

# NGHIÊN CỨU XÁC ĐỊNH HỆ SỐ TẬP TRUNG ỨNG SUẤT CHO KẾT CẤU CÔNG TRÌNH PHONG ĐIỆN DẠNG MỘT TRỤ ĐỠ BẰNG MÔ HÌNH SỐ

Đỗ Thành Long<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>*Khoa Xây dựng Công trình biển và dầu khí, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,  
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

*Nhận ngày 21/6/2022, Sửa xong 19/7/2022, Chấp nhận đăng 21/7/2022*

## Tóm tắt

Trong bài toán thiết kế mỏi, hệ số tập trung ứng suất (SCFs) thường được xác định bằng các công thức thực nghiệm với độ chính xác không ổn định và phụ thuộc vào các tham số về hình dạng kết cấu cũng như điều kiện tải trọng. Hiện nay, ngoài các công thức thực nghiệm thì một phương pháp khác có độ tin cậy và được áp dụng cho rất nhiều lĩnh vực là phương pháp mô hình số. Bài báo trình bày một nghiên cứu sử dụng mô hình số kết hợp với các công thức thực nghiệm được chỉ dẫn trong tiêu chuẩn DNV RP-C203 và DNV OS-J101 để xác định hệ số SCFs cho kết cấu phong điện dạng một trụ đỡ. Kết quả nghiên cứu cho thấy bằng một kỹ thuật xử lý lưới chia phù hợp trên mô hình sẽ đánh giá được vùng tập trung ứng suất cũng như đem lại độ tin cậy cho giá trị SCFs.

*Từ khóa:* hệ số tập trung ứng suất; tua-bin gió; kết cấu một trụ đỡ; mô hình số; nút liên kết; thiết kế mỏi.

DETERMINATION OF THE STRESS CONCENTRATION FACTORS FOR THE STRUCTURE OF OFF-SHORE WIND TURBINE WITH MONOPILE FOUNDATION BY USING NUMERICAL MODEL

## Abstract

In fatigue design, the stress concentration factor (SCFs) are usually determined by empirical formulas with unstable accuracy, depending on the shape parameters of the structure and the loading conditions. Currently, in addition to using empirical formulas, a reliable method for many fields is the numerical model method. This paper presents a study using the numerical model and the empirical formulas indicated in DNV RP-C203 and DNV OS-J101 standards to determine the SCFs for the offshore wind turbine with a monopile foundation. The research results show that with a suitable meshing technique on the model, the stress concentration area can be assessed as well as provide reliability for the SCFs value.

*Keywords:* SCFs; wind turbine; monopile; numerical simulation; fatigue design.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2023-17\(1V\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2023-17(1V)-12) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Công trình phong điện dạng một trụ đỡ được cấu tạo từ các ống thép đường kính lớn, ghép với nhau bằng liên kết hàn. Đây là loại kết cấu phổ biến nhất trong các công trình phong điện, gồm một tháp trụ đỡ rôto được kết nối với phần cọc bởi một đoạn chuyển tiếp. Dưới tác dụng của tải trọng gió lên các cánh quạt và tải trọng sóng lên trụ đỡ có thể dẫn đến phá hủy mỏi tại các vị trí mối hàn hay các vị trí nút ống có tiết diện thay đổi. Theo [1] trong số các tải trọng tác dụng, có 4 loại khác nhau ảnh hưởng đến tuổi thọ mỏi của kết cấu. Tải đầu tiên là do gió nhiễu loạn qua rôto khi quay dẫn đến

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [longdt@huce.edu.vn](mailto:longdt@huce.edu.vn) (Long, Đ. T.)

chuyển động ngang. Thứ hai, tải trọng sóng tác dụng lên phần cọc và đoạn chuyển tiếp. Tải thứ ba và thứ tư lần lượt là tải do rung động của rôto và trụ tháp. Trong phân tích môi cho các công trình phong điện, hầu hết các hư hỏng xảy ra là do quá trình rôto vận hành và tải trọng sóng. Phương pháp tính toán môi thông dụng hiện nay, được quy định và chỉ dẫn trong các tiêu chuẩn thiết kế ví dụ như DNV RP C203, là phương pháp theo quy tắc Palmgren-Miner. Ở phương pháp này, trong phạm vi phân bố ứng suất dài hạn, các dải ứng suất được nhân thêm với hệ số tập trung ứng suất SCFs – hệ số phụ thuộc vào hình dạng của kết cấu, điều kiện chất tải và thường được xác định theo các phương trình tham số. Sự phân bố ứng suất bên trong các nút rất phức tạp ngay cả với một nút ống đơn giản, cho nên việc tính toán chính xác hệ số SCFs là không dễ dàng [2].

Trên thế giới, việc nghiên cứu xác định chính xác hệ số SCFs cho các dạng công trình ngoài khơi là một trong những nội dung luôn được quan tâm. Có thể kể đến một số nghiên cứu tiêu biểu như trong [3] đã liệt kê. Athanasios Kolios và cs., năm 2019, đã trình bày một nghiên cứu xác định hệ số SCFs trên một môi hàn của kết cấu phong điện một trụ đỡ bằng phương pháp thực nghiệm và phương pháp số. Wu và Chen, năm 2017, đã so sánh tuổi thọ môi dựa trên hai phương pháp là cơ học phá hủy và đường cong môi S-N cho một kết cấu trụ nổi, đánh giá các tác động từ sự thay đổi độ sâu vết nứt ban đầu, độ sâu vết nứt cục bộ và hệ số SCFs. Ahmadi và Zavvar, năm 2016, đã đánh giá ảnh hưởng của đa mặt phẳng trên hệ số SCFs ở một nút ống dạng KT chịu uốn trong và ngoài mặt phẳng qua phân tích ứng suất trên mô hình phần tử hữu hạn. Maheswaran và Siriwardane, năm 2016, đã trình bày một nghiên cứu so sánh tuổi thọ môi khi sử dụng hệ số SCFs từ tiêu chuẩn DNV với sử dụng mô hình phần tử hữu hạn. Yang, năm 2015 đã nghiên cứu hệ số SCFs cho nút ống chữ N lệch tâm lớn chịu tải trọng nén dọc trục trên thanh nhánh dọc thông qua sự kết hợp giữa các thí nghiệm và mô phỏng trên phần mềm phần tử hữu hạn. Li và cs., năm 2014 đã trình bày một nghiên cứu số về môi hàn chu vi quanh cọc ống thép đưa ra các lý thuyết và xác định hệ số SCFs tại các mảnh ống dưới lực kéo dọc trục hoặc mô men uốn trong mặt phẳng. Cao và cs., năm 2013 đã trình bày phương pháp phần tử hữu hạn để nghiên cứu hệ số tập trung ứng suất cho nút chữ K với ứng suất dư do hàn.

