính toán theo biến dạng. Mô hình đề xuất có khả năng mô phỏng được ứng xử của dây neo mềm trong điều kiện vật nổi chịu tải trọng lớn bao gồm các thông số quan trọng như trạng thái biến dạng, góc nghiêng dây neo, lực kéo, chuyển vị ngang của vật nổi và phản lực tác động lên rùa neo. Để kiểm chứng độ chính xác, mô hình được đối chiếu với kết quả giải tích từ một nghiên cứu đã công bố trước đây. Sai số giữa kết quả của mô hình và phương pháp giải tích là rất nhỏ, chứng tỏ mô hình là đáng tin cậy. Mô hình xây dựng trên phần mềm Sap2000 phổ biến tại Việt Nam, trực quan, cho kết quả đáng tin cậy, hứa hẹn có thể được ứng dụng rộng rãi trong tính toán dây neo đơn có vật treo và các dạng dây cable mềm tương tự.
TỪ KHÓA Dây neo Công trình nổi Phương pháp phần tử hữu hạn Sap2000 Phân tích phi tuyến	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12634>

* Corresponding author. Email: hoanpq.ctt@vimaru.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong thời gian gần đây, cùng với định hướng phát triển kinh tế hướng ra biển, công trình nổi ngày càng được ứng dụng nhiều trong các lĩnh vực như giao thông đường thủy, giao thông hàng hải, công nghiệp đóng tàu, quốc phòng, khai thác dầu khí, v.v. Trong quá trình làm việc, do vị trí thường ở những khu vực như trong sông, luồng tàu, cửa biển, bến cảng, ngoài khơi... nên các công trình nổi, đặc biệt là các công trình nổi cố định chịu tác động rất phức tạp từ môi trường bên ngoài. Các tác động tiêu biểu có thể kể đến bao gồm các tải trọng sinh ra do sóng, gió, dòng chảy và các tải trọng sinh ra do tàu neo buộc, v.v. Với các đặc điểm trên, hệ thống dây neo có một vai trò rất quan trọng vì nó có vai trò chủ yếu trong việc giữ ổn định cho vật nổi nói riêng và toàn bộ hệ thống nói chung. Tuy vậy, việc tính toán hệ thống dây neo vẫn chưa được quan tâm đúng mức, đòi hỏi có thêm những nghiên cứu giúp cho việc tính toán thêm thuận tiện, dễ dàng.

Việc tính toán cho dây neo của vật nổi đã và đang được đề cập đến ở trong nhiều công bố khoa học, cả ở trong nước và quốc tế. Tác giả Bertaux đã đề xuất và tổng hợp cơ sở lý thuyết tính toán dây neo trong tài liệu [1] vào năm 1976. Tác giả này đã trình bày cụ thể các phương trình cơ bản để mô tả quỹ đạo dây neo theo dạng phương trình Catenary và các đại lượng quan trọng khác như lực kéo dây neo, chuyển vị phao, lực nâng của neo tại đáy, v.v. Trên thế giới, hiện nay, phương pháp phần tử hữu hạn được sử dụng rất rộng rãi để tính toán hệ thống dây neo các công trình nổi. Trong phương pháp này, người tính toán có thể sử dụng các bộ mã nguồn mở hay các phần mềm thương mại như OpenFast, NREL Fast, Charm 3D, Ansys AQWA, Orcaflex, v.v. [2] - [7]. Các công trình được tính toán ở đây bao gồm kho xăng dầu nổi (FPSO) tua bin gió dạng nổi (WFTs), ụ neo... Các công cụ trên cho phép tính toán cho rất nhiều trường hợp bao gồm các loại tải trọng động, tĩnh, dây neo Catenary, dây neo đơn, dây neo chùm có và không có vật neo. Bên cạnh đó, cũng có một số công trình đã nghiên cứu tính toán tối ưu khối lượng dây neo, độ dạt ngang của vật nổi [8] - [10]. Tuy nhiên, các phần mềm thương mại thường có giá rất cao, còn các code mở hay các chương trình tính toán tối ưu khá phức tạp và khó áp dụng cho điều kiện Việt Nam hiện nay.

