■ Ngày nộp bài: 10/8/2026 ■ Ngày sửa bài: 21/8/2026 ■ Ngày chấp nhận đăng: 08/9/2026

Tối ưu thể tích bê tông kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu bằng thuật toán tối ưu sao biển (SFOA)

Concrete volume optimization of the retaining wall behind the jetty using the starfish optimization algorithm (SFOA)

> THS.NCS ĐỖ QUANG THÀNH[1,*], TS VŨ HỮU TRƯỜNG[1], PGS.TS LÊ THANH CƯỜNG[2]
[1]Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
[2]Trường Đại học Mở TP Hồ Chí Minh
[*]Email: thanhdq.ctt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu áp dụng thuật toán tối ưu sao biển (Original Starfish Optimization Algorithm - SFOA) để tối thiểu hóa thể tích bê tông kết cấu tường chắn và bản đáy của một công trình thực tế phía sau cầu tàu, chịu đồng thời các nhóm ràng buộc kỹ thuật theo tiêu chuẩn thiết kế hiện hành. Mô hình phần tử hữu hạn SAP2000 được liên kết trực tiếp với MATLAB qua giao diện COM, cho phép SFOA cập nhật 6 biến chiều dày của các vùng kết cấu và đánh giá phản hồi kết cấu bằng phân tích phần tử hữu hạn (FEM) trong từng bước lặp. Các nhóm ràng buộc gồm sức chịu tải cọc, chuyển vị ngang đỉnh tường, khả năng chịu cắt, bề rộng vết nứt và chọc thủng bản đáy theo từng cọc. Kết quả tối ưu với quần thể 50 cá thể, 50 vòng lặp cho thể tích bê tông 231,16 m^3, giảm thể tích bê tông 52,98 m^3 (18,65%) so với phương án kết cấu hiện hữu (284,14 m^3); đường cong hội tụ ổn định từ vòng lặp thứ 34 trở đi. Kết quả cho thấy phương pháp tối ưu có khả năng phân bổ lại chiều dày giữa các vùng kết cấu theo mức độ yêu cầu chịu lực, qua đó giảm thể tích bê tông so với phương án kết cấu hiện hữu.

Từ khóa: Thuật toán tối ưu sao biển; tối ưu thể tích bê tông; tường chắn phía sau cầu tàu; SAP2000-MATLAB; tối ưu kết cấu.

ABSTRACT

This study applies the Original Starfish Optimization Algorithm (SFOA) to minimize the concrete volume of the retaining wall and base slab of an actual structure behind a jetty, subject to simultaneous technical constraints under current design standards. The SAP2000 finite-element model is directly coupled with MATLAB through a COM interface, allowing SFOA to update six thickness variables of the structural zones and evaluate structural responses through finite-element analysis (FEM) at each iteration. The constraints include pile bearing capacity, lateral displacement at the wall top, shear capacity, crack width and punching shear of the base slab at individual piles. With a population of 50 individuals and 50 iterations, the optimization yields a concrete volume of 231.16 m^3, representing a reduction of 52.98 m^3 (18.65%) compared with the existing structural design (284.14 m^3); the convergence curve becomes stable from iteration 34 onward. The results demonstrate that the optimization method can redistribute the thicknesses among structural zones according to their load-bearing requirements, thereby reducing the concrete volume compared with the existing structural design.

Keywords: Starfish Optimization Algorithm; concrete volume optimization; retaining wall behind jetty; SAP2000-MATLAB; structural optimization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu, trong nghiên cứu này là kết cấu chắn đất phía sau cầu tàu, bố trí tại khu vực tiếp giáp giữa công trình cầu tàu và bãi phía sau bến, có chức năng giữ ổn định khối đất đắp và bảo vệ mặt bãi sau bến. Kết cấu tường chắn gồm các bộ phận bản đáy, tường mặt và tường cánh, thường được chia thành các vùng có chiều dày khác nhau theo cao trình và vị trí nhằm phù hợp với sự phân bố nội lực thực tế. Do đó, thể tích bê tông của kết cấu phụ thuộc đồng thời vào nhiều biến thiết kế là chiều dày của các vùng kết cấu. Trong thiết kế theo phương pháp thông thường, tiết diện thường được lựa chọn sơ bộ dựa trên kinh nghiệm và yêu cầu cấu tạo, sau đó kiểm tra tuần tự từng tiết diện. Cách tiếp cận này khó xác định đồng thời tổ hợp chiều dày tối thiểu cho tất cả các vùng mà vẫn thỏa mãn các

ràng buộc kỹ thuật, có thể dẫn đến dư thừa khả năng chịu lực cục bộ và làm tăng thể tích bê tông sử dụng.