Ở nước ta, những năm gần đây, các dự án năng lượng gió có quy mô lớn được triển khai xây dựng, bắt đầu từ khu vực ven biển và tiến dần ra các vùng nước sâu hơn. Cùng với xu thế đó, dạng kết cấu một trụ đơn sẽ là một trong các giải pháp xây dựng được áp dụng rộng rãi. Trong một trang trại gió, khi mà các chi tiết kết cấu hoặc các nút giống nhau được lặp lại nhiều lần trên các trụ đỡ tua-bin và được yêu cầu tối ưu hóa chi phí xây dựng thì việc xác định SCFs chính xác sẽ là cần thiết. Theo hiểu biết của tác giả, một phương pháp được khuyến cáo để tính toán chính xác hơn hệ số SCFs là phương pháp mô hình số (phương pháp phần tử hữu hạn). Vì vậy, mục tiêu của nghiên cứu sẽ sử dụng phương pháp mô hình số để mô phỏng một kết cấu công trình phong điện dạng trụ đơn với chi tiết liên kết hàn đối đỉnh, chịu tải trọng ngang và tải trọng đứng. Kết hợp sử dụng các công thức thực nghiệm tương ứng nhằm đánh giá mức độ sai số và khả năng áp dụng mô hình số vào công trình thực tế.

## 2. Các phương pháp xác định hệ số tập trung ứng suất

### 2.1. Sử dụng các công thức thực nghiệm

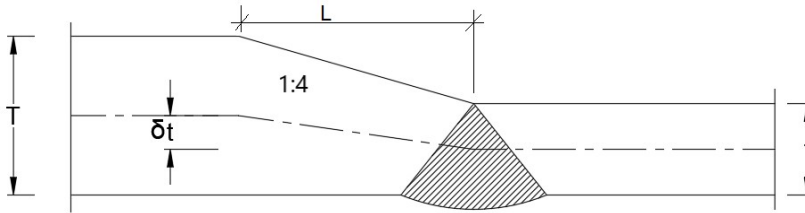
Hiện nay có nhiều công thức thực nghiệm được đưa ra để xác định hệ số SCFs tại điểm nóng của nút. Trong số đó có thể kể tới 3 nhóm được sử dụng rộng rãi trong các tiêu chuẩn quy phạm thiết kế là nhóm công thức xác định SCFs của Kuang, nhóm công thức xác định SCFs của Liloyd và nhóm công thức theo quy phạm DnV. Các công thức này được sử dụng cho các dạng liên kết nút ống chữ T, Y, K với các điều kiện tải trọng nén dọc trục, uốn trong mặt phẳng, uốn ngoài mặt phẳng. Đối với dạng nút liên kết hàn ống đối đỉnh như trên công trình phong điện một trụ đỡ (Hình 1), có một số công thức thực nghiệm được áp dụng nêu dưới đây.



Hình 1. Mối hàn đối đỉnh trên công trình phong điện [4]

Theo tiêu chuẩn DNV RP-C203 [5] và OS J101 [6], hệ số SCFs đối với liên kết hàn đối đỉnh cho tiết diện ống có bán kính lớn với điều kiện ứng suất dọc trục được xác định theo công thức (1)

$$SCF = 1 + \frac{6(\delta_t + \delta_m - \delta_o)}{t \left[ 1 + \frac{T^{1,5}}{t^{1,5}} \right]} \quad (1)$$



Hình 2. Mô tả liên kết hàn đối đỉnh trên tiết diện ống thay đổi chiều dày [5]

Trường hợp liên kết hàn có thay đổi chiều dày ở mặt bên trong ống và mối hàn chỉ có mặt bên ngoài (Hình 2), hệ số SCFs cho gốc mối hàn mặt bên trong được xác định theo công thức (2), còn hệ số SCFs cho mũi mối hàn mặt bên ngoài xác định theo công thức (3):

$$SCF = 1 + \frac{6(\delta_t + \delta_m - \delta_o)}{t} \frac{1}{1 + \left( \frac{T}{t} \right)^\beta} e^{-\alpha} \quad (2)$$

$$SCF = 1 - \frac{6(\delta_t - \delta_m)}{t} \frac{1}{1 + \left( \frac{T}{t} \right)^\beta} e^{-\alpha} \quad (3)$$

trong đó  $\alpha = \frac{1,82L}{\sqrt{Dt}} \frac{1}{1 + \left(\frac{T}{t}\right)^\beta}$ ,  $\beta = 1,5 - \frac{1}{\log\left(\frac{D}{t}\right)} + \frac{3}{\left[\log\left(\frac{D}{t}\right)\right]^2}$ ,  $\delta_o = 0,1t$ ,  $\delta_m$  là độ lệch tâm trục giữa hai tiết diện ống,  $D$  là đường kính ống,  $L$  là chiều dài đoạn chuyển tiếp.

Theo [7], trong trường hợp tổ hợp tải trọng dọc trục ( $N$ ) và momen uốn đồng thời ( $M$ ), hệ số SCFs được xác định theo công thức (4) như sau:

$$SCF = 1 + \frac{3\delta_m}{t} \left( \frac{1}{1 + \sigma_0/\sigma_a} + \frac{1 - \tau}{1 + \sigma_a/\sigma_0} \right) \quad (4)$$

trong đó  $\sigma_a$  là ứng suất do tải trọng dọc trục,  $\sigma_0$  là ứng suất do momen uốn,  $\tau = t/D$ .

