

NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN TỐI ƯU HÓA ĐA MỤC TIÊU
CHO MÓNG BĂNGA STUDY ON MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION
FOR STRIP FOUNDATION DESIGN

ĐỖ THỊ MINH TRANG*, LÊ THỊ LỆ

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: minhtrang.ctt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Móng băng là một loại móng nông phổ biến, đóng vai trò là bộ phận kết cấu chịu lực nền tảng trong các hệ kết cấu chịu lực đứng của công trình dân dụng và công nghiệp. Trong hệ kết cấu này, móng băng có chức năng trực tiếp tiếp nhận và phân phối tải trọng từ các bộ phận thượng tầng xuống lớp đất nền bên dưới, đồng thời đảm bảo sự ổn định tổng thể và hạn chế biến dạng nền móng trong quá trình khai thác công trình. Mặc dù giữ vai trò thiết yếu trong hệ kết cấu chịu lực của công trình xây dựng, nhưng bộ phận này vẫn chưa nhận được sự quan tâm tương xứng trong các nghiên cứu khoa học gần đây. Móng phải đáp ứng hai yêu cầu cơ bản: Khả năng chịu lực cực đại và độ lún của móng ở mức cho phép với giá thành công trình tối thiểu. Tuy nhiên, việc tính toán lựa chọn kích thước móng băng hiện vẫn chủ yếu dựa trên kinh nghiệm, thiên về an toàn, thường dẫn đến việc lãng phí vật liệu, tăng chi phí xây dựng. Bài nghiên cứu này nghiên cứu ứng dụng thuật toán Tối ưu bầy đàn đa mục tiêu (MOPSO) trong việc tự động hóa quá trình tính toán và tối ưu hóa kích thước của móng băng cứng chịu tác động của tải trọng lệch tâm. Kết quả của nghiên cứu cho thấy mối quan hệ giữa độ lún và giá thành xây dựng tối ưu, qua đó đưa ra khuyến nghị cho tiêu chuẩn kép về an toàn và kinh tế.

Từ khóa: Móng băng, thiết kế tối ưu, trí tuệ nhân tạo, tính toán khả năng chịu tải, thuật toán tối ưu bầy đàn đa mục tiêu.

Abstract

Strip footing is a common type of shallow foundation that serves as a fundamental load-bearing component in vertical load-resisting structural systems of both residential and industrial buildings. Within such systems, the strip footing functions to directly receive and distribute loads from superstructure elements to the

underlying soil strata, while simultaneously ensuring global stability and minimizing foundation deformations during the service life of the structure. Despite its critical role in the overall structural system of buildings, the strip footing has not received commensurate attention in recent scientific studies. This indicates a research gap that warrants further exploration, particularly in the context of modern demands for optimization, automation, and integrated computational design approaches. A foundation must satisfy two fundamental requirements: Ensuring maximum load-bearing capacity and maintaining settlement within permissible limits, all while minimizing construction costs. However, the sizing of strip foundations is still predominantly based on empirical approaches and safety-oriented assumptions, often resulting in material wastage and increased construction expenses. This study investigates the application of the Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm to automate the calculation and optimize the dimensions of rigid strip foundations subjected to eccentric loading. The findings reveal the relationship between settlement and optimal construction cost, thereby offering recommendations for a dual-criterion standard that balances both safety and economic efficiency.

Keywords: Strip foundations, optimal design, artificial intelligence, bearing capacity analysis, Multi-Objective Particle Swarm Optimization algorithm.