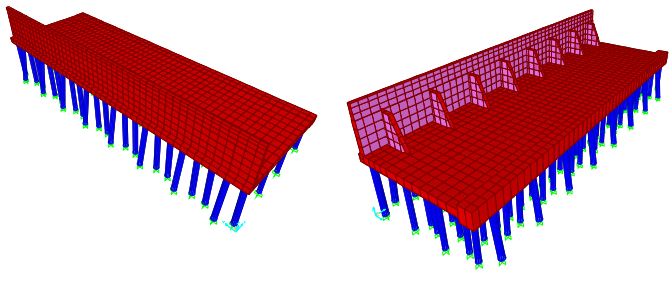
Các thuật toán tối ưu metaheuristic, kết hợp trực tiếp với mô hình phần tử hữu hạn (FEM) để đánh giá phản hồi kết cấu trong vòng lặp tối ưu, phù hợp với lớp bài toán tối ưu kết cấu có tính phi tuyến cao, biến thiết kế rời rạc và nhiều ràng buộc kỹ thuật đồng thời mà phương pháp tối ưu cổ điển khó xử lý [1]. Thuật toán tối ưu sao biển (SFOA) là thuật toán metaheuristic mới được đề xuất năm 2025, lấy cảm hứng từ hành vi săn mồi và tái sinh của sao biển, đã được đánh giá hiệu quả trên nhiều hàm kiểm thử chuẩn và một số bài toán kỹ thuật [1]. Nghiên cứu này không đánh giá SFOA trên các hàm kiểm thử chuẩn mà tập trung vào khả năng ứng dụng SFOA cho bài toán tối ưu kết cấu thực tế, kết hợp trực tiếp với FEM và các ràng buộc theo tiêu chuẩn thiết kế hiện hành.

Việc kết hợp SFOA với SAP2000 cho bài toán tối ưu thể tích bê tông kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu, chịu đồng thời các nhóm ràng buộc kỹ thuật theo tiêu chuẩn thiết kế hiện hành, chưa được xem xét trong phạm vi khảo sát của nghiên cứu này. Mục tiêu của nghiên cứu là: (1) Xây dựng khung tính toán SAP2000-MATLAB-SFOA cho bài toán tối ưu thể tích bê tông của 6 vùng chiều dày tường chắn phía sau cầu tàu, chịu đồng thời 5 nhóm ràng buộc kỹ thuật theo hệ tiêu chuẩn được lựa chọn; (2) Áp dụng khung tính toán này cho một công trình thực tế và đánh giá mức giảm thể tích bê tông so với hiện trạng. Đóng góp chính của nghiên cứu là minh chứng qua một công trình thực tế về khả năng ứng dụng SFOA gốc, không cần điều chỉnh hay lai ghép thêm cơ chế nào, cho một bài toán tối ưu kết cấu chắn đất thực tế có nhiều nhóm ràng buộc kỹ thuật đồng thời. Với 6 biến thiết kế được rời rạc hóa theo bước 0,01 m, không gian thiết kế chứa số lượng lớn các phương án có thể lựa chọn, khiến việc khảo sát toàn bộ đòi hỏi chi phí tính toán cao. Do đó, nghiên cứu sử dụng SFOA để tìm kiếm nghiệm tối ưu là cần thiết.

2. MÔ HÌNH BÀI TOÁN VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Hệ kết cấu

Hệ kết cấu được sử dụng làm đối tượng nghiên cứu, như mô tả ở Mục 1, là tường chắn cao 4,5 m, gồm tường mặt với 3 vùng có chiều dày khác nhau theo cao trình và vị trí dọc tuyến; tường cánh có một chiều dày không đổi dọc tuyến và liên kết với bản đáy đặt trên hệ 142 cọc bê tông ly tâm ứng suất trước (D400 và D500); bản đáy được chia thành hai vùng chiều dày độc lập. Tường chắn và bản đáy được mô hình hóa bằng phần tử vỏ (shell) trong SAP2000, sử dụng bê tông mác M350; hệ cọc được mô hình hóa bằng phần tử thanh (frame), với kích thước và bố trí được giữ nguyên trong suốt quá trình tối ưu.



