



EFFECT OF SCOUR DEPTH ON THE DISPLACEMENT AND INTERNAL FORCE OF PILE FOUNDATIONS OF OFFSHORE WIND TURBINES

Nguyen Anh Dan^{*}, Nguyen Thanh Trung

University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 21/02/2025

Revised: 28/07/2025

Accepted: 10/08/2025

Published online: 15/08/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.6.6>

^{*} *Corresponding author*

Email: nadan@utc.edu.vn

Abstract. Scour often occurs around the pile foundations of offshore wind turbines, especially in places with weak soils such as sand or mud. This phenomenon causes soil loss, leading to changes in the bearing capacity of the soil, the behaviour of the structure and the foundation; thus, it can affect the bearing capacity and safety of the entire structure. Therefore, this issue needs special attention when calculating and designing foundations for offshore wind turbines. This paper, firstly, presented an overview of the scour phenomenon around the pile foundations of offshore wind turbines. Then, the study performed a calculation analysis for a specific case using a numerical model by L-pile software based on the p-y curve method. A series of analyses with different levels of soil scour were performed to evaluate the impact of scour on the behaviour of the pile. The results showed that when the scour depth increases, the horizontal displacement and moment of the pile increase significantly, possibly exceeding the allowable value and causing danger to the structures.

Keywords: Scour, pile foundation, offshore wind turbine, L-pile, p-y curve

@2025 University of Transport and Communications



ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỘ SÂU XÓI MÒN ĐẾN CHUYỂN VỊ VÀ NỘI LỰC CỦA MÓNG CỌC CÔNG TRÌNH ĐIỆN GIÓ BIỂN

Nguyễn Anh Dân*, Nguyễn Thành Trung

Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 21/02/2025

Ngày nhận bài sửa: 28/07/2025

Ngày chấp nhận đăng: 10/08/2025

Ngày xuất bản Online: 15/08/2025

<https://doi.org/10.47869/tcsj.76.6.6>

* Tác giả liên hệ

Email: nadan@utc.edu.vn

Tóm tắt. Xói mòn thường xảy ra xung quanh móng cọc của các công trình điện gió biển, đặc biệt là những nơi có địa chất như cát, bùn sét. Hiện tượng này làm mất đất dẫn đến thay đổi hành vi chịu lực, ứng xử của kết cấu cũng như nền móng và có thể ảnh hưởng đến khả năng chịu lực và an toàn của toàn bộ công trình. Do đó, trong tính toán thiết kế nền móng cho các công trình điện gió biển vấn đề này cần được đặc biệt quan tâm. Bài báo này, trước hết, trình bày tổng quan về hiện tượng xói xung quanh móng cọc của các công trình điện gió biển. Sau đó, nghiên cứu thực hiện phân tích tính toán cho trường hợp cụ thể bằng mô hình số sử dụng phần mềm L-pile trên cơ sở phương pháp đường cong p-y. Một loạt các phân tích với mức độ xói khác nhau của đất đã được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của xói đến ứng xử của cọc. Kết quả đã chỉ rằng, khi độ sâu xói mòn tăng lên thì chuyển vị ngang và mô men của cọc tăng lên đáng kể, có thể vượt quá giới hạn cho phép gây nguy hiểm cho công trình.

Từ khóa: Xói mòn, móng cọc, điện gió biển, L-pile, đường cong p-y

@2025 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sóng và dòng chảy thường xuyên vận chuyển các hạt bùn cát dưới đáy biển trong một quá trình gọi là "xói mòn". Xói mòn là mối quan tâm đặc biệt khi thiết kế nền móng cho các tua-bin gió ngoài khơi, vì sự di chuyển của đất ra khỏi móng sẽ dẫn ảnh hưởng đến công trình. Ba loại xói mòn phổ biến nhất bao gồm xói mòn cục bộ, xảy ra xung quanh móng; xói mòn tổng thể, xảy ra trong toàn bộ khu vực trang trại gió và do tác động của nhiều móng và cuối cùng là các chuyển động tổng thể của đáy biển, bao gồm sóng cát, gờ và bãi cạn. Xói mòn có thể dẫn đến hai hậu quả nghiêm trọng. Đầu tiên, xói mòn làm giảm khả năng chịu lực của kết

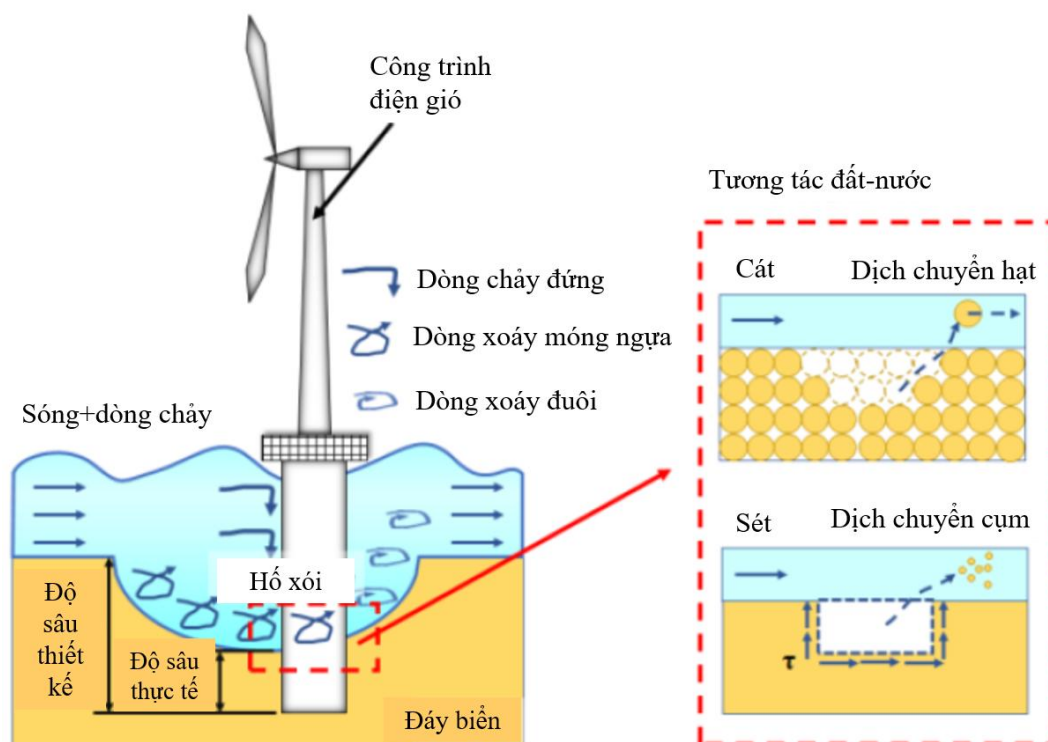
cầu và nền móng. Thứ hai, xói mòn có thể dẫn đến các lực tác động bổ sung, có thể dẫn đến lún hoặc ứng suất quá mức của nền móng [1]. Đối với thiết kế các công trình ngoài khơi, hầu hết các tiêu chuẩn thiết kế đều tham khảo tài liệu về xói mòn cụ thể ở khu vực xây dựng để xác định độ sâu xói mòn thực tế. Liên quan đến vấn đề trong bài báo này, đã có một số nghiên cứu của tác giả trên thế giới có thể kể đến như: Duncan đã nghiên cứu tổng thể về móng cho các công trình điện gió biển, trong đó có đề cập đến các phương pháp để phân tích móng cọc chịu tải trọng ngang [2]. Shen và cộng sự đã nghiên cứu sử dụng cọc xi măng đất để tăng khả năng chịu lực cũng như chống xói cho móng công trình điện gió biển dạng Monopile [3]. Wang và cộng sự đã đánh giá tác động của việc sử dụng đất được gia cố làm lớp bảo vệ chống xói mòn cho móng tua bin gió ngoài khơi thông qua các thí nghiệm chống xói mòn đơn giản trong phòng [4]. Ma và cộng sự đã sử dụng thí nghiệm và phương pháp số để nghiên cứu ảnh hưởng của sự xói mòn đến phản ứng kết cấu của tuabin gió ngoài khơi được lắp đặt trên chân đế dạng tripod [5]. Các tiêu chuẩn và hướng dẫn thiết kế công trình hiện gió biển hiện hành trên thế giới như DNV hay IEC cũng đã có một số các quy định liên quan đến đánh giá xói mòn và thiết kế chống xói [6,7].