Có thể thấy ở các công thức số (1), (2), (3) không kể đến được điều kiện tải trọng tác dụng, trong khi công thức số (4) không kể đến việc thay đổi chiều dày. Nghiên cứu đề xuất sử dụng công thức kết hợp sau:

$$SCF = 1 + \frac{6(\delta_t + \delta_m - \delta_o)}{t} \frac{1}{1 + \left(\frac{T}{t}\right)^\beta} e^{-\alpha} \left( \frac{1}{1 + \sigma_0/\sigma_a} + \frac{1 - \tau}{1 + \sigma_a/\sigma_0} \right) \quad (5)$$

## 2.2. Phương pháp sử dụng mô hình thực nghiệm

Hệ số SCFs có thể được xác định trên các mô hình thực nghiệm với các thiết bị đo biến dạng và quy đổi thành các giá trị ứng suất tương ứng. Các phương pháp đo biến dạng như: phân tích quang đàn hồi trên mô hình chất dẻo ở tỷ lệ nhỏ hoặc dùng thiết bị đo biến dạng trên mô hình. So với các phương pháp khác thì phương pháp thực nghiệm có thể đưa ra kết quả có độ chính xác hơn bởi có thể xác định được các điểm nóng và giá trị ứng suất tại các điểm đo trên một mô hình có tỷ lệ tương ứng với kích thước thật. Tuy nhiên, phương pháp thực nghiệm có thể nói là khó và không phải lúc nào cũng có thể tạo ra được một kết quả có ý nghĩa. Ngoài ra thì phương pháp này thường đắt đỏ, tốn thời gian và công sức, nhất là với các hình dạng mối hàn phức tạp. Việc xây dựng được các loại tải trọng tác dụng lên mô hình thực nghiệm cũng là một vấn đề khi cấu kiện chịu các dạng tải trọng khác nhau và gây ảnh hưởng trực tiếp lên ứng suất và hệ số SCFs. Một nguyên nhân khác có thể dẫn đến sai số kết quả là cách bố trí các điểm đo biến dạng cũng như kích thước của các cảm biến chưa đo được toàn bộ các điểm trên vùng tập trung ứng suất.

## 2.3. Phương pháp sử dụng mô hình số

Phương pháp mô hình số cho phép xác định hệ số SCFs tại một nút có hình dạng bất kỳ bằng cách phân tích biến dạng, ứng suất tại điểm nóng của nút. Yếu tố quan trọng cần đảm bảo là việc chia lưới thích hợp mới đem lại kết quả có chính xác cao. Việc chia lưới mịn như nào là đủ phụ thuộc vào phân tích kết quả, công cụ xử lý kết quả và kinh nghiệm của người sử dụng. Một vài kết quả nghiên cứu tiêu biểu sử dụng mô hình số để xác định hệ số SCFs được liệt kê dưới đây.

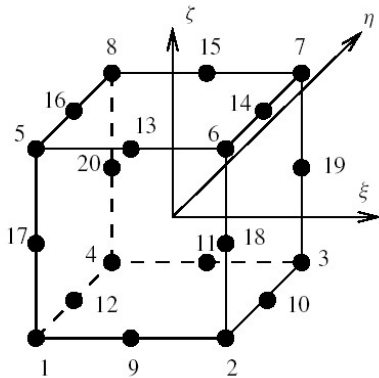
Garbatov và cs. [8] dựa trên mô hình số để phân tích hệ số tập trung ứng suất của một sàn boong tàu có nhiều loại khuyết tật nhằm đánh giá sự phân phối ứng suất tại điểm nóng (Hình 3(b)) và có nêu ra một số kinh nghiệm trong xây dựng mô hình số như sau:

- Ứng suất và sự phân phối ứng suất chịu ảnh hưởng của mật độ chia lưới và thuộc tính của phần tử, do đó cần tuân theo một số nguyên tắc trong lựa chọn loại phần tử, kích thước lưới và đánh giá ứng suất tại các điểm ngoại suy.

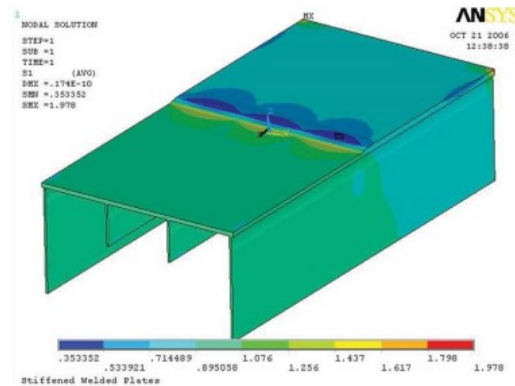
- Loại phần tử bậc hai khối lập phương được xác định bởi 20 nút với 3 bậc tự do trên mỗi nút, có thể mô tả được các hình dạng bất thường mà không mất đi nhiều độ chính xác, và rất phù hợp để mô tả các bề mặt cong (Hình 3(a)). Tuy nhiên, khi sử dụng phần tử 20 nút thì ứng suất thu được tại các

điểm giữa của các phần tử đầu tiên thường hơi phóng đại do điểm kỳ dị ở chân mỗi hàn và được điều chỉnh bằng cách nào đó bằng phép ngoại suy tuyến tính để xác định ứng suất điểm nóng.

- Sử dụng kỹ thuật chia lưới phần tử hữu hạn tương đối thô cho các khu vực cách xa điểm nóng và một lưới mịn có kích thước  $t \times t$  cho vùng xung quanh các điểm nóng. Các điểm nóng quan trọng dự kiến sẽ xuất hiện trên mặt bên của tấm mỏng hơn, nơi có chân mỗi hàn nằm trên bề mặt tấm.



(a) Phần tử bậc 2 khối lập phương



(b) Mô hình phân tích ứng suất của Garbatov

Hình 3. Phần tử khối 20 nút được áp dụng trong phân tích ứng suất trên một chi tiết có mối hàn tại bề mặt [8]

Trong nghiên cứu phân tích phá hủy mỏi cho các mối hàn trên kết cấu phong điện dạng một trụ đỡ của Biswal và cs. [9, 10] có một số đề cập như sau:

- Một mô hình phần tử hữu hạn (FE) ba chiều được sử dụng để xác định ứng suất cực đại trên kết cấu phong điện dạng một trụ đỡ. Khoảng cách giữa hai mối hàn theo chu vi liên tiếp trong kết cấu một trụ đỡ được giả định là 6,5 m, và mối hàn đầu tiên nằm trên 4 m so với đáy biển. Trong số các mối hàn dọc theo chiều dài ống thì mối hàn đầu tiên sẽ chịu mômen uốn lớn nhất.

- Do sự khác biệt lớn giữa các kích thước của tua-bin và các mối hàn theo chu vi nên việc sử dụng một mô hình FE cục bộ trên một tọa độ tổng thể sẽ là phù hợp. Mô hình FE cần được chia lưới với các phần tử có kích thước thay đổi từ 0,5 đến 0,1 m, trong đó lưới được tinh chỉnh ở các vùng gần mối hàn hơn để giữ tỷ lệ của phần tử trong phạm vi 0,1. Kích thước phần tử trong mô hình cục bộ được giảm thêm từ 3 đến 20 mm.