Hình 1. Mô hình phần tử hữu hạn 3D của kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu

2.2. Tải trọng và tổ hợp tải

Hệ kết cấu chịu các trường hợp tải trọng gồm tĩnh tải bản thân (DEAD), tải đất đắp sau tường (Gdat), tải tập trung do áp lực đất (Pdat), tải phân bố do áp lực đất (ALD) và hoạt tải trên mặt bãi (HH). Tĩnh tải bản thân được SAP2000 tự động xác định từ trọng lượng bản thân của kết cấu; các tải còn lại được nhập trực tiếp vào mô hình với các giá trị như Bảng 1.

Bảng 1. Giá trị tải trọng tính toán dùng trong mô hình

Trường hợp	Đơn vị	Giá trị	Dạng tải trọng
Gdat	T/m²	7,02	Tải phân bố
HH	T/m²	2,00	Tải phân bố
Pdat	T	2,867	Lực tập trung tại nút
ALD	T/m²	2,104; 0,935	Tải phân bố theo vùng

Các tổ hợp tải trọng được xét:

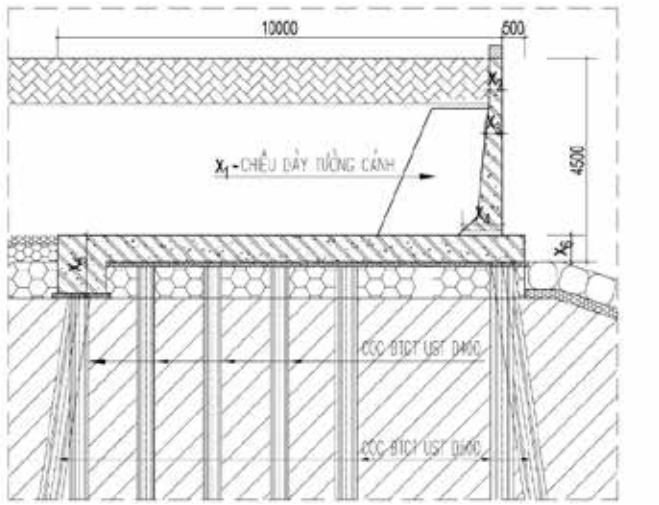
TH1 = DEAD + Gdat + Pdat + ALD

TH2 = TH1 + HH

BAO=ENVELOPE (TH1; TH2)

2.3. Biến thiết kế và hàm mục tiêu

Biến thiết kế $x = [x_1, x_2, ..., x_6]$ lần lượt là chiều dày của tường cánh, ba vùng tường mặt và hai vùng bản đáy. Các biến được rời rạc hóa theo bước 0,01 m trước khi cập nhật vào mô hình SAP2000. Miền giá trị khảo sát được xác định theo các yêu cầu về cấu tạo và thi công gồm: $x_1, x_2 \in [0,15; 0,40]$; $x_3 \in [0,15; 0,50]$; $x_4 \in [0,20; 0,90]$; $x_5 \in [0,45; 1,40]$; $x_6 \in [0,30; 0,70]$.



Hình 2. Các biến thiết kế của kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu

Hàm mục tiêu là tổng thể tích bê tông các vùng kết cấu, được xác định trực tiếp từ diện tích tương ứng và chiều dày thiết kế:

$$V(x) = \sum_{i=1}^{6} A_i \cdot x_i \quad (1)$$

Với A_i là diện tích vùng i (m²), x_i là chiều dày vùng i (m) và V(x) là thể tích bê tông (m³).

Hàm thích nghi dùng cho SFOA kết hợp hàm mục tiêu với hàm phạt tuyến tính theo tổng mức vi phạm ràng buộc g(x) [2]:

$$f(x) = V(x) + C \cdot g(x) \quad (2)$$

$$g(x) = \sum_{j=1}^{5} \max\left(0, v_j(x)\right) \quad (3)$$

Với $v_j(x)$ là mức vi phạm không thứ nguyên của nhóm ràng buộc thứ j, xác định theo tỷ số giữa đại lượng kiểm tra $R_j(x)$ và giới hạn cho phép $R_{j,lim}$:

$$v_j(x) = \max\left(0, \frac{R_j(x)}{R_{j,\text{lim}}} - 1\right) \quad (4)$$

($v_j(x) = 0$ nếu ràng buộc được thỏa mãn).