Ở Việt Nam, trong những năm gần đây, một số nhà khoa học cũng đã tiến hành các nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm đối với các kết cấu công trình điện gió biển. Tiêu biểu có thể kể đến như Mai Hồng Quân và cộng sự đã nghiên cứu lựa chọn giải pháp và xây dựng chỉ dẫn thiết kế, thi công kết cấu tuabin phát điện sức gió được xây dựng ở Việt Nam [8]. Nghiên cứu của Nguyễn Anh Dân về giải pháp kết cấu chân đế và nền móng cho các trạm phát điện bằng sức gió trong điều kiện Việt Nam [9]. Nguyễn Thành Trung và Nguyễn Anh Dân đã phân tích phản ứng động để dự đoán khối lượng nước kèm và giảm chấn trong các cấu trúc cho các công trình dạng Jacket ngoài khơi [10]. Janne Kristin Pries và Nguyễn Ngọc Hoàng đã giới thiệu và mô tả phương pháp chống xói bằng bao cát địa chất kỹ thuật ứng dụng cho nền móng điện gió ngoài khơi [11].

Như vậy có thể thấy rằng, trên thế giới các nghiên cứu liên quan đến điện gió biển khá đa dạng. Tuy nhiên, các nghiên cứu liên quan ở Việt Nam còn nhiều khiêm tốn, đặc biệt là các liên quan đến xói nền móng và ảnh hưởng của xói đến ứng xử của nền móng và kết cấu các công trình điện gió biển. Xuất phát từ thực tiễn đó, bài báo này nghiên cứu tổng quan về cơ chế xói xung quanh móng cọc của công trình điện gió biển. Sau đó, phương pháp số được sử dụng để mô tả tương tác cọc đất và đánh giá ảnh hưởng của xói đến chuyển vị và nội lực của cọc.

2. CƠ CHẾ XÓI MÒN

Như thể hiện trong Hình 1, sự xói mòn xung quanh móng công trình điện gió biển là kết quả của sự tương tác giữa dòng chảy, đất và kết cấu. Khi dòng chảy đến gần móng, một trường dòng chảy cực bộ phức tạp hơn được tạo ra xung quanh móng có thể được chia thành dòng chảy đứng (downflow), dòng xoáy hình móng ngựa (Horseshoe vortex) và dòng xoáy đuôi (wake vortex) [12]. Khi chịu các kiểu dòng chảy này, các hạt đất thể hiện hai quá trình xói mòn điển hình, trượt và lăn, và ba trạng thái có thể xảy ra đối với các hạt bị xói mòn: (1) các hạt được dòng nước mang đi và lắng đọng tại một vị trí hạ lưu khi vận tốc dòng chảy trở nên đủ thấp; (2) các hạt sẽ lăn trên nền đất từ vị trí ban đầu cho đến khi chúng ổn định tại một điểm hạ lưu; và (3) các hạt trượt vào hố xói mòn liền kề. Đối với đất sét, sự xói mòn của các hạt có xu hướng xảy ra theo cụm.



Hình 1. Sơ đồ cơ chế xói mòn móng của công trình điện gió biển [4].

Khi chịu tác động kết hợp của dòng chảy và kết cấu xói mòn sẽ xảy ra khi ứng suất xói trên đất xung quanh nền móng lớn hơn khả năng chống xói của đất. Hiệu ứng xói mòn thường được đặc trưng bởi vận tốc dòng chảy (V) hoặc lực cắt (τ) do dòng nước tạo ra trên đất xung quanh móng, chịu ảnh hưởng của các thông số dòng chảy của nước biển (vận tốc dòng chảy v_w) và các thông số nền móng (bán kính cọc D). Trong khi khả năng chống xói mòn của đất (vận tốc dòng chảy tới hạn V_e hoặc ứng suất cắt tới hạn τ_e) chịu ảnh hưởng của các thông số địa kỹ thuật của chính đất (kích thước hạt trung bình d_{50} , lực kết dính c , v.v.). Sự xuất hiện của hiện tượng xói mòn có thể được xác định bằng cách sử dụng phương trình sau:

$$\tau(v_w, D) > \tau_c(d_{50}, c, \dots) \quad \text{hoặc} \quad V(v_w, D) > V_c(d_{50}, c, \dots) \quad (1)$$

Do nền móng của tuabin gió nằm trong môi trường biển nên ứng suất cắt tác động lên lớp bảo vệ thường phải xem xét tác động kết hợp của dòng chảy và sóng. Phương trình (2), do Soulsby [13] cung cấp, là phương pháp tính ứng suất cắt khi xem xét tác động kết hợp của dòng chảy và sóng.

$$\tau_{wc \max} = \left[(\tau_m + \tau_w \cos \phi)^2 + (\tau_w \sin \phi)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\tau_m = \tau_c \left[1 + 1,2 \left(\frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3.2} \right]$$

trong đó τ_m là ứng suất cắt đáy kết hợp trung bình, τ_w là ứng suất cắt đáy do sóng gây ra, τ_c là ứng suất cắt đáy do dòng chảy gây ra, và ϕ là góc giữa sóng và dòng chảy.