Trong nước, đa số các tính toán vẫn sử dụng phương pháp giải tích, thử dần. Để đơn giản hóa quá trình tính toán, các giả thiết được rất nhiều nghiên cứu sử dụng là dây neo không đàn hồi và dây neo có góc nghiêng ở đáy bằng 0, hay nói cách khác đang làm việc ở trạng thái giới hạn, chiều dài thực của dây neo sau đó được cộng thêm một khoảng dự trữ tùy vào cấp và loại công trình [11]. Do đó, kết quả thu được thường thiên về an toàn, sự làm việc của dây neo không được phản ánh một cách chính xác nhất. Bên cạnh đó, trong trường hợp để tăng ổn định công trình, giảm độ dạt ngang dây neo có treo thêm vật nặng, các phương trình mô tả quỹ đạo dây neo trở nên quá phức tạp cho nên việc tính toán gần như là bất khả thi [12]. Trong các công bố của mình [12], [13], tác giả Đào Văn Tuấn đề xuất sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để tính toán dây neo. Các mô hình số được tác giả viết trên phần mềm Mathcad đã giải quyết được hầu hết các bài tính toán liên quan đến dây neo trong trường hợp có và không có vật treo. Tuy nhiên, giống như việc sử dụng các code mở đã trình bày ở trên, việc tự lập trình bằng Mathcad đòi hỏi cần có kiến thức rất sâu không chỉ về dây neo mà còn về toán học, về lập trình và đặc biệt là về phương pháp phần tử hữu hạn. Vì vậy, đối với đa số người tính toán phổ thông như kỹ sư, sinh viên trong các trường đại học thì hướng tiếp cận trên là rất phức tạp.

Thực tế trên đòi hỏi cần có một phương pháp tính toán dây neo đơn trong trường hợp có vật treo phù hợp với điều kiện Việt Nam vừa đảm bảo chính xác, vừa trực quan, dễ thực hiện. Chính vì vậy, trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất xây dựng mô hình tính toán dây neo có vật treo sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn. Mô hình được xây dựng trên phần mềm Sap2000 – một phần mềm quen thuộc ở Việt Nam. Kết quả tính toán sẽ được kiểm chuẩn với kết quả đã được công bố trước đó để chứng minh tính đúng đắn của mô hình.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Các phương trình cơ bản trong tính toán dây neo đơn vật nổi

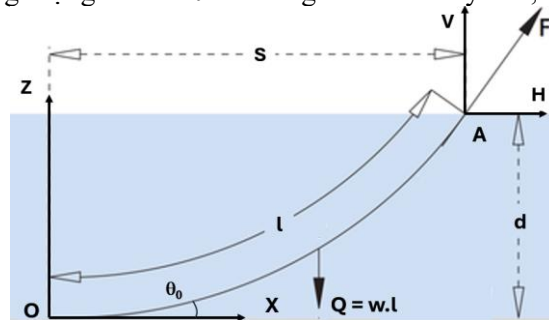
Hình 1 thể hiện sơ đồ bài toán phẳng tính dây neo đơn của vật nổi, tổng hợp tác động của các yếu tố bên ngoài được thể hiện bằng tải trọng F bao gồm thành phần nằm ngang H và thẳng đứng V . Các phương trình (1), (2), (3) là các phương trình cơ bản thể hiện quỹ đạo dây neo đơn:

$$z(x) = a \cdot \cosh \left[\frac{x}{a} + \operatorname{arcsinh}(\tan(\theta_0)) \right] - a \cdot \cosh[\operatorname{arcsinh}(\tan(\theta_0))] \quad (1)$$

$$x(l) = a \cdot \operatorname{arcsinh} \left[\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right] - a \cdot \operatorname{arcsinh}[\tan(\theta_0)] \quad (2)$$

$$a = \frac{H}{w} \quad (3)$$

Trong đó: x, z : tọa độ theo phương ngang và phương đứng; θ_0 : là góc nghiêng của dây neo ở đáy; l, w : chiều dài và trọng lượng trên 1 m dài trong nước của dây neo;