1. Giới thiệu

Móng nông là loại móng có chiều sâu đặt đáy móng tương đối nhỏ, thường không vượt quá 5m, và được thi công trực tiếp trên hố đào tự nhiên, sau đó được lấp lại bằng vật liệu đắp. Một số loại móng nông thường gặp: Móng đơn (móng đơn đúng tâm, lệch tâm,

móng chân vịt), móng băng dưới tường, móng băng dưới cột (móng băng một phương, móng băng giao thoa), móng bè. Móng băng là loại móng được sử dụng phổ biến trong xây dựng nhà ở, đặc biệt là nhà lô phố (nhà liền kề), nhà ở nông thôn, nhà xưởng quy mô nhỏ, các công trình có tải trọng phân bố đều theo một hướng. Phương pháp thiết kế thông thường là các nhà thiết kế xác định chiều rộng và chiều cao của móng theo kinh nghiệm thiết kế hoặc theo các dự án tương tự trước đây, sau đó tính toán áp lực móng xem có đáp ứng các yêu cầu về khả năng chịu lực của móng hay không. Khối lượng cốt thép được tính theo điều kiện khả năng uốn và cắt. Nếu không đáp ứng các yêu cầu, sẽ thay đổi kích thước thiết kế cho đến khi đáp ứng các yêu cầu về thông số kỹ thuật như khả năng chịu lực, độ cứng và độ ổn định. Quy trình thiết kế này thường dựa vào kinh nghiệm của người thiết kế và chưa phải là giải pháp tối ưu.

Thuật toán MOPSO (Multi-Objective Particle Swarm Optimization) là phiên bản mở rộng của PSO nhằm giải các bài toán tối ưu đa mục tiêu. Mỗi cá thể (hạt) trong quần thể di chuyển trong không gian tìm kiếm dựa vào vị trí tốt nhất từng đạt được và thông tin từ một kho lưu trữ các nghiệm không trội (Pareto archive). Nhờ đó, MOPSO có thể duy trì đa dạng lời giải và dần tiến tới tập nghiệm Pareto tối ưu. Một số tác giả đã đề xuất hướng tiếp cận thiết kế tối ưu và đạt được kết quả ban đầu, tuy nhiên vẫn chưa đáp ứng đầy đủ yêu cầu của các bài toán thực tiễn và đa mục tiêu. Mohammad Khajehzadeh và cộng sự đã nghiên cứu về tối ưu hóa nền móng nông sử dụng thuật toán tìm kiếm hấp dẫn [1]. Trong nghiên cứu này, các tác giả đã ứng dụng thuật toán Tìm kiếm Hấp dẫn (Gravitational Search Algorithm - GSA), nhằm tối ưu hóa các ràng buộc phi tuyến trong thiết kế nền móng nông. Đây là một thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên, không yêu cầu giá trị khởi tạo cụ thể và không dựa vào hướng đạo hàm trong quá trình tìm kiếm lời giải, do đó không cần đến thông tin đạo hàm của hàm mục tiêu. Kết quả chỉ ra rằng phương pháp được đề xuất có thể cung cấp các giải pháp có chất lượng cao, độ chính xác và hiệu quả để thiết kế nền móng tối ưu. Abdul Azhim và Widjojo A. Prakoso đã nghiên cứu về Tối ưu hóa chi phí xây dựng móng nông cho đất cát tại Indonesia [2]. Trong nghiên cứu này, công cụ tối ưu hóa Solver - một chức năng hỗ trợ tích hợp sẵn trong phần mềm Microsoft Excel - đã được sử dụng để thiết kế móng nông với việc đồng thời xét đến ba khía cạnh chính: trạng thái giới hạn cực hạn (Ultimate Limit State - ULS), trạng thái giới hạn sử dụng (Serviceability Limit State - SLS) và hiệu quả kinh tế.