Trong tiêu chuẩn DNV [6], một phương trình để tính toán vận tốc dòng chảy tối đa ở đáy biển dưới tác động kết hợp của dòng chảy và sóng cũng được đề xuất như thể hiện trong phương trình (3):

$$a = \frac{u_{\max} T}{2\pi}$$

$$u_{\max} = \frac{\pi H}{T.sh(kh)} \quad (3)$$

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = g.k.th(kh)$$

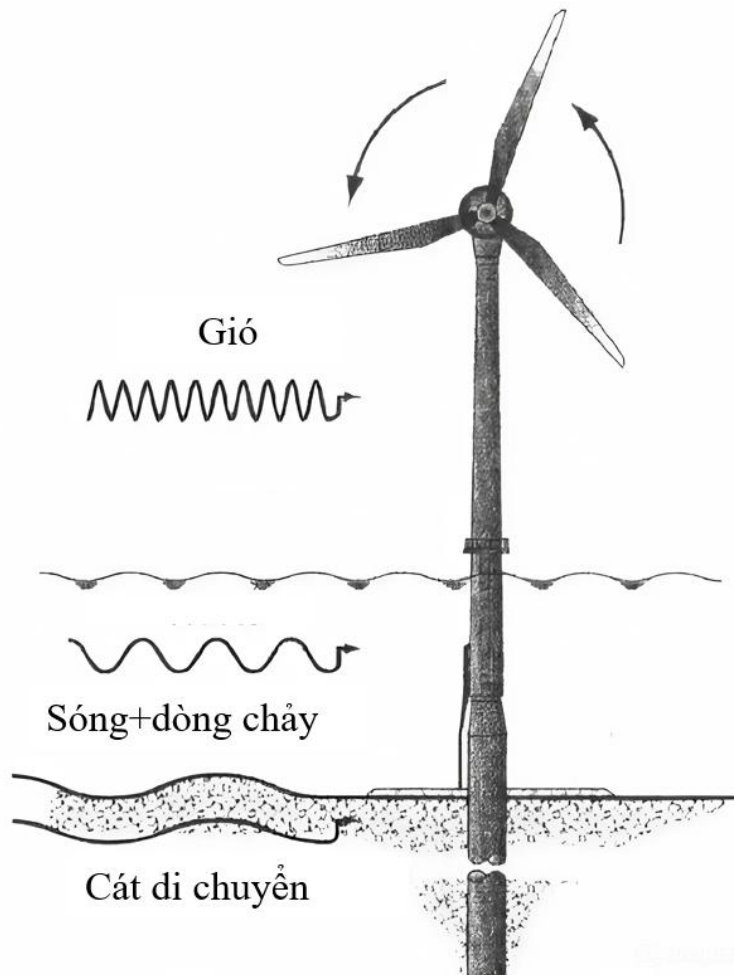
trong đó T là chu kỳ sóng, H là chiều cao sóng, h là độ sâu nước, k là số sóng và g là gia tốc trọng trường.

Đối với kịch bản có tương tác sóng-dòng chảy kết hợp, ứng suất cắt hoặc vận tốc dòng chảy có thể được tính toán bằng Phương trình (2) và (3) để đánh giá sơ bộ sự khởi đầu của quá trình xói mòn.

3. TRƯỜNG HỢP NGHIÊN CỨU

3.1. Thông số đầu vào

Trường hợp nghiên cứu trong bài báo này là turbine điện gió biển 5MW có kết cấu móng dạng Monopile như trên Hình 2. Độ sâu nước là 35 mét; biên độ thủy triều 1,6 mét; nước dâng do bão 2,0 mét. Các thông số kỹ thuật của tuabin được trình bày dưới đây trong Bảng 1.



Hình 2. Kết cấu dạng Monopile [1].

Bảng 1. Các thông số chính của turbine điện gió [2].

Thông số	Giá trị
Công suất roto (MW)	5
Khối lượng tuabin (Tấn)	354
Đường kính cánh quạt (m)	126
Tốc độ rôto danh nghĩa (rpm)	12,1
Khoảng thời gian quay (rpm)	4,6-12,1
Tốc độ gió hoạt động (m/s)	4,0
Tốc độ gió danh nghĩa (m/s)	11,0
Tốc độ gió dừng hoạt động (m/s)	25,0

Các thông số móng cọc và tải trọng được trình bày trong Bảng 2 và 3. Số liệu cơ bản của địa chất được thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 2. Thông số cọc [2].

Thông số	Kích thước
Đường kính (m)	5,5
Bề dày (cm)	6,0
Chiều dài trong đất (m)	30,0

Bảng 3. Tải trọng tác dụng lên cọc ở mức mặt đáy biển [2].