Hình 1. Sơ đồ tính toán dây neo đơn

Độ dạt ngang của vật nổi S , chiều dài dây, độ sâu nước d , lực căng dây T được biểu diễn như sau:

$$h = a \cdot \left[1 + \left(\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{a}{\cos(\theta_0)} \quad (4)$$

$$S = a \cdot \operatorname{arcsinh} \left[\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right] - a \cdot \operatorname{arcsinh}[\tan(\theta_0)] \quad (5)$$

$$T(l) = H \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{l}{a} + \tan(\theta_0) \right)^2} \quad (6)$$

2.2. Tính toán dây neo vật nổi bằng phương pháp phần tử hữu hạn

2.2.1. Cơ sở lý thuyết

Có thể thấy rằng các phương trình cơ bản trên rất khó giải được bằng phương pháp thông thường, đặc biệt là trong các trường hợp có vật treo. Do đó, bài báo này sẽ đề xuất mô hình tính toán sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trên phần mềm Sap2000. Do dây neo vật nổi thường là dây xích hoặc dây cable nên khi làm việc dây neo có thể coi là chỉ chịu lực dọc trục. Mặt khác, do độ dạt ngang của vật nổi rất lớn nên bài toán được coi là biến dạng lớn. Vì vậy, khi tính toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn cần giả thiết như sau:

- Coi dây neo làm việc như phần tử giàn phẳng;
- Dây neo được xem là đàn hồi, hệ mềm, có chuyển vị lớn nên ngoài ma trận đàn hồi cần kể thêm ma trận độ cứng hình học. Ma trận độ cứng tổng thể $[K]_e$ như sau [12]:

$$[K]_e = [K_T]_e + [K_g]_e \quad (7)$$

$[K_T]_e$ là ma trận độ cứng đàn hồi của phần tử dàn phẳng, được biểu diễn như sau:

$$[K_T]_e = \frac{EA}{l_e} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Trong đó: E, A, l_e lần lượt là mô đun đàn hồi vật liệu làm dây neo, diện tích mặt cắt ngang dây neo và chiều dài phần tử.

Ma trận độ cứng hình học $[K_g]_e$ như sau:

$$[K_g]_e = \frac{T}{l_e} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Ở đây, T là lực dọc trong dây neo. Cần lưu ý rằng, T luôn thay đổi và phụ thuộc vào chuyển vị, trong quá trình tính toán cần được giả định trước giá trị lực căng và giá trị chính xác phải được xác định bằng phương pháp lặp.

2.2.2. Phân tích, lựa chọn mô hình tính toán dây neo đơn sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn trên phần mềm Sap2000

Từ cơ sở lý thuyết được nêu ở trên, mô hình dây neo được xây dựng trên Sap2000 như sau:

- Do dây neo chỉ chịu lực dọc trục nên sẽ được mô hình hóa bằng các phần tử Cable – loại phần tử chỉ chịu tải trọng dọc trục, không chịu uốn;
- Ở trạng thái ban đầu, dây neo được xem là thẳng;
- Vị trí đặt vật treo sẽ chia thành node. Tại các node đó, trọng lượng của vật treo được gán là tải trọng tập trung thẳng đứng;
- Vị trí gắn dây neo ở đáy biển (rùa neo) được coi là gối cố định;
- Vị trí gắn dây neo vào vật nổi được coi là gối di động;
- Tải trọng ngang tác động lên vật nổi được coi là tải trọng tập trung gán vào vị trí gối đó. Nội dung bài báo này chỉ xét tới trường hợp tính toán tĩnh cho dây neo.
- Do bài toán dây neo mềm, biến dạng và chuyển vị lớn nên sử dụng bộ giải Nonlinear của Sap2000 với option P-delta plus, đây là tùy chọn cho phép cập nhật ma trận biến dạng như phân tích ở phần trên.