Nghiên cứu gần đây của Atteya và cs. [11] đã thực hiện mô hình thực nghiệm một nút ống dạng chữ T chịu lực nén dọc trục để đo và xác định hệ số SCFs, sau đó so sánh với kết quả có được từ mô hình số FEA và từ các công thức kinh nghiệm. Kết quả cho thấy:

- SCFs được xác định bằng cách sử dụng phân tích phần tử hữu hạn có thể thay đổi tùy thuộc vào kích thước việc chia lưới, sự lựa chọn loại phần tử (tuyến tính hoặc bậc hai), phương pháp xác định SCFs (lấy trực tiếp hoặc ngoại suy tuyến tính) và hình dạng mối hàn được mô hình hóa. Nói chung, sẽ thu được hệ số SCFs có giá trị cao hơn khi chia lưới mịn hơn và kết hợp sử dụng các phần tử bậc hai, phép ngoại suy tuyến tính cùng với một mô hình mối hàn lớn hơn.

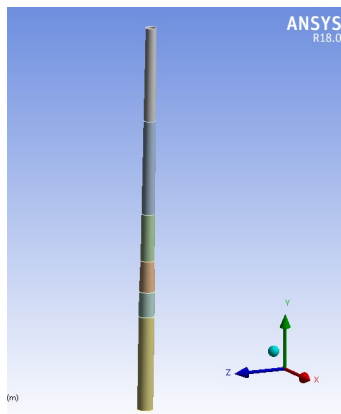
- SCFs được xác định bằng thực nghiệm cũng cho thấy xuất hiện nhiều giá trị biến đổi gây ra bởi các vị trí đo biến dạng và các yếu tố không đảm bảo khác. So sánh SCFs thực nghiệm với SCFs từ phân tích phần tử hữu hạn cho thấy sự tương đồng.

- Khi cần minh chứng các chênh lệch nhỏ trong tính toán mỏi, việc phân tích trên mô hình số là một công cụ hỗ trợ hiệu quả.

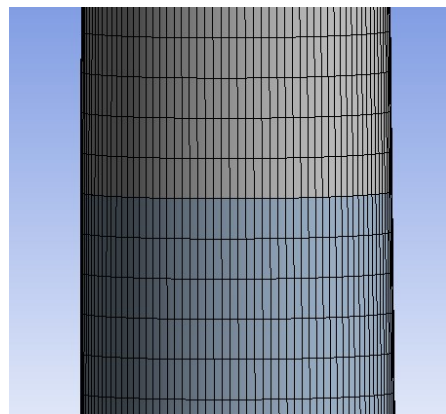
### 3. Xây dựng mô hình số xác định hệ số tập trung ứng suất tại liên kết mối hàn của công trình phong điện dạng một trụ đỡ

#### 3.1. Mô hình tổng thể và mô hình cục bộ

Việc mô tả chi tiết hình dạng kích thước các mối hàn trên một mô hình kết cấu tổng thể khiến cho việc phân tích trở lên nặng nề, mất nhiều thời gian tính toán hơn và cũng có thể vượt quá khả năng của máy tính. Dựa theo các kinh nghiệm của Garbatov và cs. [8] và Biswal và cs. [9, 10], nghiên cứu áp dụng loại phần tử khối lập phương 20 nút để xây dựng một mô hình tổng thể (Hình 4) kết hợp sử dụng thêm một mô hình cục bộ (Hình 5) trên phần mềm Ansys. Mô hình tổng thể bao gồm các đoạn ống của phần cọc, phần trụ tháp và phần chuyển tiếp. Các điều kiện tải trọng như tải trọng gió, tải trọng sóng, tải trọng tua-bin, tải trọng cánh quạt được quy đổi thành lực tập trung và gắn tại các điểm tham chiếu tương ứng. Sau khi xác định được vùng tập trung ứng suất trên mô hình tổng thể, tiến hành trích xuất ra một mô hình cục bộ tại vị trí tập trung ứng suất này. Một liên kết mối hàn đối đỉnh chữ V được đưa thêm vào trên mô hình cục bộ. Kích thước phần tử trong mô hình cục bộ được chia lưới mịn hơn so với trên mô hình tổng thể. Các mặt tiếp xúc 1 và 2 trên mô hình cục bộ được gán điều kiện biên ứng với kết quả phân tích nội lực, chuyển vị từ mô hình tổng thể như trên Hình 6.