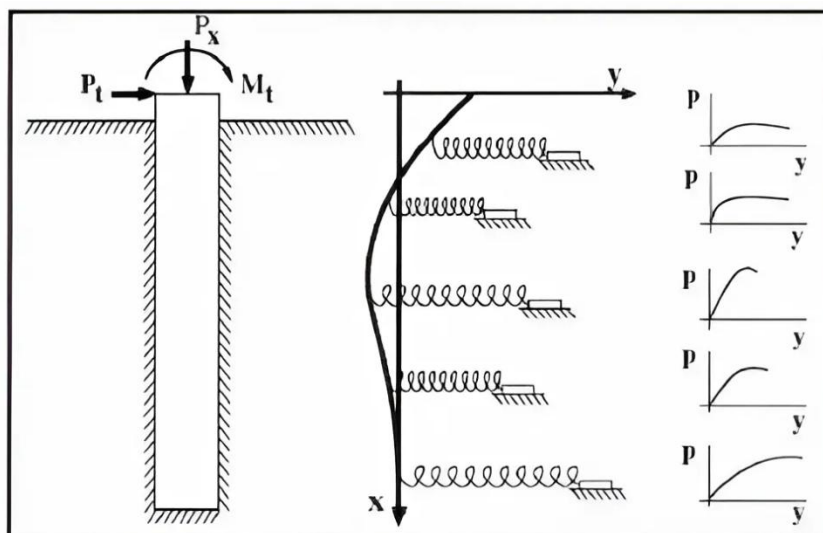
Thông số	Kích thước
Lực thẳng đứng (kN)	6842
Tải trọng ngang tại đáy biển (kN)	10700
Mô men tại đáy biển (kNm)	426136

3.2. Phương pháp và phần mềm phân tích

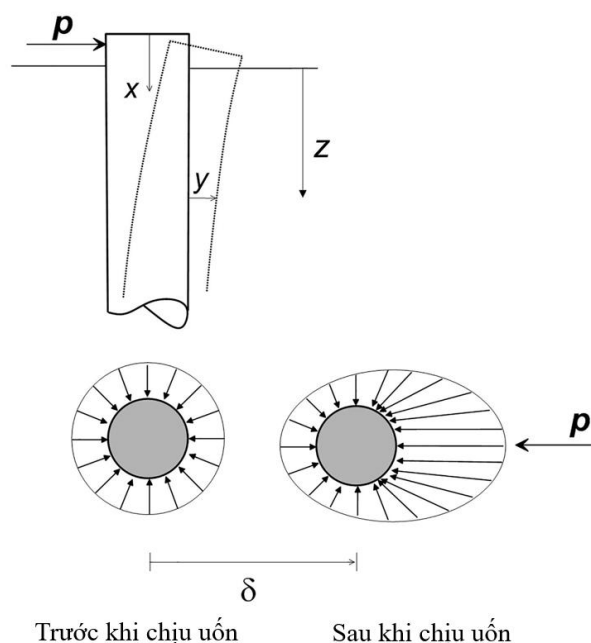
Nghiên cứu này sử dụng phân tích bằng mô hình số với phần mềm L-pile. Cơ sở lý thuyết của phần mềm này được dựa trên phương pháp đường cong p-y. Phương pháp đường cong p-y là một trong những phương pháp được sử dụng phổ biến trong thực tế để xác định phản ứng của cọc đối với tải trọng ngang. Trong phương pháp đường cong p-y, đất gần cọc được thay thế bằng một số lò xo nằm ngang, để biểu diễn tương tác đất-kết cấu phi tuyến tính. Phản lực của lò xo, p, là một hàm của chuyển vị, y. Đường cong p-y là các đồ thị của phản lực với chuyển vị. Các phần ban đầu là tuyến tính, biểu thị phạm vi đàn hồi. Phần cuối cùng của đường cong là nằm ngang, biểu thị sự phá hoại liên quan đến hiện tượng chảy dẻo của đất xung quanh cọc. Phần trung gian có thể được suy ra theo một số cách và thay đổi tùy theo phương pháp hoặc chương trình. Các đường cong p-y ví dụ có thể được xem bên dưới trong Hình 3, trong khi phân bố ứng suất trên cọc trước và sau khi uốn có thể được xem trong Hình 4. Ở chuyển vị nhỏ, các đường cong p-y liên quan trực tiếp đến mô đun đàn hồi của đường cong ứng suất-biến dạng. Khi chuyển vị tăng lên, tải sẽ tăng đến giá trị giới hạn, liên quan trực tiếp đến hành vi phá hoại dẻo. Một đường cong p-y được xây dựng cho mỗi lò xo. Từ mỗi đường cong p-y, phần tuyến tính ban đầu có thể được sử dụng để ước tính mô đun đàn hồi cho đất. Các mô đun có thể được kết hợp để tạo thành một đồ thị của mô đun đàn hồi so với độ sâu.

Bảng 4. Số liệu địa chất.

Thông số	Giá trị
<i>Lớp 1: Cát chặt</i>	
Chiều dày (m)	10,0
Trọng lượng riêng (kN/m^3)	19,0
Góc ma sát trong (độ)	35,0
Sức kháng cắt không thoát nước (kPa)	-
<i>Lớp 2: Sét dẻo cứng</i>	
Chiều dày (m)	9,0
Trọng lượng riêng (kN/m^3)	19,0
Góc ma sát trong (độ)	-
Sức kháng cắt không thoát nước (kPa)	60,0
<i>Lớp 3: Cát chặt</i>	
Chiều dày (m)	-
Trọng lượng riêng (kN/m^3)	19,0
Góc ma sát trong (độ)	40,0
Sức kháng cắt không thoát nước (kPa)	-

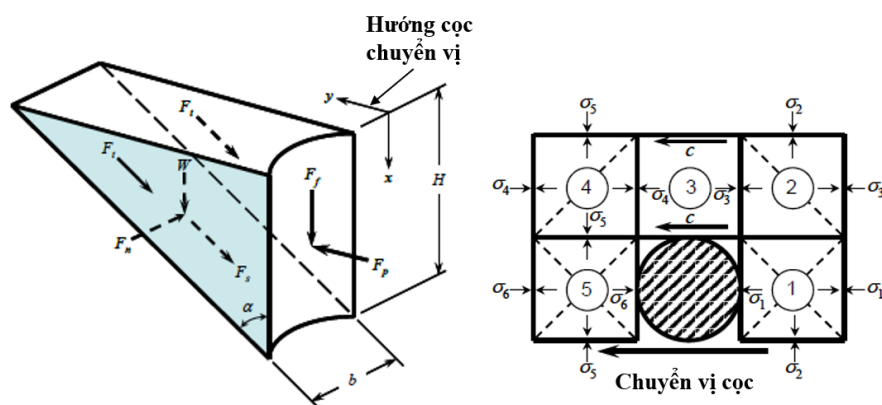


Hình 3. Mô hình cọc chịu tải ngang, lò xo đàn hồi và đường cong p-y [14].