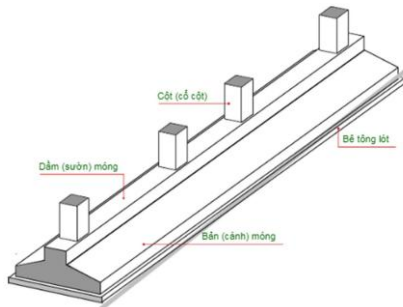
Phương pháp tiếp cận này cho phép đánh giá tác động của các cấu trúc chi phí xây dựng khác nhau tại bốn tỉnh thuộc Indonesia. Kết quả phân tích cho thấy tính khả thi và hiệu quả của giải pháp đề xuất trong thực tiễn thiết kế móng nông. Bên cạnh đó, V Ghiasi và F Sohrabi cũng cho rằng ứng suất đất quá mức có thể dẫn đến lún thêm hoặc phá hủy cắt của đất, trong cả hai trường hợp, đều gây hư hỏng cho kết cấu [3]. Do đó, các kỹ sư địa kỹ thuật và kết cấu thiết kế móng phải đánh giá khả năng chịu lực của đất. Nghiên cứu này thảo luận về việc tối ưu hóa khả năng chịu lực của móng nông và so sánh các phương pháp xác định và xác suất. Trong nghiên cứu này, khả năng chịu lực của móng nông được xác định bằng phương pháp Monte Carlo, cuối cùng đề xuất các giải pháp xây dựng để cải thiện hiệu suất của móng nông [3]. Một số tác giả khác cũng nghiên cứu tính khả thi của PSO-ANFIS trong việc ước tính sức chịu tải của móng băng nằm trên mái dốc không có lực dính [4]. Nghiên cứu này tập trung đánh giá hiệu quả của thuật toán Tối ưu bầy đàn (Particle Swarm Optimization - PSO) kết hợp với hệ thống suy luận mờ tích hợp mạng thích ứng (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS) trong việc dự đoán sức chịu tải cực đại của móng băng đặt trên đỉnh mái dốc. Đồng thời, nghiên cứu cũng phân tích khả năng ứng dụng của mô hình PSO-ANFIS trong việc ước tính sức chịu tải cực đại của móng băng trên mái dốc không có lực kết dính, khi chịu tác dụng của ứng suất thẳng đứng từ bên ngoài. Kết quả cho thấy mô hình PSO-ANFIS được đề xuất với cấu trúc ít phức tạp hơn, được phát hiện là chính xác hơn so với các mô hình ANFIS thông thường [4]. Ngoài ra còn có các công trình nghiên cứu về tối ưu hóa móng băng như: Các mô hình tính toán mềm tiên tiến dựa trên mạng nơ-ron được tối ưu hóa cho khả năng chịu lực của móng băng chịu tải trọng nghiêng [5]; Khả năng chịu lực động cực đại của móng băng nông - phân tích độ tin cậy sử dụng phương pháp bề mặt phản ứng [6]. Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào bài toán tối ưu hóa đơn mục tiêu, nghĩa là quá trình thiết kế kích thước móng chỉ nhằm đáp ứng một tiêu chí duy nhất, thường là tiêu chí về chi phí xây dựng hoặc khả năng chịu lực của móng.

Bài báo này trình bày ứng dụng của thuật toán đa mục tiêu trong việc tối ưu hóa thiết kế móng băng bê tông cốt thép, với hai mục tiêu chính là kiểm soát độ lún ổn định và giảm thiểu chi phí xây dựng. Loại móng này được sử dụng phổ biến trong xây dựng dân dụng và công nghiệp, đặc biệt tại các công trình có hệ kết cấu tường chịu lực hoặc khung bê tông cốt thép. Thuật toán này có thể cung cấp cho các nhà thiết kế

kết cấu một phương pháp thiết kế tối ưu hiệu quả, không chỉ đáp ứng hai mục tiêu thiết kế quan trọng là an toàn và hiệu quả kinh tế, mà còn nâng cao hiệu quả tổng thể của quá trình thiết kế.

2. Cơ sở lý thuyết tính toán móng băng

Hình 1 minh họa cấu tạo móng băng được nghiên cứu. Trong thực tiễn thiết kế, kích thước chiều rộng và chiều cao của móng thường được xác định dựa trên kinh nghiệm của kỹ sư hoặc từ các dự án tương tự đã thực hiện trước đó, sau đó tiến hành kiểm tra các điều kiện kỹ thuật cần thiết, bao gồm: Kiểm tra khả năng chịu lực, kiểm tra độ lún và kiểm tra chống chọc thủng. Trong nội dung bài báo này, các điều kiện về độ bền sẽ được sử dụng làm điều kiện ràng buộc trong tính toán tối ưu.