2.2.3. Kiểm chuẩn mô hình

Do hiện nay chưa có lời giải chính xác từ phương pháp giải tích cho bài toán dây neo đơn có vật treo nên trong phần này, mô hình xây dựng trên phần mềm Sap2000 sẽ được kiểm chuẩn bằng cách so sánh với kết quả trong tài liệu [12] cho trường hợp dây neo đơn không có vật treo. Sau khi được kiểm chuẩn, mô hình này sẽ được vận dụng cho trường hợp có vật treo.

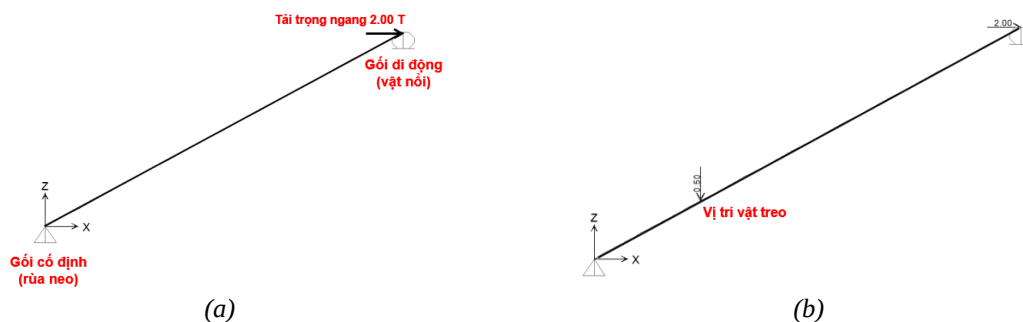
Thông số đầu vào của mô hình dây neo đơn không vật treo được tham khảo từ nghiên cứu [12]. Các số liệu đầu vào cụ thể như sau:

- Độ sâu nước: $d = 9,5 \text{ m}$;
- Chiều dài dây neo: $l = 20 \text{ m}$;
- Dây neo bằng thép $E = 2,1e7 \text{ T/m}^2$, đường kính dây neo: $0,1 \text{ m}$;
- Tổng lực ngang tác động lên vật nổi: $H = 2,0 \text{ T}$;

Trong trường hợp có vật treo:

- Số lượng vật treo: 1, đặt cách rùa neo khoảng cách là 5 m ;
- Trọng lượng 1 vật treo trong nước: $0,5 \text{ T}$.

Mô hình tính toán trong Sap2000 được thể hiện ở Hình 2.



Hình 2. Mô hình tính toán dây neo đơn trong Sap2000: (a) không có vật treo, (b) có 1 vật treo

Bảng 1 thể hiện kết quả thu được từ mô hình xây dựng trên Sap2000 và so sánh kết quả đó với kết quả thu được từ tài liệu [12]. Có thể nhận thấy sai số giữa hai phương pháp là rất nhỏ (tối đa là 0,18%). Từ đó có thể kết luận mô hình tính toán được xây dựng trên Sap2000 được kiểm chuẩn. Mô hình sẽ được sử dụng cho tính toán dây neo đơn có gắn thêm vật treo với số lượng bất kỳ.

Bảng 1. Kết quả tính toán dây neo đơn không có vật treo

Đại lượng	Kí hiệu/ đơn vị	Giá trị		
		Mô hình Sap2000	Phương pháp giải tích [12]	Sai số (%)
Góc nghiêng của dây neo tại vị trí đặt rùa neo	$\theta_0 (rad)$	0,277	0,277	0
Độ dạt ngang của vật nổi	$S(m)$	17,440	-	-
Lực căng dây tại vị trí vật nổi	$T(T)$	2,591	2,590	0,04
Lực ngang tác dụng lên rùa neo	$V_r(T)$	2,000	2,000	0,00
Lực thẳng đứng tác dụng lên rùa neo	$H_r(T)$	0,571	0,570	0,18