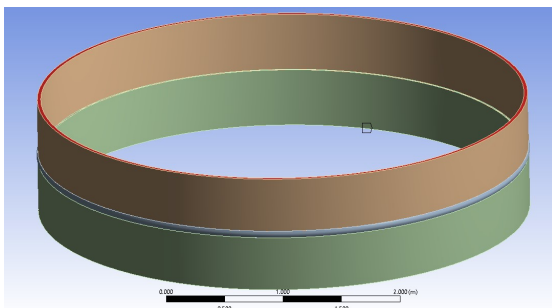


(a) Mô hình tổng thể

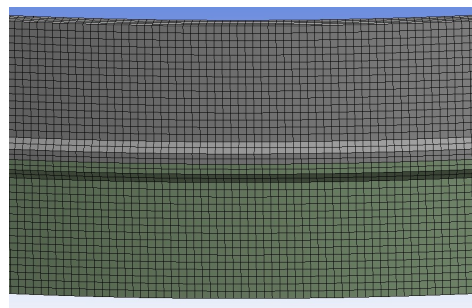


(b) Chia lưới trên mô hình tổng thể

Hình 4. Mô hình tổng thể với lưới chia từ 1 m đến 0,05 m



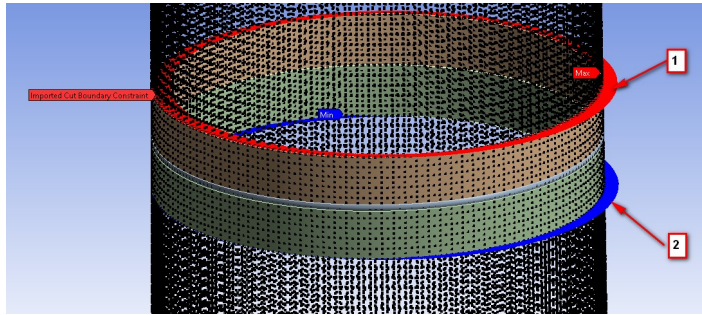
(a) Mô hình cục bộ có thể hiện mối hàn



(b) Chia lưới trên mô hình cục bộ

Hình 5. Mô hình cục bộ với lưới chia từ 0,01 m đến 0,002 m

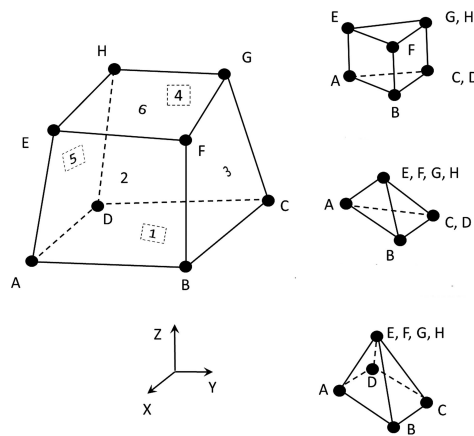




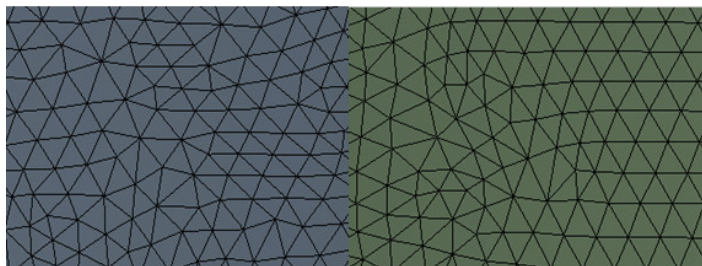
Hình 6. Điều kiện biên được gán tại các mặt tiếp xúc 1, 2 trên mô hình cục bộ

### 3.2. Phân tử bậc hai khối lập phương

Phần tử bậc hai khối lập phương được xác định bởi 20 nút với ba bậc tự do trên mỗi nút nên phần tử có thể biến đổi hình dạng theo bất kỳ hướng không gian nào mà không làm mất đi nhiều độ chính xác. Nhờ đó phù hợp để mô tả các dạng đường cong có lưới chia bất quy tắc như trên bề mặt ống cong tròn với hình dạng mỗi hàn bất kỳ. Khi sử dụng loại phần tử khối bậc 1 dạng 4, 5, 6 hoặc 8 nút (Hình 7) thường dẫn đến khó kiểm soát được kích thước lưới chia, dẫn đến sai số trong phân tích ứng suất (Hình 8).



Hình 7. Các dạng phần tử khối bậc 1 loại 4, 5, 6 và 8 nút



Hình 8. Lưới chia bị mất kiểm soát khi sử dụng loại phần tử khối dạng 6 nút

### 3.3. Chia lưới phần tử

Trong các phần mềm số như Ansys, việc chia lưới thô hay mịn sẽ ảnh hưởng đến kết quả phân tích ứng suất. Thông thường với lưới chia mịn kết quả ứng suất có giá trị chính xác hơn so với lưới chia thô. Tuy nhiên việc chia lưới mịn đến kích thước bao nhiêu là thích hợp thì cần được xem xét bởi lưới chia càng mịn sẽ dẫn đến số lượng phần tử tăng lên làm cho thời gian giải và dung lượng bộ nhớ cần nhiều hơn. Để xác định được kích thước chia lưới phù hợp, tiến hành chia nhỏ phần tử trên mô hình tổng thể và cục bộ theo các kích thước giảm dần theo chu vi và chiều dài ống. Sau đó so sánh các giá trị ứng suất có được ở mỗi bước chia. Khi mà giá trị ứng suất ở bước chia sau gần như không đổi hoặc chênh lệch không đáng kể so với các bước chia trước thì lúc đó kích thước lưới chia được coi là phù hợp với mô hình. Điều đó tương ứng với kết quả phân tích ứng suất đạt được sự hội tụ. Áp dụng kỹ thuật chia lưới ở trên, nghiên cứu tiến hành chia lưới trên mô hình tổng thể theo từng bước với kích thước nhỏ dần từ 1m đến 0,05 m. Kích thước phần tử trong mô hình cục bộ sẽ tiếp tục được chia nhỏ hơn từ 0,05 m đến 0,002 m.

### 3.4. Xác định hệ số tập trung ứng suất

Kết quả phân tích trên mô hình cục bộ cho phép xác định được vùng tập trung ứng suất (điểm nóng) và giá trị ứng suất cực đại tại một điểm nút nào đó. Tuy nhiên nếu lấy giá trị ứng suất cực đại để xác định hệ số SCFs thì không chính xác vì có thể đó là ứng suất kỳ dị tại một điểm nút và không đại diện được cho toàn bộ vùng tập trung ứng suất. Theo phụ lục D của tiêu chuẩn DNV-OS-101 [6], giá trị ứng suất thích hợp dùng để tính toán hệ số SCFs được ngoại suy tuyến tính từ các ứng suất tại các điểm cách vị trí điểm góc và mũi mỗi hàn một khoảng lần lượt là  $1,0T$  ( $1,5T$ ) và  $0,4T$  ( $0,5T$ ) với  $T$  là chiều dày đoạn ống có tiết diện nhỏ hơn. Các giá trị ngoại suy được đề xuất theo IIW 94 (Viện kỹ thuật hàn quốc tế) trong khi các giá trị trong ngoặc được đề xuất bởi NORSOK (tiêu chuẩn Na Uy) như trên Hình 9. Nghiên cứu thực hiện lấy các giá trị ứng suất theo cả hai đề xuất này. Sử dụng phần mềm thiết kế kết cấu tổng thể (ví dụ như SAP2000) để tính toán ứng suất danh nghĩa tại mặt cắt tiết diện ống. Hệ số tập trung ứng suất SCFs được xác định theo công thức:

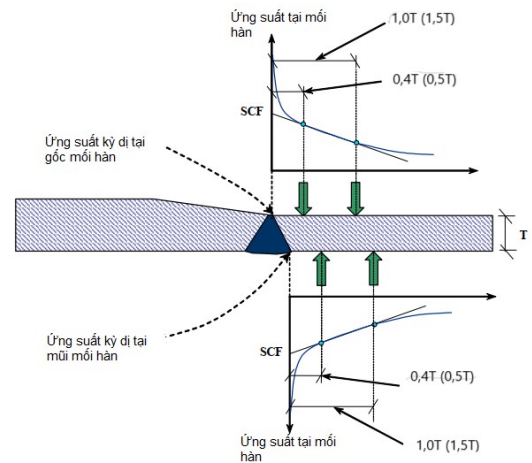
$$SCFs = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (6)$$

trong đó  $\sigma_n$  lấy bằng ứng suất danh nghĩa;  $\sigma_{\max}$  lấy bằng giá trị ứng suất xác định trên mô hình cục bộ.