Hình 1. Móng băng

2.1. Tính toán sức chịu tải của nền đất

Trong tính toán sức chịu tải của nền đất, một phương pháp thường được sử dụng là xác định tải trọng cực hạn P_u , từ đó xác định tải trọng cho phép tác dụng lên nền đất.

$$[P] = \frac{P_u}{F_s} \quad (1)$$

(F_s - hệ số an toàn)

Sức chịu tải của nền đất được xác định theo nhiều phương pháp, trong bài báo này, nội dung tính toán sẽ sử dụng công thức của Terzaghi - dựa trên cơ sở lý luận cân bằng giới hạn, một trong những phương pháp kinh điển và được áp dụng rộng rãi trong thiết kế móng nông. Theo Terzaghi, khi móng làm việc, một khối đất được gắn chặt với đáy móng tạo thành một nêm đất. Terzaghi là người đầu tiên dùng các hệ số sức chịu tải N_γ (hệ số bề rộng), N_q (hệ số độ sâu), N_c (hệ số lực dính) theo truyền thống vẫn được dùng cho đến nay [7].

Công thức tổng quát như sau:

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma + \gamma h N_q + c N_c \quad (2)$$

Trong đó:

P_u : Sức chịu tải giới hạn (kN/m^2), tức là ứng suất tối đa mà nền đất có thể chịu được;

c : Lực dính của đất nền (kN/m^2);

γ : Dung trọng của đất nền (kN/m^3);

h : Chiều sâu đặt móng (m);

B : Chiều rộng móng (m);

N_c, N_q, N_γ : Hệ số sức chịu tải - phụ thuộc vào góc ma sát trong φ của đất.

Các hệ số N_c, N_q, N_γ được tính theo công thức sau:

$$N_\gamma = 0,5 \tan \varphi \left(\frac{K p \gamma}{\cos^2 \varphi} - 1 \right);$$

$$N_q = \frac{a^2}{2 \cos^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)};$$

$$N_c = \cot \varphi \left[\frac{a^2}{2 \cos^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)} - 1 \right].$$

Với: $a = e^{(3\pi/4 - \varphi/2) \tan \varphi};$

$$K p \gamma = 3 \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi + 33}{2} \right)$$

2.2. Kiểm tra ổn định của móng băng

Việc kiểm tra ổn định của móng băng được tính toán như sau [8]:

* Điều kiện về áp lực trung bình:

$$p_{tb} = \frac{p_{\max}^{tc} + p_{\min}^{tc}}{2} \leq P_u \quad (3)$$

* Điều kiện ổn định do tải trọng cực đại gây ra:

$$p_{\max}^{tc} = \frac{\sum N^{tc}}{B.L} + \frac{6 \cdot \sum M^{tc}}{B.L^2} + \gamma_{tb} \cdot h \leq 1,2 P_u \quad (4)$$

* Điều kiện ổn định do tải trọng cực tiểu gây ra:

$$p_{\min}^{tc} = \frac{\sum N^{tc}}{B.L} - \frac{6 \cdot \sum M^{tc}}{B.L^2} + \gamma_{tb} \cdot h > 0 \quad (5)$$

Trong đó:

$N^{tc}; M^{tc}$: Là lực dọc và mô men tiêu chuẩn;

L : Là chiều dài của móng (m);

γ_{tb} : Là dung trọng trung bình của đất đè lên móng (kN/m^3).

2.3 Kiểm tra độ lún ở tâm móng

Độ lún của công trình có thể được xác định bằng nhiều phương pháp khác nhau. Trong bài báo này, nội dung tính độ lún sẽ sử dụng phương pháp lớp tương đương của Xútôvich, dựa trên giả thiết nền đàn hồi tuyến tính.

Độ lún tính toán của móng trong trường hợp này được ước lượng bằng công thức:

$$S = \frac{\Delta\sigma_{avg} \cdot H_{total}}{E_{eq}} \quad (6)$$

Trong đó:

$\Delta\sigma_{avg}$: Ứng suất trung bình tăng do tải trọng móng tại độ sâu khảo sát;

H_{total} : Chiều dày tổng của lớp đất chịu nén lún;

E_{eq} : Mô đun đàn hồi tương đương của nền đất.