3. Kết quả và bàn luận

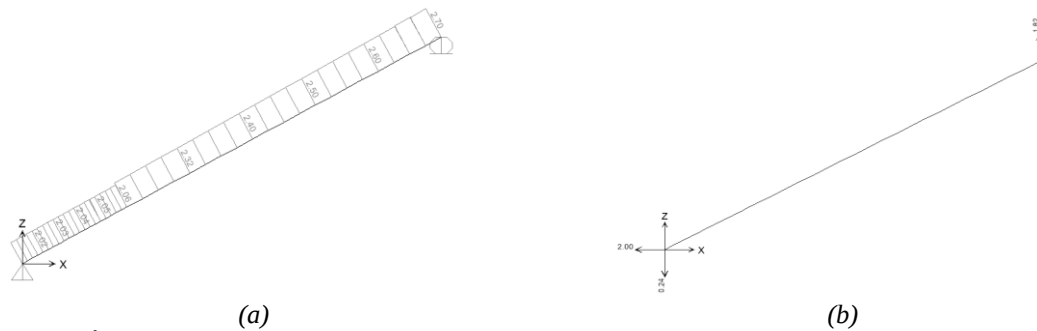
Phần này sẽ trình bày về kết quả tính toán dây neo đơn trong trường hợp có sử dụng một vật treo. Hình 3 thể hiện biến dạng của dây neo. Có thể nhận thấy rằng, biến dạng của dây neo thu được là hợp lý. Tại các vị trí có vật treo có điểm gãy, chứng tỏ dây neo bị võng hơn so với các vị trí khác. Độ dạt của vật nổi được suy ra từ chuyển vị ngang của gối di động ($-0,44 m$). Do ảnh hưởng của tải trọng do trọng lượng bản thân dây neo và vật treo, dù chịu tải trọng ngang H , vật nổi vẫn chuyển vị về phía rùa neo (chuyển vị sang trái). Điều này phù hợp với thực tế của dây neo vật nổi.



Hình 3. Biến dạng của dây neo trong trường hợp có một vật treo

Lực căng của dây neo được thể hiện ở Hình 4a. Có thể nhận thấy giá trị này tăng dần từ vị trí đặt rùa neo tới vị trí đặt phao ($2,02 \div 2,70 T$). Lực tác dụng lên rùa neo cũng được suy ra từ các giá trị phản lực tại gối cố định ở Hình 4b. Các giá trị cho thấy rùa neo có xu hướng bị nhấc lên và chuyển động về phía phao. Giá trị này cũng phù hợp với thực tế.

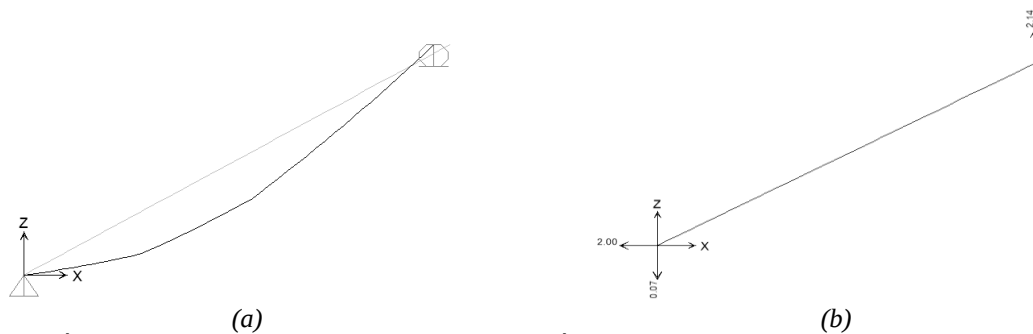
Bảng 2 tổng hợp kết quả tính toán và được so sánh với kết quả thu được từ mô hình số được lập trình trên Mathcad tham khảo từ tài liệu [12]. Có thể nhận thấy rằng kết quả tính toán của mô hình xây dựng trên Sap2000 và kết quả thu được từ tài liệu trên là trùng khớp. Như vậy, mô hình xây dựng trên Sap2000 của nghiên cứu này là đáng tin cậy.