## 4. Mô hình nghiên cứu

### 4.1. Thông số giả thiết

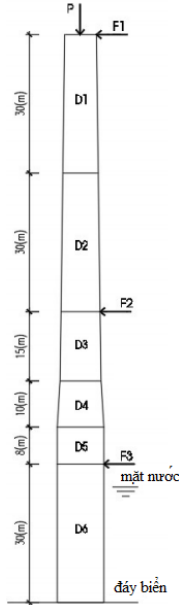
Dựa theo kích thước của một công trình phong điện đã được xây dựng ở độ sâu nước khoảng 25 m, lựa chọn các thông số đầu vào như trên Hình 10 và Bảng 1, vật liệu chế tạo là thép mác S355,  $E = 210$  GPa, hệ số Poisson = 0,3. Giả thiết bỏ qua mỗi nối dọc thân của ống thép và các liên kết



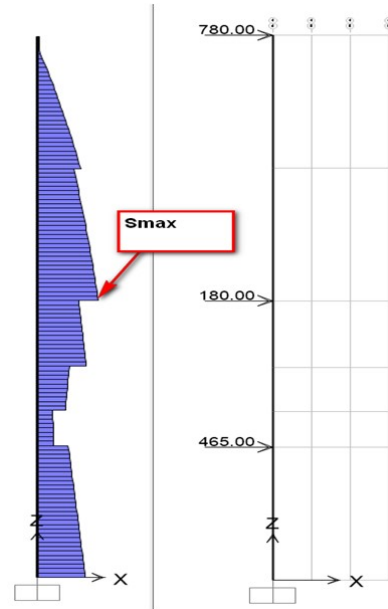
Hình 9. Xác định giá trị ứng suất bằng phép ngoại suy tuyến tính [6]



bu-long, đoạn cấu tạo chuyển tiếp được mô tả đơn giản hơn bằng một cấu kiện ống thép có chiều dày tương đương. Tổng tải trọng ngang do gió và sóng lên phần trụ tháp và cọc lấy lần lượt như trong Bảng 2. Vị trí xuất hiện ứng suất cực đại trên mô hình tổng thể được giả thiết có mối liên kết hàn đối đỉnh chữ V dạng đơn chạy xung quanh chu vi ống.



Hình 10. Kích thước hình học và sơ đồ tải trọng lên trụ tháp và cọc (D1, D2, D3: đoạn trụ tháp; D4, D5: đoạn chuyển tiếp; đoạn D6: cọc)



Hình 11. Kết quả tính toán ứng suất trên phần mềm phân tích kết cấu

Bảng 1. Các thông số hình học ( $D$ : đường kính ngoài,  $t$ : chiều dày ống)

Đoạn ống	Thông số hình học
D1	$D$ từ 3,4 m đến 3,8 m, $t = 25$ mm
D2	$D$ từ 3,8 m đến 4,2 m, $t = 30$ mm
D3	$D$ từ 4,2 m đến 4,4 m, $t = 45$ mm
D4	$D$ từ 4,4 m đến 5,0 m, $t = 70$ mm
D5	$D = 5,0$ m, $t = 135$ mm
D6	$D = 5,0$ m, $t = 70$ mm

Bảng 2. Trường hợp tải trọng lên phần trụ tháp và cọc

Tải trọng		TH1	TH2	TH3	TH4	TH5
Tổng trọng lượng phần rotor và cánh quạt, P	kN	1924	1924	1924	640	-
Tổng tải trọng ngang lên các cánh quạt, F1	kN	780	390	260	780	780
Tổng tải trọng ngang lên phần trụ tháp, F2	kN	180	90	60	180	180
Tổng tải trọng ngang lên phần cọc, F3	kN	465	230	150	465	465

#### 4.2. Xác định vị trí có ứng suất cực đại

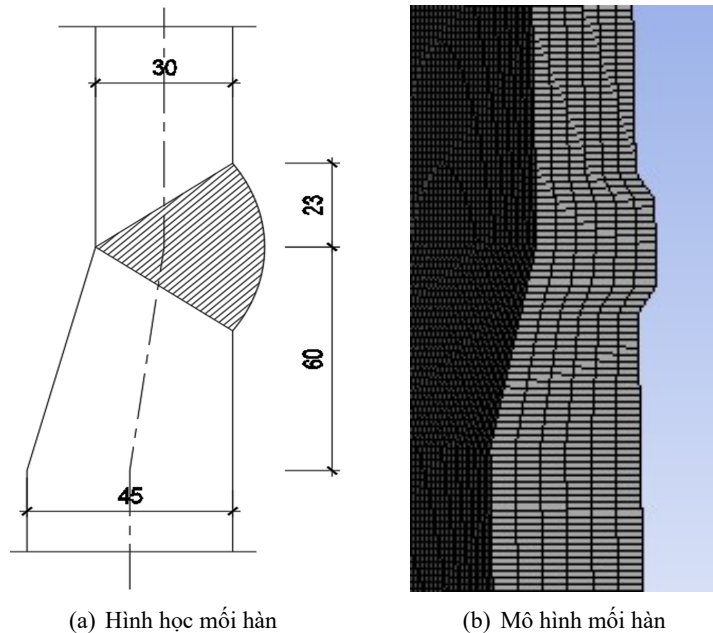
Sử dụng phần mềm phân tích kết cấu SAP2000 để xác định vị trí có ứng suất cực đại với sơ đồ tính là một thanh trụ thép với ngàm giả định tại đáy biển, tải trọng được gán tại các vị trí theo Hình 10. Kết quả ứng suất cho thấy giá trị lớn nhất xảy ra tại vị trí liên kết giữa phân đoạn D2 và D3, (trên Hình 11), đây là vị trí có chiều dày ống thay đổi. Ứng suất lớn nhất này ( $S_{max}$ ) được coi là ứng suất danh nghĩa (Bảng 3).

Bảng 3. Kết quả tính toán ứng suất danh nghĩa cho 5 trường hợp tải trọng

Kết quả tính toán		TH1	TH2	TH3	TH4	TH5
Ứng suất danh nghĩa	MPa	123,90	66,13	47,09	120,52	118,96

#### 4.3. Xây dựng mô hình cục bộ

Sau khi xác định được vị trí tập trung ứng suất, coi tại đây có mối liên kết hàn quanh chu vi ống với kích thước hình học dạng chữ V như trên Hình 12. Tiến hành xây dựng một mô hình cục bộ có hai đoạn ống được liên kết bởi mối hàn nằm mặt bên ngoài chạy quanh chu vi ống. Việc sử dụng mô hình cục bộ với lưới chia mịn hơn sẽ giảm bớt được thời gian chạy phân tích trên mô hình tổng thể. Kết hợp sử dụng thêm một mô hình cục bộ không có mối hàn để kiểm tra ảnh hưởng của việc mô tả hình học mối hàn có gây ảnh hưởng đến kết quả phân tích ứng suất. Các kích thước lưới chia được lấy lần lượt như Bảng 4.