Ứng suất do tải trọng móng được xác định bằng lý thuyết Boussinesq cho nền đàn hồi vô hạn:

$$\Delta\sigma = q \cdot I_z \quad (7)$$

Trong đó:

q : Tải trọng trung bình trên móng;

I_z : Hệ số ảnh hưởng theo chiều sâu;

Khi nền đất có nhiều lớp có các mô đun đàn hồi khác nhau, có thể quy đổi về một mô đun tương đương theo công thức:

$$E_{eq} = \frac{H_{total}}{\frac{H_1}{E_1} + \frac{H_2}{E_2} + \dots + \frac{H_n}{E_n}} \quad (8)$$

Trong đó:

H_i : Bề dày của lớp đất thứ i ;

E_i : Mô đun đàn hồi của lớp đất thứ i .

Phương pháp nền tương đương là một trong những cách tiếp cận để tính toán độ lún của móng nông đặt trên nền đất có nhiều lớp với các đặc trưng cơ học khác nhau. Cách tiếp cận này nhằm tìm một lớp đất tương đương có mô đun đàn hồi tương đương để thay thế các lớp đất thực tế.

2.4. Chiều cao móng tối thiểu

Hình 2 minh họa cấu tạo móng băng dưới tường với cấu kiện bản móng mở rộng sang hai bên và được tăng cường bằng lớp thép chịu lực chính bố trí tại đáy móng.

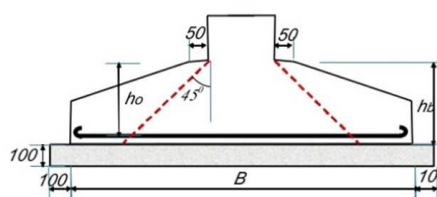
Vì móng băng thuộc loại bài toán phẳng, nên trong tính toán thường lấy 1m chiều dài theo phương dọc tường để quy đổi về bài toán mặt cắt ngang. Từ đó, chiều cao móng tối thiểu được xác định theo biểu thức:

$$h_0 \geq \frac{a \cdot p''}{R_{bt}} \quad (9)$$

Trong đó,

p'' : Là áp lực tính toán dưới đế móng, do lực dọc tính toán xác định đến đỉnh móng và mômen tính toán tương ứng với điểm qua giữa bề rộng B tại đáy móng;

R_{bt} : Cường độ chịu nén của bê tông.



Hình 2. Chiều cao móng tối thiểu

Về mặt kết cấu cốt thép, mô hình trong Hình 2 cho thấy lớp thép chịu lực chính (thép chủ) được bố trí tại đáy móng theo phương ngang, nhằm chống lại mômen uốn lớn nhất phát sinh dưới tác dụng của phản lực đất nền. Bài toán hiện tại chỉ xét đến thanh thép chủ ở đáy móng.

Việc xác định chiều cao móng tối thiểu nhằm đảm bảo móng không bị phá hoại do chọc thủng hoặc cắt xiên, đồng thời tạo đủ không gian để bố trí và bảo vệ lớp thép chịu kéo một cách hợp lý theo quy định kỹ thuật về cấu tạo kết cấu bê tông cốt thép.

2.5. Tính toán cốt thép

Diện tích thép theo phương ngang (tính cho 1m dài):

$$A_s = \frac{M}{0,9 \cdot h_0 \cdot R_s} = \frac{p'' \cdot a^2}{2,0 \cdot 9 h_0 \cdot R_s} \quad (10)$$

Trong đó:

M : Mômen uốn do phản lực tính toán của đất lên đáy móng tương ứng với mặt ngàm đi qua chân tường;

$h_0 = h_b - a_0$: Chiều cao móng băng dưới tường;

R_s : Cường độ chịu kéo của thép.