Trong nghiên cứu này, hệ số phạt được chọn bằng $C = 10^6$ nhằm ưu tiên các nghiệm thỏa mãn ràng buộc.

2.4. Ràng buộc kỹ thuật

Các nhóm ràng buộc kỹ thuật được kiểm tra tại mỗi lần đánh giá, áp dụng cùng nguồn tiêu chuẩn và cách xử lý trong vòng lặp tối ưu được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Nhóm ràng buộc kỹ thuật của bài toán tối ưu

STT	Ràng buộc	Đại lượng kiểm tra	Điều kiện thỏa mãn	Ghi chú
1	Sức chịu tải cọc	N_d xác định từ phản lực đầu cọc	$N_d \le [N_d]$ (D400: 78,76T; D500: 112,44T)	TCVN 10304:2025
2	Chuyển vị ngang đỉnh tường	$\max\|U_1\|$ tại các nút thuộc nhóm đỉnh tường	≤ min(H/300, 100 mm)	TCVN 11820-5:2021
3	Khả năng chịu cắt	Lực cắt Q tại tiết diện cách mặt gối tựa một đoạn h_0	$\gamma_{lc}\cdot\gamma_n\cdot Q \le \gamma_c\cdot\gamma_{b7}\cdot Q_b$	TCVN 4116:2023
4	Bề rộng vết nứt	a_{cr} tính từ ứng suất cốt thép σ_s	$a_{cr} \le \gamma_c \cdot 0{,}2$mm	TCVN 4116:2023
5	Chọc thủng bản đáy	Phản lực đầu cọc so với khả năng chống chọc thủng theo chu vi tháp chọc thủng	$\|N_d\| \le \gamma_c\cdot R_{bt}\cdot u\cdot h_0$	TCVN 5574:2018

Theo [4], Bảng 12, giới hạn chuyển vị ngang cho nhóm ràng buộc 2 là 15 mm. Nhóm ràng buộc 3 và 4 được kiểm tra riêng cho từng vùng, sử dụng nội lực bao (M, V) trích xuất từ SAP2000 theo tổ hợp bao; đối với kiểm tra chịu cắt, nội lực được trích xuất tại các vị trí cách mặt gối tựa hoặc mép cọc một khoảng không nhỏ hơn h_0, nhằm hạn chế đỉnh nội lực cục bộ tại biên phần tử vỏ. Nhóm ràng buộc 5 về kiểm tra chọc thủng được thực hiện riêng cho từng cọc, với h_0 của vùng bản đáy tương ứng.

2.5. Khung tính toán SAP2000-MATLAB-SFOA

Quá trình đánh giá mỗi cá thể được thực hiện tuần tự. Trước hết, các biến thiết kế được rời rạc hóa theo bước 0,01 m và cập nhật vào mô hình SAP2000 thông qua hàm OAPI SetShell_1. Sau đó, mô hình được phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn để xác định phản lực đầu cọc, chuyển vị và nội lực vỏ theo tổ hợp bao. Các kết quả này được sử dụng để kiểm tra các nhóm ràng buộc, tính thể tích bê tông và hàm thích nghi, sau đó trả về SFOA để cập nhật quần thể.

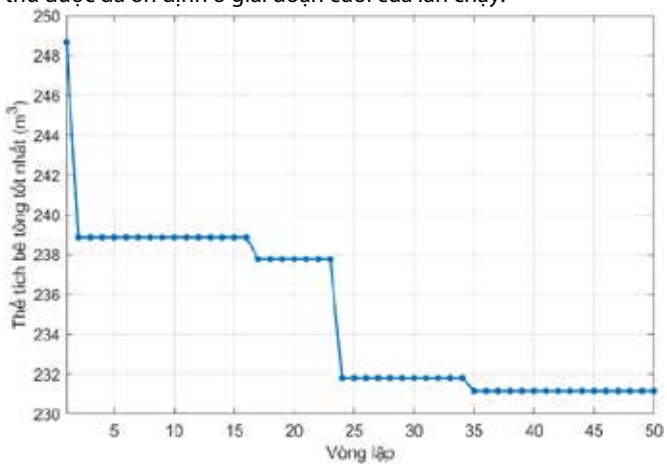
2.6. Thuật toán SFOA và thiết lập tính toán