Hình 12. Kích thước hình học mối hàn và mô hình trên phần mềm Ansys

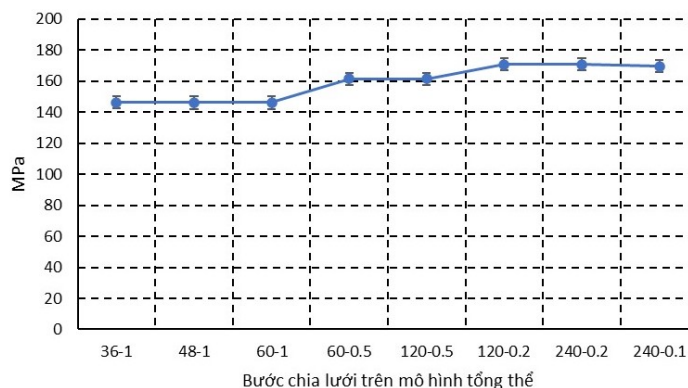
Bảng 4. Kích thước chia lưới và kết quả phân tích ứng suất trên mô hình tổng thể

Kích thước lưới	Số phần tử chia theo chu vi ống	Kích thước phần tử theo chiều dài ống	Ứng suất lớn nhất (MPa)	Chênh lệch (%)
36-1	36	1 (m)	146,35	-
48-1	48	1 (m)	146,23	-0,08
60-1	60	1 (m)	146,17	-0,04
60-0,5	60	0,5 (m)	161,55	10,52
120-0,5	120	0,5 (m)	161,45	-0,06
120-0,2	120	0,2 (m)	170,82	5,80
120-0,1	120	0,1 (m)	170,90	-0,01
120-0,05	120	0,05 (m)	169,70	-0,64

(tỷ lệ chênh lệch được lấy so với giá trị liên trước của mỗi bước chia)

#### 4.4. Kết quả phân tích ứng suất trên mô hình tổng thể

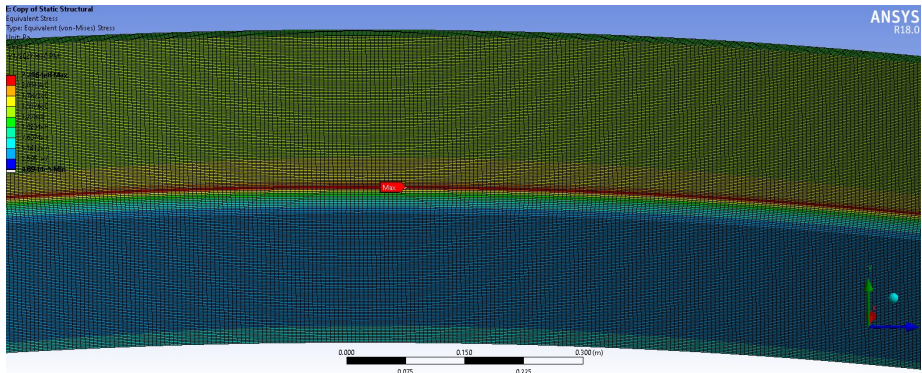
Trên đồ thị Hình 13 cho thấy kết quả ứng suất lớn nhất sau mỗi lần chia nhỏ phần tử theo chu vi ống và theo chiều dài ống như sau: Tại các bước chia 36-1, 48-1, 60-1 đồ thị gần như nằm ngang, giá trị ứng suất không thay đổi lớn. Ở bước chia 60-0,5 giá trị ứng suất tăng đột biến lên 10,52% và tiếp tục đi ngang với bước chia 120-0,5. Tiếp tục chia lưới 120-0,2, ứng suất tăng 5,8% và có xu hướng giảm dần tại các bước chia tiếp theo. Từ kết quả đồ thị cho thấy giá trị ứng suất tăng lên tại các bước chia từ 60 lên 120 và từ 0,5 m xuống 0,2 m, tuy nhiên sau mỗi bước chia nhỏ hơn, giá trị ứng suất có xu hướng hội tụ dần, và tới một bước chia đủ nhỏ thì đồ thị sẽ đi ngang, điều đó có nghĩa rằng việc chia lưới đã không còn ảnh hưởng đến kết quả phân tích và mô hình đảm bảo được tính chính xác. Với giới hạn khả năng của máy tính, nên nghiên cứu không tiếp tục phân tích kết quả ở bước chia nhỏ hơn 120-0,05, và lấy giá trị ứng suất tại bước chia 120-0,05 với tỷ lệ chênh lệch (-)0,64%.



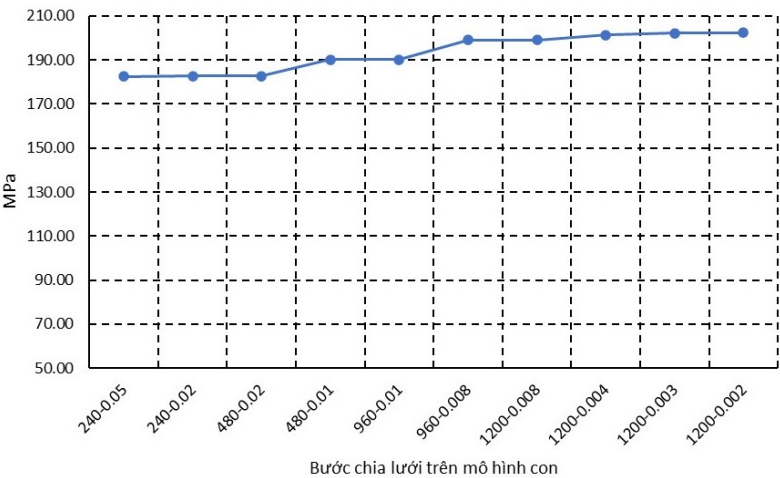
Hình 13. Thay đổi ứng suất theo kích thước chia lưới trên mô hình tổng thể

#### 4.5. Kết quả phân tích ứng suất trên mô hình cục bộ và tính toán hệ số SCFs

Tiếp tục phân tích ứng suất trên mô hình cục bộ có mô tả hình dạng mối hàn với các bước chia lưới lần lượt từ 0,05m xuống 0,002 m (Hình 14). Kết quả ứng suất cho thấy sự hội tụ bắt đầu đạt được ở kích thước lưới chia 1200-0,004 (Hình 15 và Bảng 5).