3. Tính toán tối ưu hóa móng băng

Trong phần này, nhóm tác giả sẽ trình bày nội dung tính toán tối ưu đa mục tiêu cho một móng băng điển hình được xây dựng trên khu vực Thủy Nguyên - Hải Phòng. Thông số địa chất khu vực xây dựng thể hiện ở Bảng 1.

Bảng 1. Thông số địa chất

Lớp đất	Bề dày (m)	Tên và trạng thái	Chỉ tiêu cơ lý	Giá trị
2	4,3	Sét pha - Dẻo mềm	γ_w (g/cm ³)	1,9
			E (kG/cm ²)	24,6
			C (kG/cm ²)	0,1
			φ (độ)	9,3
3	15,2	Sét - Dẻo mềm	γ_w (g/cm ³)	1,9
			E (kG/cm ²)	18,7
			C (kG/cm ²)	0,1
			φ (độ)	10,3

Móng có chiều dài là 10m. Giá trị tải trọng truyền lên móng là mô men uốn, lực cắt và lực dọc lần lượt là $10T_m$, $5T$, $55T$.

Thuật toán tối ưu được áp dụng trong nghiên cứu là thuật toán Tối ưu bầy đàn đa mục tiêu (Multi-Objective Particle Swarm Optimization - MOPSO). MOPSO được phát triển dựa trên nền tảng của thuật toán PSO truyền thống, với sự mở rộng nhằm giải quyết các bài toán tối ưu có nhiều mục tiêu. Khác với PSO cổ điển vốn chỉ tìm một nghiệm tối ưu duy nhất, MOPSO tìm kiếm một tập hợp các nghiệm tối ưu không trội hơn nhau (Pareto-optimal set), qua đó cung cấp các phương án cân bằng giữa các mục tiêu có tính xung đột [9]. Thuật toán MOPSO được đánh giá là phù hợp với các bài toán kỹ thuật có hàm mục tiêu không quá phức tạp, nhờ đặc tính dễ triển khai và khả năng hội tụ nhanh. Trong phạm vi nghiên cứu này, hai hàm mục tiêu được xét đến gồm: Chi phí xây dựng móng và độ lún của móng, với mục tiêu đồng thời tối thiểu hóa cả hai đại lượng này.

$$\begin{aligned} f_1 &= V_c \cdot \bar{c}_c + V_d \cdot \bar{c}_d + V_s \cdot \bar{c}_d \\ f_2 &= S \end{aligned} \quad (11)$$

Trong đó V_c , V_d , V_s là khối lượng bê tông, đào đắp và cốt thép. Còn các giá trị $\bar{c}$ tương ứng là đơn giá một đơn vị khối lượng tương ứng của các đại lượng đó:

Các điều kiện ràng buộc bao gồm:

- Điều kiện về ứng suất như công thức (3);
- Điều kiện ổn định về độ lún $S \leq 8\text{cm}$;
- Điều kiện về chiều cao tối thiểu của móng theo công thức (9);
- Điều kiện về cấu tạo móng bao gồm:

$$h \geq 0 \quad (12)$$

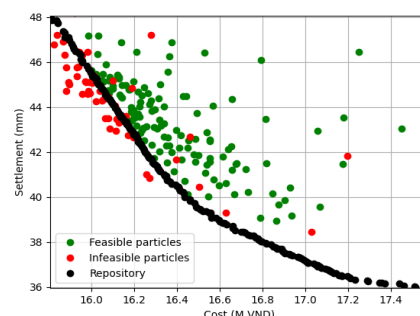
$$0,4 \leq h_b \leq 0,8 \quad (13)$$

$$0,5 \leq B \leq 3,0 \quad (14)$$

Mô hình MOPSO viết trên code Python phát triển từ thuật toán trong tài liệu [9], được khởi tạo với các thông số cụ thể như sau:

- Số lượng cá thể: 200;
- Bộ lưu: 200;
- Số lượng vòng lặp tối đa trong 1 lần chạy: 200.