Thuật toán SFOA [1], gồm hai giai đoạn khám phá và khai thác dựa trên hành vi tìm mồi và tái sinh của sao biển, không bổ sung cơ chế nào khác. Do mục tiêu nghiên cứu là đánh giá khả năng ứng dụng SFOA cho một bài toán thiết kế cụ thể, không nhằm so sánh hay phát triển thuật toán, quá trình tối ưu chỉ thực hiện một lần chạy duy nhất (Nrun = 1), không yêu cầu thống kê giá trị tốt nhất, giá trị trung bình và độ lệch chuẩn qua nhiều lần chạy như các nghiên cứu đánh giá thuật toán. Khảo sát sơ bộ với N_{pop}=15, 40 vòng lặp cho thấy nghiệm cải thiện rất ít ở các vòng lặp cuối, do đó nghiên cứu chọn N_{pop}=50, Maxit=50 (2.550 lần đánh giá) cho lần chạy chính thức, lớn hơn đáng kể ngưỡng hội tụ quan sát được để tạo biên an toàn.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Sự hội tụ của thuật toán

Hình 3 thể hiện đường cong hội tụ (giá trị tốt nhất tích lũy theo vòng lặp) của lần chạy chính thức. Giá trị hàm mục tiêu giảm theo từng nấc trong quá trình tối ưu, từ 248,67 m^3 ở vòng lặp thứ nhất xuống 238,87 m^3 ở vòng lặp thứ 2, tiếp tục giảm xuống 237,77 m^3 ở vòng lặp 17 và 231,81 m^3 ở vòng lặp 24, sau đó không đổi từ vòng lặp 34 đến 50 (231,16 m^3 trong 17 vòng lặp cuối), cho thấy nghiệm thu được đã ổn định ở giai đoạn cuối của lần chạy.



Hình 3. Đường cong hội tụ của SFOA

3.2. Nghiệm tối ưu

Bảng 3. So sánh nghiệm tối ưu với phương án kết cấu hiện hữu

Biến thiết kế	Chiều dày hiện trạng (m)	Chiều dày tối ưu (m)
x_1	0,30	0,15
x_2	0,30	0,23
x_3	0,43	0,25
x_4	0,78	0,27
x_5	1,30	0,69
x_6	0,60	0,59
Thể tích bê tông V (m^3)	284,14	231,16 (nhỏ nhất)
Chênh lệch ΔV		-52,98 m^3 (-18,65%)

Nghiệm tối ưu giảm chiều dày ở cả 6 vùng so với hiện trạng, với mức giảm lớn nhất thuộc về vùng chân tường chắn (biến x_4 giảm 65,4%, từ 0,78 m xuống 0,27 m) và nhỏ nhất thuộc về vùng bản đáy (biến x_6 giảm 1,7%, từ 0,60 m xuống 0,59 m). Kết quả cho thấy mức giảm chiều dày giữa các vùng là khác nhau, phản ánh sự khác biệt về hình học và yêu cầu chịu lực của từng vùng trong quá trình tối ưu.

3.3. Kiểm tra ràng buộc kỹ thuật của nghiệm tối ưu

Bảng 4. Kiểm tra ràng buộc của nghiệm tối ưu

Ràng buộc	Giá trị/tỷ số	Giới hạn	Kết quả
Sức chịu tải cọc (tỷ số $N_d/[N_d]$)	0,372	≤ 1,0	Đạt
Chuyển vị ngang đỉnh tường	4,15 mm	≤ 15 mm	Đạt
Khả năng chịu cắt	Không vi phạm	--	Đạt
Bề rộng vết nứt	Không vi phạm	≤ 0,2 mm	Đạt
Chọc thủng bản đáy	0,41	≤ 1,0	Đạt

Toàn bộ năm nhóm ràng buộc kỹ thuật đều được thỏa mãn. Đối với sức chịu tải cọc, tỷ số sử dụng lớn nhất là 37,2%; chuyển vị ngang đỉnh tường đạt 27,7% giới hạn (4,15 mm so với 15 mm); chọc thủng đạt tối đa 41,0%. Các điều kiện chịu cắt và bề rộng vết nứt vẫn cần được kiểm soát khi tiếp tục giảm chiều dày các vùng kết cấu.