Hình 14. Kết quả phân tích ứng suất (von-Mises) trên mô hình cục bộ – vị trí tập trung ứng suất nằm ở mặt trong của ống tại điểm gốc mỗi hàn



Hình 15. Thay đổi ứng suất theo kích thước chia lưới trên mô hình cục bộ

Bảng 5. Kết quả ứng suất lớn nhất trên mô hình cục bộ tại các bước chia lưới

Kích thước lưới	Số phần tử chia theo chu vi ống	Kích thước phần tử theo chiều dài ống	Ứng suất lớn nhất (MPa)
240 – 0,05	240	0,05 (m)	182,58
240 – 0,02	240	0,02 (m)	182,75
480 – 0,02	480	0,02 (m)	182,77
480 – 0,01	480	0,01 (m)	190,20
960 – 0,01	960	0,01 (m)	190,21
960 – 0,008	960	0,008 (m)	199,12
1200 – 0,008	1200	0,008 (m)	199,13
1200 – 0,004	1200	0,004 (m)	201,37
1200 – 0,003	1200	0,003 (m)	202,23
1200 – 0,002	1200	0,002 (m)	202,34

Để đánh giá ảnh hưởng của điều kiện tải trọng đến hệ số tập trung ứng suất, tiến hành thay đổi tải trọng theo 5 trường hợp tải nêu trong Bảng 2. Kết quả hệ số SCFs tương ứng được ghi trong Bảng 6.

Bảng 6. Kết quả tính toán SCFs bằng mô hình số và công thức thực nghiệm

SCFs	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5
Mô hình số - IIW 94	1,3994	1,3545	1,3226	1,3944	1,3930
Mô hình số - NORSOK	1,3597	1,3249	1,2880	1,3613	1,3600
Công thức số (1)	1,5287	1,5287	1,5287	1,5287	1,5287
Công thức số (2)	1,4539	1,4539	1,4539	1,4539	1,4539
Công thức số (4)	1,2980	1,2981	1,2983	1,2979	1,2979
Công thức số (5)	1,4509	1,4511	1,4513	1,4508	1,4507

Trong thực tế khi chế tạo, nhiều trường hợp đoạn chuyển tiếp L không đạt được độ nghiêng có tỷ lệ 1:4 vì vậy nghiên cứu sử dụng thêm hai mô hình có đoạn chuyển tiếp với tỷ lệ 1:2 và 1:6 để đánh giá thêm ảnh hưởng này lên hệ số SCFs. Kết quả được đưa ra trong Bảng 7.

Bảng 7. Kết quả tính toán SCFs với các đoạn chuyển tiếp có độ nghiêng khác nhau

Độ nghiêng đoạn chuyển tiếp	SCFs
1:2	1,4688
1:4	1,3994
1:6	1,3978

Từ Bảng 6 và 7 cho thấy như sau:

- Hệ số SCFs xác định theo phương pháp mô hình số không chênh lệch đáng kể so với các công thức thực nghiệm tương ứng;
- Giá trị SCFs tăng lên hoặc giảm xuống tùy theo độ lớn của tải trọng ngang. Đối với các công trình phong điện ngoài khơi, các tải trọng ngang gồm sóng và gió chiếm chủ đạo vì vậy đây là một yếu tố ảnh hưởng trực tiếp khi tính toán hệ số SCFs;
- Các công thức thực nghiệm chưa kể đến được một cách rõ ràng ảnh hưởng của điều kiện tải trọng. Kết quả từ công thức số (4), (5) cho thấy sự thay đổi không đáng kể giữa các trường hợp tải trọng khác nhau. Nếu xét thiên về an toàn, các công thức số (1), (2) có ưu thế do tính toán đơn giản;
- Khi độ nghiêng của đoạn chuyển tiếp L lớn hơn tỷ lệ 1:4 sẽ làm tăng hệ số SCFs và khi nhỏ hơn thì gần như không gây ảnh hưởng.

## 5. Kết luận

Bằng một kỹ thuật chia lưới và kết hợp sử dụng mô hình cục bộ, phương pháp mô hình số có thể xác định được hệ số tập trung ứng suất trong bài toán thiết kế mối cho công trình phong điện dạng một trụ đỡ. Khi các điều kiện tải trọng trở nên phức tạp hoặc thay đổi liên tục, ảnh hưởng trực tiếp đến hệ số SCFs thì mô hình số là một phương pháp tin cậy có thể giải quyết được. Bên cạnh đó, hệ số SCFs sẽ phụ thuộc vào hình dạng của đoạn chuyển tiếp khi độ nghiêng lớn hơn 1:4.



## Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài “Nghiên cứu xác định hệ số tập trung ứng suất trong bài toán môi phức vụ cho thiết kế kết cấu trụ đỡ turbine gió ngoài khơi dạng Monopile”, mã số 59-2021/KHXD.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Wilberts, F. (2017). *Measurement-driven fatigue assessment of offshore wind turbine foundations*. Department of Earth sciences, Campus Gotland, Uppsala University.
- [2] Hùng, P. K. (1995). *Phương pháp luận tính toán môi kết cấu công trình biển cố định bằng thép*. Viện Xây dựng công trình biển.
- [3] Kolios, A., Wang, L., Mehmanparast, A., Brennan, F. (2019). [Determination of stress concentration factors in offshore wind welded structures through a hybrid experimental and numerical approach](#). *Ocean Engineering*, 178:38–47.
- [4] Trang tin tức và tạp chí, Công ty COWI. [Empire Wind project to boost NY renewables goals](#). Truy cập ngày 20/05/2022.
- [5] DNV RP C203. *Fatigue design of offshore steel structures*. Norway.
- [6] DNV OS J101. *Design of offshore wind turbine structures*. Norway.
- [7] Li, Y., Zhou, X.-P., Qi, Z.-M., Zhang, Y.-B. (2014). [Numerical study on girth weld of marine steel tubular piles](#). *Applied Ocean Research*, 44:112–118.
- [8] Garbatov, Y., Rudan, S., Gaspar, B., Soares, C. G. (2011). [Fatigue Assessment of Marine Structures](#). *Marine Technology and Engineering*, 865–888.
- [9] Biswal, R., Mehmanparast, A. (2019). [Fatigue damage analysis of offshore wind turbine monopile weldments](#). *Procedia Structural Integrity*, 17:643–650.
- [10] Biswal, R., Mamun, A. A., Mehmanparast, A. (2021). [On the performance of monopile weldments under service loading conditions and fatigue damage prediction](#). *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 44(6):1469–1483.
- [11] Atteya, M., Mikkelsen, O., Wintle, J., Ersdal, G. (2021). [Experimental and Numerical Study of the Elastic SCF of Tubular Joints](#). *Materials*, 14(15):4220.