Kết quả tính toán được trình bày trong Hình 3, trong đó các điểm màu đen biểu diễn tập nghiệm Pareto - đại diện cho những phương án thiết kế đạt được sự cân bằng tối ưu giữa hai mục tiêu là độ lún và chi phí xây dựng. Ngược lại, các điểm màu đỏ thể hiện những phương án không thỏa mãn đồng thời hai mục tiêu hoặc vi phạm các điều kiện ràng buộc kỹ thuật trong mô hình tối ưu.



Hình 3. Đường Pareto quan hệ độ lún và giá thành xây dựng móng

Đường Pareto cho thấy giá trị độ lún của móng và chi phí xây dựng là xung đột nhau. Ở giá thành thấp nhất là 15,8 triệu đồng thì độ lún là lớn nhất (48 mm), ngược lại ở giá thành cao nhất là 17,6 triệu đồng thì độ lún là nhỏ nhất (36mm). Ở giá trị tương ứng với độ lún là 39mm và giá thành là 16,5 triệu đồng (trong trường hợp móng dài 10m, rộng 1,05m, chiều cao móng 0,45m, chiều sâu chôn móng 0,5m) có sự thay đổi về độ dốc của đồ thị. Điều đó cho thấy rằng khi tăng kích thước móng dẫn tới tăng giá thành xây dựng vượt quá 16,5 triệu đồng độ lún có tốc độ giảm chậm hơn. Người thiết kế có thể căn cứ vào tập Pareto thu được để cân nhắc lựa chọn kích thước móng phù hợp với yêu cầu thiết kế.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày tổng quan về móng băng cũng như quy trình tính toán thiết kế loại móng này. Thuật toán Tối ưu bầy đàn đa mục tiêu (MOPSO) được áp dụng nhằm đồng thời tối thiểu hóa hai mục tiêu: chi phí xây dựng móng và độ lún của móng. Thông qua quá trình phân tích, nhóm tác giả đã xây dựng được tập nghiệm Pareto, thể hiện mối quan hệ tối ưu giữa hai mục tiêu trên. Kết quả thu được cung cấp cơ sở

tham khảo quan trọng cho các kỹ sư thiết kế trong việc lựa chọn phương án tối ưu, phù hợp với yêu cầu cụ thể của từng công trình về mặt kỹ thuật và kinh tế.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.89**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Khajehzadeh, M., et al.,(2012). *Optimization of shallow foundation using gravitational search algorithm*. Research Journal Of Applied Sciences, Engineering And Technology, Vol.4(9), pp.1124-1130.
- [2] Azhim, A. and W.A. Prakoso (2019). *Construction cost optimization of shallow foundation for sand soil in Indonesia*. in MATEC Web of Conferences. 2019. EDP Sciences.
- [3] Ghiasi, V. and F. Sohrabi (2022), *Optimization of the Bearing Capacity of Shallow Foundation*. Reliability Engineering and Resilience, Vol.4(2), pp.1-17.
- [4] Moayedi, H. and A. Rezaei (2021). *The feasibility of PSO-ANFIS in estimating bearing capacity of strip foundations rested on cohesionless slope*. Neural Computing and Applications, Vol.33, pp.4165-4177.
- [5] Kumar, D.R., et al.,(2024). *Optimized neural network-based state-of-the-art soft computing models for the bearing capacity of strip footings subjected to inclined loading*. Intelligent Systems with Applications, Vol.21, p.200314.
- [6] Hamrouni, A., B. Sbartai, and D. Dias (2021). *Ultimate dynamic bearing capacity of shallow strip foundations-Reliability analysis using the response surface methodology*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.144: p.106690.
- [7] Cernica, J.N. (1995). *Geotechnical Engineering: Foundation Design*. John Wiley.
- [8] Nguyễn Văn Quảng, N.H.K., Uông Đình Chất (2010). *Nền và móng các công trình dân dụng - công nghiệp*. NXB Xây dựng, Hà Nội.
- [9] Martínez-Cagigal, V., (2025). *Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)*. (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62074-multi-objective-particle-swarm-optimization-mopso>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved April 8.

Ngày nhận bài:	09/04/2025
Ngày nhận bản sửa:	18/04/2025
Ngày duyệt đăng:	19/04/2025