Hình 4. Kết quả tính toán dây neo có một vật treo: (a) Lực căng dây, (b) Phản lực tại vị trí đặt rùa neo

Bảng 2. Kết quả tính toán dây neo đơn có vật treo

Đại lượng	Kí hiệu/ đơn vị	Giá trị	
		Mô hình Sap2000	Tài liệu [12]
Góc nghiêng dây neo tại đáy	$\theta_0 (rad)$	0,12	-
Độ dạt của vật nổi	$S(m)$	17,16	-
Lực căng dây tại vị trí vật nổi	$T(T)$	2,70	2,70
Lực tác dụng lên rùa neo theo phương ngang	$V_r(T)$	0,24	0,24
Lực tác dụng lên rùa neo theo phương đứng	$H_r(T)$	2,00	2,00



Hình 5. Kết quả tính toán dây neo có hai vật treo: (a) Biến dạng dây, (b) Phản lực tại vị trí đặt rùa neo

Để kiểm chứng sự ổn định của mô hình trong trường hợp có nhiều vật treo, phần này sẽ trình bày kết quả tính toán của trường hợp có 2 vật treo, vật treo thứ hai cách vật treo thứ nhất một khoảng là 5 m theo phương dọc dây, các thông số còn lại như mô hình có 1 vật treo. Biến dạng của dây neo được thể hiện ở Hình 5a. Tại hai vị trí đặt vật treo có sự thay đổi về độ cong của dây neo. Dây neo được chia làm ba đoạn cong Catenary riêng biệt: đoạn 1 từ vị trí rùa neo đến vị trí gắn vật nặng 1, đoạn 2 từ vị trí đặt vật nặng 1 đến vật nặng 2, và đoạn 3 từ vị trí đặt vật nặng 2 đến vị trí gắn vật nổi. Lực tác dụng lên rùa neo theo phương ngang là 2,00 T, theo phương đứng là 0,07T (Hình 5b). Giá trị này phản ánh đúng thực tế là khi có thêm vật nặng thì lực nâng rùa neo theo phương đứng giảm còn lực ngang tác dụng lên rùa neo chính bằng lực ngang tác dụng lên vật nổi. Cũng tương tự như phần trên, có thể thấy rằng biến dạng dây neo và các giá trị lực tác dụng lên rùa neo là hợp lý, phản ánh đúng thực tế làm việc của dây neo, mô hình là đáng tin cậy, phù hợp với số lượng vật treo bất kỳ. Như vậy, với ưu thế là trực quan, dễ thực hiện hơn tự lập trình trên Mathcad hoặc các code tương tự, mô hình được đề xuất trong bài báo này hoàn toàn có thể được ứng dụng rộng rãi trong các tính toán dây neo vật nổi tương tự hoặc các trường hợp tính toán cho cable mềm.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày tổng quan về lý thuyết tính toán dây neo đơn vật nổi bao gồm các phương trình mô tả quỹ đạo dây neo, các đại lượng khác liên quan đến tính toán công trình nổi như lực căng dây neo, chuyển vị vật nổi, lực nâng rùa neo. Bên cạnh đó, nhóm tác giả cũng trình bày về nội dung tính toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn cho dây neo đơn có gắn vật treo. Trên cơ