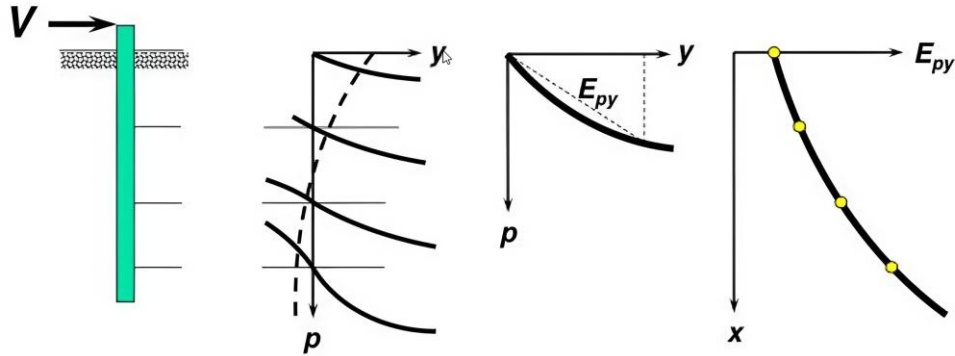
Hình 4. Ứng suất cọc trước và sau khi chịu uốn [15].

L-pile là một chương trình máy tính do Ensoft phát triển, sử dụng các đường cong p-y để tính độ võng ngang, độ quay và phản ứng của đất liên quan đến độ sâu trong đất phi tuyến tính. Người dùng nhập các đặc tính đất cho một hoặc nhiều lớp, đặc tính cọc và thông tin tải như độ lớn, loại và vị trí. Ngoài ra, người dùng có thể chỉ định đầu cọc cố định hay tự do. Sau đó, chương trình tự động tạo ra các đường cong p-y. Các đường cong p-y là đàn hồi cho phần ban đầu, sử dụng trường hợp Winkler, trong đó độ cứng tăng tuyến tính theo độ sâu ($E = nz$). Phần trung gian của các đường cong p-y được tạo ra bằng cách sử dụng các phương trình có nguồn gốc thực nghiệm do Ensoft đề xuất [14]. Các phương trình dựa trên các khuyến nghị đã công bố cũng như các thí nghiệm quy mô đầy đủ của các cọc có dụng cụ. Các phần phá hủy của các đường cong p-y được tạo ra bằng cách sử dụng lý thuyết Rankine, cho cơ chế được thể hiện trong Hình 5. L-pile cũng đã tạo ra các quy trình được phát triển để tạo các đường cong p-y cho đất phân lớp.



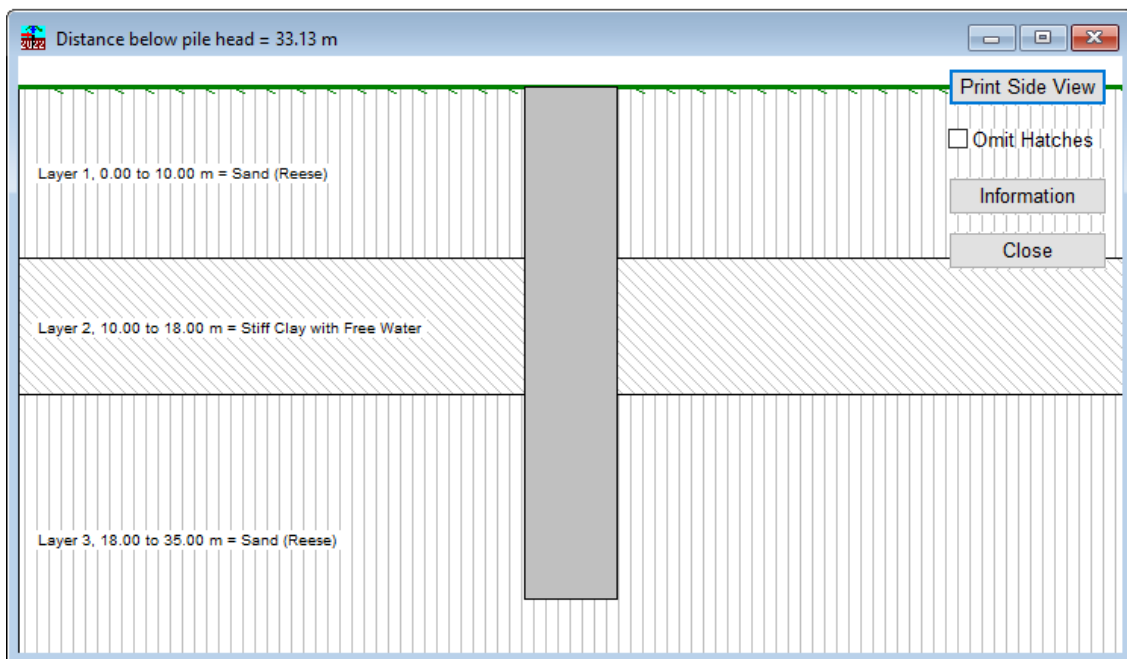
Hình 5. Lý thuyết phân tích cọc sử dụng trong L-pile [14,16].

Trong L-pile cũng có thể chỉ định thủ công các đường cong p-y cho từng loại đất và độ sâu. Hình 6 bên dưới là biểu diễn đồ họa về quy trình của L-Pile để xác định phản ứng của cọc đối với tải trọng. Phản ứng bao gồm độ võng, độ xoay, phân bố mô men và lực cắt, và phản lực của đất được huy động so với độ sâu.



Hình 6. Quy trình phân tích bằng phần mềm L-pile xác định phản ứng của cọc [14,16].

Mô hình phân tích của trường hợp nghiên cứu trong bài toán này được trình bày trong Hình 7. Các thông số cọc, địa chất và tải trọng được lấy theo các số liệu Bảng 2 đến 4. Đối với lớp đất 1 và lớp đất 3 là lớp cát, phân tích sử dụng đường cong p-y đề xuất bởi Reese et al [17]. Đường cong p-y này được nghiên cứu đề xuất ứng dụng phù hợp cho các lớp cát của các công trình ngoài khơi. Đối với lớp đất 2 là sét dẻo cứng, nghiên cứu đã sử dụng đường cong p-y do Reese et al xây dựng dựa trên các thí nghiệm cho các lớp đất sét cứng ngập nước [18]. Các đường cong p-y này đều được tích hợp sẵn trong chương trình phân tích L-pile và có thể xem chi tiết tại các tài liệu [16–18].



Hình 7. Mô hình phân tích cọc bằng phần mềm L-pile.