3.4. Hiệu quả tính toán

Thời gian tính toán trung bình khoảng 14,2 giây cho mỗi lần đánh giá trong tổng số 2.550 lần đánh giá, tương ứng tổng thời gian khoảng 10 giờ 2 phút cho toàn bộ quá trình tối ưu.

3.5. Hạn chế

Nghiên cứu chỉ thực hiện một lần chạy tối ưu (Nrun = 1), phù hợp với mục tiêu đánh giá khả năng ứng dụng SFOA cho một công trình cụ thể thay vì đánh giá độ ổn định thống kê của thuật toán. Đường cong hội tụ ở Mục 3.1 được sử dụng để đánh giá sự ổn định của nghiệm trong quá trình tối ưu. Trong vòng lặp tối ưu, các ràng buộc về chịu cắt và bề rộng vết nứt được kiểm tra trên cơ sở tỷ lệ cốt thép dự kiến từ mô men yêu cầu, chưa xét đến cấu tạo cốt thép cụ thể trong bản vẽ thiết kế. Đối với chọc thủng, nghiệm tối ưu được kiểm tra bổ sung độc lập với vòng lặp theo EN 1992-1-1 [7], cho toàn bộ 142 cọc, phân loại theo vị trí trong, biên và góc bản đáy, sử dụng các hệ số β lần lượt là 1,15; 1,40 và 1,50. Kết quả cho thấy không có cọc nào vi phạm, tỷ số sử dụng lớn nhất bằng 0,41 tại một cọc biên; biến chiều dày x_1 hội tụ đúng tại cận dưới của phạm vi khảo sát trong bài toán tối ưu. Do đó, nghiệm thu được xem là phương án đề xuất ở cấp độ tối ưu chiều dày; trước khi áp dụng cho thiết kế thi công, cần tiếp tục hoàn thiện và kiểm tra chi tiết cốt thép theo hồ sơ thiết kế.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và áp dụng khung tính toán kết hợp SAP2000-MATLAB và thuật toán SFOA để tối ưu 6 biến chiều dày của kết cấu tường chắn phía sau cầu tàu, đồng thời kiểm tra 5 nhóm ràng buộc kỹ thuật theo các tiêu chuẩn phù hợp với công trình bến cảng biển.

Đối với công trình khảo sát, nghiệm tối ưu cho thể tích bê tông 231,16 m^3, giảm 52,98 m^3, tương đương 18,65% so với phương án kết cấu hiện hữu. Nghiệm thu được thỏa mãn toàn bộ các ràng buộc kiểm tra và ổn định ở các vòng lặp cuối của quá trình tối ưu.

Kết quả hiện mới dừng ở tối ưu chiều dày và kiểm tra ràng buộc trong mô hình tính toán; hậu kiểm bổ sung cho thấy nghiệm tối ưu cũng thỏa mãn điều kiện chọc thủng theo EN 1992-1-1 với tỷ số sử dụng lớn nhất 0,41. Việc hoàn thiện chi tiết cốt thép cần được thực hiện ở bước thiết kế tiếp theo trước khi áp dụng cho thiết kế thi công.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo phát triển SFOA theo hướng MOSFOA nhằm xem xét bài toán tối ưu đa mục tiêu đối với các kết cấu tương tự.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Zhong, C., Li, G., Meng, Z., Li, H., Yildiz, A.R., Mirjalili, S. Starfish optimization algorithm (SFOA): a bio-inspired metaheuristic algorithm for global optimization compared with 100 optimizers. Neural Computing and Applications, vol. 37, pp. 3641-3683, 2025, doi: 10.1007/s00521-024-10694-1.

[2] Deb, K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 186, no. 2-4, pp. 311-338, 2000, doi: 10.1016/S0045-7825(99)00389-8.

[3] TCVN 10304:2025. Thiết kế móng cọc. Bộ Xây dựng, Việt Nam, 2025.

[4] TCVN 11820-5:2021. Công trình cảng biển - Yêu cầu thiết kế - Phần 5: Công trình bến. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2021.

[5] TCVN 4116:2023. Công trình thủy lợi - Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép thủy công - Yêu cầu thiết kế. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2023.

[6] TCVN 5574:2018. Thiết kế kết cấu bê tông và bê tông cốt thép. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam, 2018.

[7] EN 1992-1-1:2004+A1:2014. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2014.