sở phân tích lý thuyết, mô hình tính toán dây neo đơn có vật treo trên phần mềm Sap2000 đã được đề xuất. Cụ thể, phần tử Cable và bộ giải nonlinear sử dụng P-delta plus đã được đề xuất để phù hợp với tính toán dây neo mềm, có chuyển vị và biến dạng lớn. Bài báo đã trình bày và phân tích mô hình dây neo có một và hai vật treo. Kết quả thu được từ mô hình trên Sap2000 là trạng thái biến dạng của dây neo. Các giá trị khác bao gồm lực căng dây lớn nhất, độ dẹt của vật nổi, góc nghiêng dây neo tại đáy và lực tác động lên rùa neo cũng thu được và được thể hiện rất trực quan. Để kiểm chuẩn mô hình, kết quả tính toán đã được so sánh với kết quả của một công bố trước đó. Sự sai khác của kết quả thu được từ hai phương pháp là nhỏ (giá trị lớn nhất là 0,18%), cho thấy sự đúng đắn của mô hình trên Sap2000, phù hợp với số lượng vật treo bất kỳ. Mô hình xây dựng trực quan trên Sap2000 – phần mềm quen thuộc tại Việt Nam, cho kết quả tin cậy, hứa hẹn ứng dụng rộng rãi trong tính toán dây neo đơn có vật treo và dây cable mềm cho các công trình như phao neo đơn, cầu phao nổi, trụ tua-bin gió ngoài khơi tại Việt Nam. Với khả năng mô phỏng được các tải trọng động của Sap2000, các yếu tố động, ngẫu nhiên của môi trường như sóng gió, dòng chảy sẽ được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] H. O. Berteaux, *Buoy Engineering* (Ocean Engineering; a Wiley Series). John Wiley and Sons, 1976.
- [2] S. Rui *et al.*, "A review on mooring lines and anchors of floating marine structures," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 199, 2024, Art. no. 114547.
- [3] K.-T. Ma, Y. Luo, T. Kwan, and Y. Wu, "Chapter 5 - Mooring analysis," in *Mooring System Engineering for Offshore Structures*, K.-T. Ma, Y. Luo, T. Kwan, and Y. Wu Eds.: Gulf Professional Publishing, 2019, pp. 85-114.
- [4] Z. Liu, Y. Tu, W. Wang, and G. Qian, "Numerical Analysis of a Catenary Mooring System Attached by Clump Masses for Improving the Wave-Resistance Ability of a Spar Buoy-Type Floating Offshore Wind Turbine," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 6, 2019, doi: 10.3390/app9061075.
- [5] C. V. Amaechi, A. C. Odijie, F. Wang, and J. Ye, "Numerical investigation on mooring line configurations of a Paired Column Semisubmersible for its global performance in deep water condition," *Ocean Engineering*, vol. 250, 2022, Art. no. 110572.
- [6] J. Li, H. Zuo, J. Zuo, Y. Jiang, and S. Liu, "Study on the mooring systems attaching clump weights and heavy chains for improving the typhoon resistance of floating offshore wind turbines," *Ocean Engineering*, vol. 311, 2024, Art. no. 118734.
- [7] T. Lopez-Olocco *et al.*, "Experimental and Numerical Study of the Influence of Clumped Weights on a Scaled Mooring Line," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, no. 5, doi: 10.3390/jmse10050676.
- [8] G. Benassai, A. Campanile, V. Piscopo, and A. Scamardella, "Optimization of Mooring Systems for Floating Offshore Wind Turbines," *Coastal Engineering Journal*, vol. 57, no. 04, 2015, Art. no. 1550021, doi: 10.1142/S0578563415500217.
- [9] I. A. Ja'e, M. O. Ahmed Ali, A. Yenduri, C. V. Amaechi, Z. Nizamani, and A. Nakayama, "Optimization of mooring line design parameters using Mooring Optimization Tool for FPSO (MooOpT4FPSO) with the consideration of integrated design methodology," *Ocean Engineering*, vol. 264, 2022, Art. no. 112499.
- [10] Y. Wang, H. Xie, and E. Zheng, "Design and research on optimization of single point mooring system," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1303, no. 1, 2019, Art. no. 012031, doi: 10.1088/1742-6596/1303/1/012031.
- [11] T. S. Nguyen, "Analysis of mooring line equipped with gravity cell," (in Vietnamese), *Journal of Marine Science and Technology*, vol. 47, pp. 46 - 49, 2016.
- [12] V. T. Dao, "Calculation of mooring lines with hanging objects by finite element method," (in Vietnamese), *Transport Magazine*, vol. 743, no. 7, pp.119 - 122, 2024.
- [13] V.T. Dao, "Analysis of anchor cables under dynamic loads using finite element method," (in Vietnamese), *Transport Magazine*, no. 4, pp.109 - 111, 2021.