3.3. Kết quả phân tích

3.3.1. Trường hợp mặt đất không bị xói

Hình 8 (a) và (b) thể hiện mối quan hệ chuyển vị và mô men uốn của cọc theo độ sâu. Kết quả tính toán cho thấy chuyển vị lớn nhất ở đáy biển khoảng 8 cm sau đó giảm dần theo độ sâu. Ở độ sâu khoảng 20 dưới đáy biển thì cọc bị chuyển vị theo hướng ngược lại khoảng 0,1 đến 0,2 mm (chuyển vị âm). Như vậy, nếu so sánh với chuyển vị cho phép lớn nhất đề nghị trong cuốn “thiết kế nhanh móng cọc điện gió dạng monopile [19]” là 12,7 cm thì giá trị chuyển vị ở trong trường hợp này hoàn toàn nằm trong phạm vi cho phép. Mô men uốn ở mức đáy biển khoảng 426000 kNm, mô men lớn nhất khoảng 460000 kNm được ghi nhận ở độ sâu khoảng 5m.

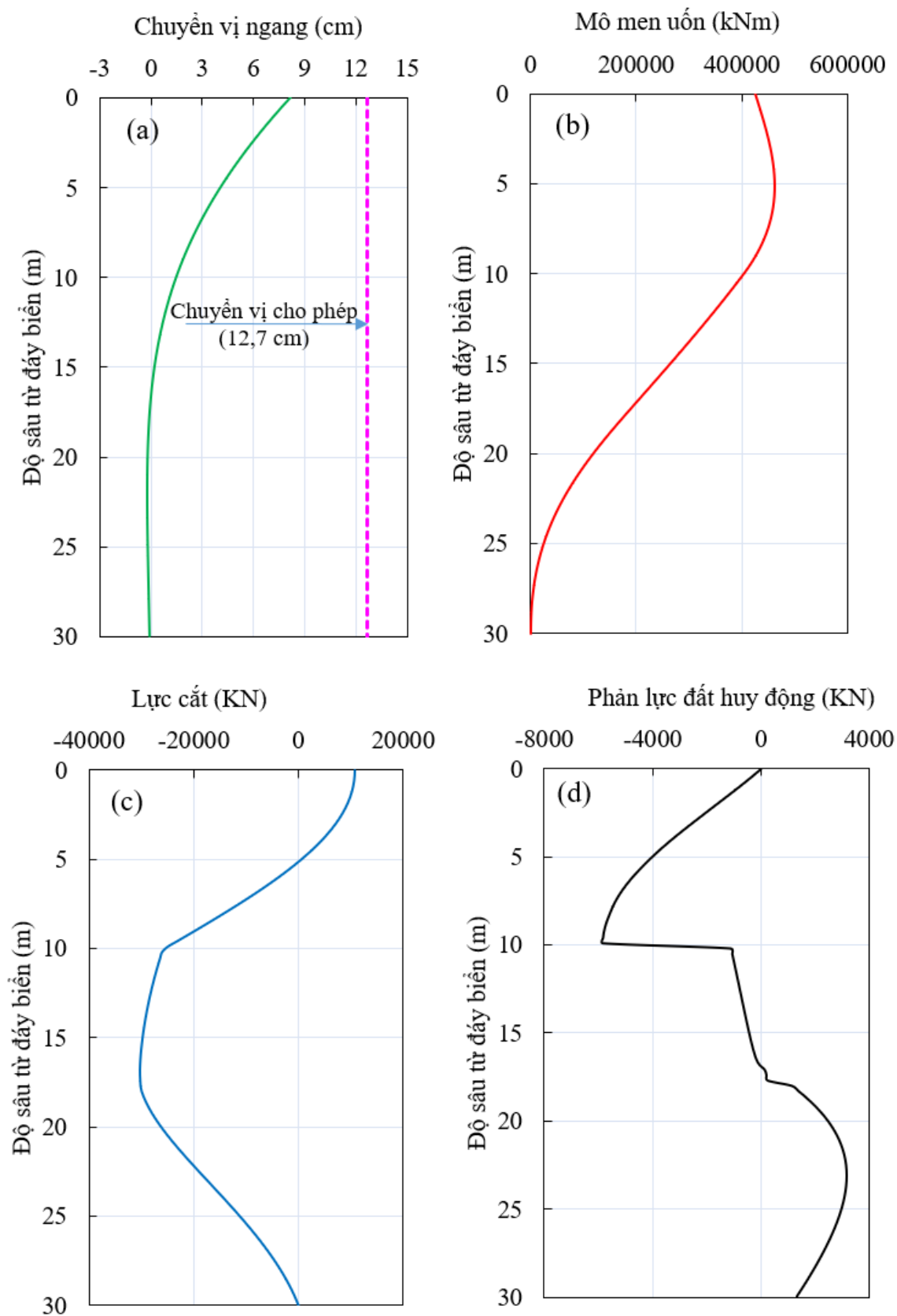
Lực cắt và phản lực đất huy động dọc theo chiều dài cọc được trình bày trong hình 8 (c) và (d). Tại mặt biển, lực cắt tác dụng lên cọc khoảng 11000 kN/m, sau đó giảm dần và đảo chiều đạt cực đại khoảng 30000 kN tại độ sâu khoảng 18m. Phản lực đất huy động ở lớp đất 1 cũng tăng dần từ 0 đến 5800 kN ở đáy lớp 1. Trong khi đó, phản lực huy động ở lớp đất 2 là khá nhỏ, trung bình khoảng 600 kN. Đối với lớp 3, giá trị lớn nhất khoảng 3100 kN ở độ sâu khoảng 24m.

3.3.2. Ảnh hưởng của xói tới ứng xử của cọc

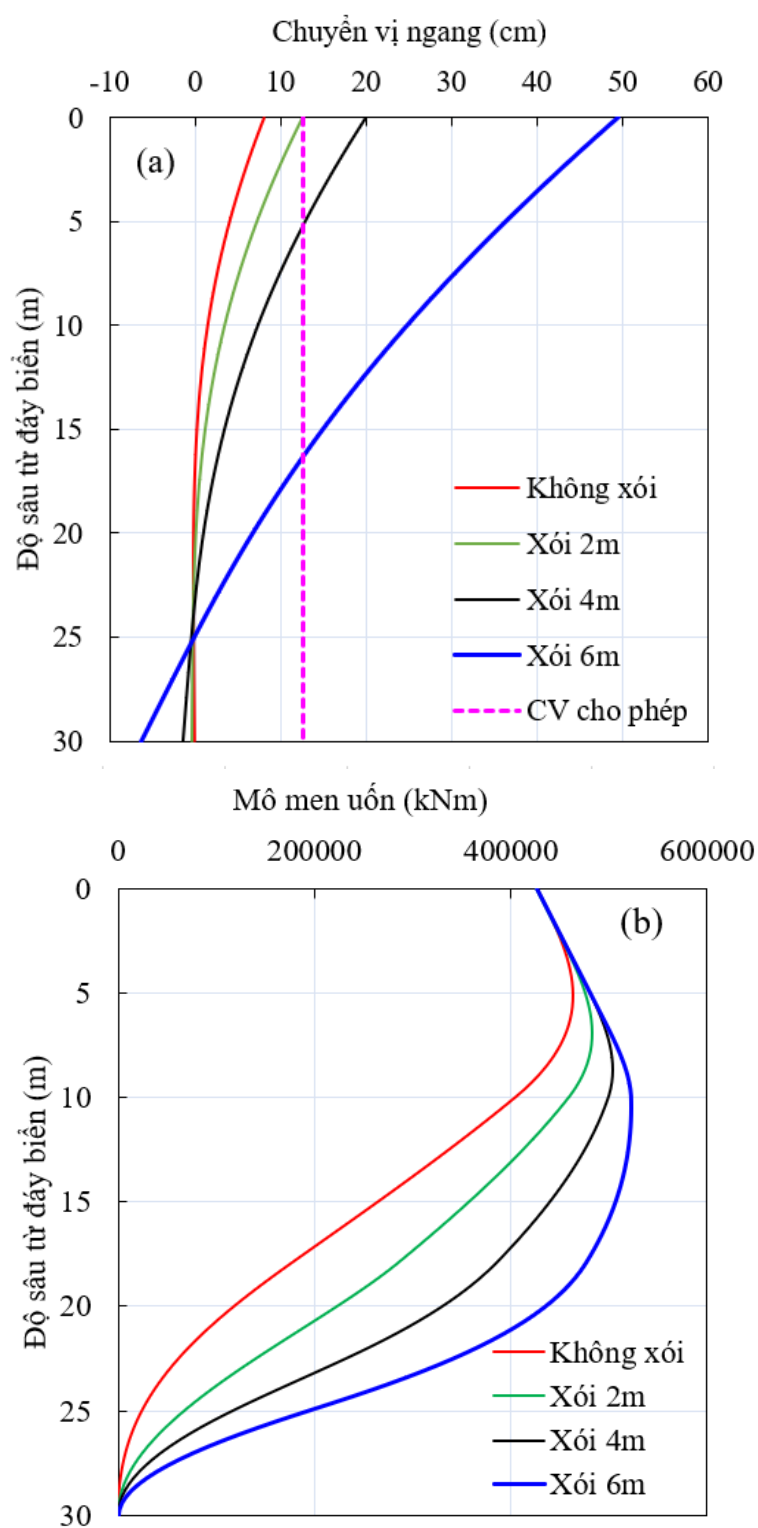
Để xem xét ảnh hưởng của độ sâu xói tới ứng xử của cọc, nghiên cứu đã thực hiện phân tích với nhiều trường hợp có độ sâu xói khác nhau. Theo khuyến cáo của tiêu chuẩn DNV [6] trong trường hợp không có số liệu xói, các thiết kế nên được tính toán với độ sâu xói trong khoảng từ 1.0D đến 1.5D (D là đường kính của cọc). Trong thực tế dưới tác dụng của các yếu tố môi trường và kết cấu, độ sâu xói sẽ tăng dần theo thời gian. Do đó, trong bài báo này, các tính toán được thực hiện với độ sâu xói tăng dần từ 2m, 4m, và 6m để so sánh với trường hợp không bị xói.

Kết quả so sánh chuyển vị và mô men uốn của cọc cho các trường hợp được trình bày trên Hình 9(a) và (b). Kết quả phân tích đã chỉ ra rằng khi độ sâu xói tăng lên thì cả chuyển vị và mô men uốn của cọc đều tăng. Như ở trên Hình 9(a) khi độ sâu xói tăng lên 2, 4, và 6m thì chuyển vị lớn nhất đầu cọc tăng từ 8,1 cm lên 12,5 cm, 20 cm và 50 cm, theo thứ tự. Điều đó có nghĩa là khi độ sâu xói vượt quá 2m thì chuyển vị tại đáy biển vượt quá giá trị cho phép. Khi độ sâu xói tăng lên khoảng 1,1D thì chuyển vị cọc ở tại đáy biển tăng lên rất lớn khoảng 6,3 lần so với trường hợp không có xói. Tương tự đối với kết quả mô men uốn; mô men tại đầu cọc không tăng nhưng mô men dọc theo chiều dài cọc lại tăng lên nhanh. Giá trị lớn nhất ghi nhận là 483000 kNm (xói 2m), 503000 kNm (xói 4m) và 522000 (xói 6m). Mức độ gia tăng của chuyển vị và mô men đầu cọc có thể phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau như tính chất của đất, đặc điểm và đường kính cọc, độ lớn và tính chất của tải trọng tác động... Tuy nhiên về cơ bản xu hướng gia tăng chuyển vị và mô men cọc trên đây phù hợp với với một số nghiên cứu trước đây được thực hiện bằng thí nghiệm [20] và mô hình số [21,22].

Nguyên nhân của sự gia tăng chuyển vị và mô men uốn là do sự xói mòn đã làm mất đất xung quanh cọc, dẫn đến giảm sức kháng, tăng chiều dài tự do của cọc. Trong trường hợp này lớp đất 1 là lớp đất cát chặt có khả năng chịu lực tốt nhưng lại dễ bị xói mòn. Kết quả phân tích cũng đã cho thấy sự xói mòn đất làm thay đổi đáng kể ứng xử của cọc, làm gia tăng nội lực và chuyển vị cọc. Do đó trong thiết kế cần xem xét để có giải pháp chống xói hiệu quả cho từng công trình điện gió biển.



Hình 8. Kết quả phân tích cọc trường hợp đất không bị xói.



Hình 9. Ảnh hưởng của xói mòn tới phản ứng của cọc.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của xói đến ứng xử của cọc công trình điện gió biển bằng phương pháp đường cong p-y sử dụng phần mềm L-Pile. Trên cơ sở đó, một số kết luận sau đây đã được tổng kết cho nghiên cứu này:

Sự xói mòn xung quanh móng công trình điện gió ngoài khơi là kết quả của sự tương tác giữa dòng chảy, đất và kết cấu, gây ra một trường dòng chảy cục bộ phức tạp xung quanh móng. Xói mòn làm giảm khả năng chịu lực của móng và kết cấu nói chung, nó cũng có thể làm gia tăng thêm các tải trọng tác dụng lên công trình.

Phương pháp đường cong p-y là một trong những phương pháp đang được sử dụng phổ biến trong thực tế để xác định phản ứng của cọc đối chịu tải trọng ngang; do đó, nó có thể áp dụng phù hợp với công trình điện gió biển. Phương pháp này có thể phân tích cho nhiều độ sâu xói khác nhau dưới tác dụng của nhiều trường hợp tải trọng.

Với trường hợp nghiên cứu trong bài toán này, địa chất đáy biển là cát chặt, các kết quả phân tích cho thấy khi độ sâu xói tăng lên làm tăng cả chuyển vị và mô men của cọc. Cụ thể khi độ sâu xói tăng lên 2m thì chuyển vị cọc tăng lên khoảng 1,5 lần trong khi mô men tăng khoảng 5%. Khi độ sâu xói tăng lên khoảng 1,1D thì chuyển vị tăng lên 6,3 lần và mô men tăng khoảng 13%. Do đó, việc tìm giải pháp chống xói cho móng cọc các công trình điện gió biển là hết sức cần thiết.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo (Việt Nam) thông qua Đề tài khoa học số B2024-GHA-05.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Malhotra, Design & Construction Considerations for Offshore Wind Turbine Foundations in North America, 2009.
- [2]. R.C. Duncan, Foundation for an offshore wind turbine, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [3]. K. Shen, H. Zhang, J. Liu, X. Zhao, Y. Zhang, Study of cement-soil mixed piles reinforcement method for offshore wind turbine pile foundation, Ocean Eng, 313 (2024) 119423.
- [4]. J. Wang, J. Xie, Y. Wu, C. Wang, F. Liang, An Investigation of the Effect of Utilizing Solidified Soil as Scour Protection for Offshore Wind Turbine Foundations via a Simplified Scour Resistance Test, Mar. Sci. Eng, 10 (2022) 1317. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmse10091317>.
- [5]. H. Ma, J.Y. A, L. Chen, Effect of scour on the structural response of an offshore wind turbine supported on tripod foundation, Appl. Ocean Res, 73 (2018) 179–189. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.02.007>.
- [6]. Det Norske Veritas, DNVGL-ST-0126, Support structures for wind turbine, 2021.
- [7]. European Committee for Electrotechnical Standardization, IEC 61400-3, Design requirements for offshore wind turbines, 2009.
- [8]. H.Q. Mai, Nghiên cứu lựa chọn giải pháp và xây dựng chỉ dẫn thiết kế, thi công kết cấu Tuabine phát điện sức gió được xây dựng ở Việt Nam, Đề Tài NCKH Cấp Bộ Xây Dựng, 2021.
- [9]. A.D. Nguyễn, Nghiên cứu các giải pháp kết cấu chân đế và nền móng của các trạm phát điện bằng sức gió đặt ở ven biển phù hợp điều kiện Việt Nam, Đề Tài NCKH Cấp Trường Đại Học Giao Thông Vận Tải, 2016.
- [10]. N.T. Trung, A.D. Nguyen, Analyzing vibration responses to predict water-added mass and hydrodynamic damping in offshore jacket structures, Ships Offshore Struct, (2024) 1–12.

<https://doi.org/10.1080/17445302.2024.2398269>.

- [11]. K.P. Janne, N.H. Nguyễn, Nền móng điện gió ngoài khơi: Chống xói hiệu quả bằng bao cát địa chất kỹ thuật, Tạp Chí Xây Dựng, 2022.
- [12]. C. Wang, Y. Yuan, F. Liang, Y. Xiong, Investigating the effect of grain composition on the erosion around deepwater foundations with a new simplified scour resistance test, *Transp. Geotech*, 28 (2021) 100527. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100527>.
- [13]. L. De Vos, J. De Rouck, P. Troch, P. Frigaard, Empirical Design of Scour Protections around Monopile Foundations: Part 1: Static Approach, *Coast. Eng.*, 58 (2021) 540–553. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.02.001>.
- [14]. L.C. Reese, W.M. Isenhower, S.-T. Wang, *Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations*, John Wiley & Sons, 2006.
- [15]. M. Cecconi, V. Pane, A. Vecchietti, D. Bellavita, Horizontal capacity of single piles: an extension of Broms' theory for $c-\phi$ soils, *Soils Found*, 59 (2019) 840–856. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.01.007>.
- [16]. L.C. Reese, S.-T. Wang, L.G. Vasquez, J.A. Arrellaga, W.M. Isenhower, *Lpile v2022 Technical Manual*, Ensoft, INC, 2022.
- [17]. L.C. Reese, W.R. Cox, F.D. Koop, Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand, in: 6th Offshore Technol. Conf., 1974.
- [18]. L.C. Reese, W.R. Cox, F.D. Koop, Field Testing and Analysis of Laterally Loaded Piles in Stiff Clay, in: 7th Offshore Technol. Conf., (1975) 671–690.
- [19]. W.E. de Vries, J. van der Tempel, Quick Monopile Design, in: *Eur. Offshore Wind Conf. Exhib.*, Berlin, Germany, 2007.
- [20]. Q. Li, L.J. Prendergast, A. Askarinejad, G. Chortis, K. Gavin, Centrifuge modeling of the impact of local and global scour erosion on the monotonic lateral response of a monopile in sand, *Geotech. Test. J.*, 43 (2020) 1–32. <https://doi.org/10.1520/GTJ20180322>.
- [21]. Y.E. Mostafa, Effect of Local and Global Scour on Lateral Response of Single Piles in Different Soil Conditions, *Engineering*, 04 (2012) 297–306. <https://doi.org/10.4236/eng.2012.46039>.
- [22]. Z. Wang, R. Hu, H. Leng, H. Liu, Y. Bai, W. Lu, Deformation analysis of large diameter monopiles of offshore wind turbines under scour, *Appl. Sci.*, 10 (2020) 1–18. <https://doi.org/10.3390/app10217579>.