

MÔ HÌNH HỒI QUY ĐA CHIỀU TRONG PHÂN TÍCH SỨC CHỊU NHỎ CỦA TẮM NEO TRONG NỀN SÉT

Nguyễn Đăng Khoa*, Dương Thị Hồng Trang, Hoàng Minh Khôi, Nguyễn Thị Anh, Nguyễn Tiến Thịnh, Phạm Thị Loan, Trần Nguyễn Sơn, Nguyễn Văn Hùng
Trường Đại học Lạc Hồng, số 10, Huỳnh Văn Nghệ, Bửu Long, Biên Hòa, Đồng Nai, Việt Nam
*Liên hệ tác giả: dangkhoa@lhu.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
Ngày nhận: 26/11/2024	Bài báo đề xuất công thức xác định sức chịu nhỏ của tấm neo tròn trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng bằng mô hình hồi quy đa chiều - một phương pháp máy học. Các thông số ảnh hưởng đến sức chịu tải nhỏ tấm neo trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng gồm chiều sâu đặt tấm neo (H), thông số thể hiện sự tính không đồng nhất của nền sét (m), thông số thể hiện tính không đẳng hướng của nền sét (r_e) được đưa vào phân tích bằng mô hình số. Sức chịu nhỏ của tấm neo được phân tích thông qua hệ số không thứ nguyên. Các kết quả của mô hình số sau đó được đưa vào mô hình hồi quy đa chiều. Công thức xác định sức chịu nhỏ của tấm neo tròn trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng bao gồm 3 thông số H , m , r_e từ mô hình hồi quy đa chiều được kiểm chứng với kết quả số. Kết quả cho thấy công thức đề xuất có kết quả tương đồng cao với kết quả số thông số hệ số $R^2= 99.79\%$. Bên cạnh đó, bài báo còn đánh giá tầm quan trọng của các thông số H/D , m , r_e . Kết quả cho thấy thông số H/D là thông số quan trọng nhất, tiếp đến là các thông số r_e , m .
Ngày hoàn thiện: 16/12/2024	
Ngày chấp nhận: 18/12/2024	
Ngày đăng: 15/3/2025	
TỪ KHÓA	
Tấm neo;	
Móng ngoài khơi;	
Nền sét không đồng nhất không đẳng hướng;	
Mô hình NGI-ADP;	
Mô hình MARS.	

MULTIVARIATE ADAPTIVE REGRESSION SPLINE IN ANALYZING THE UPLIFT CAPACITY OF PLATE ANCHOR IN CLAYS

Nguyen Dang Khoa*, Duong Thi Hong Trang, Hoang Minh Khoi, Nguyen Thi Anh, Nguyen Tien Thinh, Pham Thi Loan, Tran Nguyen Son, Nguyen Van Hung
Lac Hong University, No.10, Huynh Van Nghe Str., Buu Long ward, Bien Hoa, Dong Nai, Vietnam
*Corresponding Author: dangkhoa@lhu.edu.vn

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: Nov 26 th , 2024	The paper proposed a correlation equation for determining the uplift capacity of circular anchors in inhomogeneous and anisotropic clays using a multidimensional regression model - a machine-learning approach. Parameters influencing the uplift capacity of the anchor in non-homogeneous, anisotropic clay, including anchor embedment depth (H), the non-homogeneity parameter of the clay (m), and the anisotropy parameter of the clay (r_e), were analyzed using a numerical model. The uplift capacity was evaluated through a dimensionless coefficient. The numerical model results were used as the data f the multidimensional regression model. The formula derived for determining the uplift capacity of circular anchors in non-homogeneous and anisotropic clay, incorporating the three parameters H , m , and r_e , was validated against numerical results. The findings demonstrated a high degree of correlation, with a coefficient of determination $R^2= 99.79\%$. Moreover, the study assessed the relative importance of the parameters H/D , m , and r_e , and the results indicated that H/D is the most critical parameter, followed by r_e and m .
Revised: Dec 16 th , 2024	
Accepted: Dec 18 th , 2024	
Published: Mar 15 th , 2025	
KEYWORDS	
Plate anchor;	
Off-shore foundation; Anisotropic and inhomogeneous clays;	
NGI-ADP model;	
MARS model.	

Doi: <https://doi.org/10.61591/jslhu.21.568>

Avaiable online at: <https://js.lhu.edu.vn/index.php/lachong>

1. GIỚI THIỆU

Các kết cấu ngoài khơi ngày càng được quan tâm ở Việt Nam do tốc độ phát triển về kinh tế và khả năng xây dựng. Việc làm chủ các vùng nước xa bờ ngày càng là nhu cầu thiết thực trong phát triển kinh tế. Việc lựa chọn kết cấu móng cho các công trình ngoài khơi cũng rất cần thiết với các yêu cầu nghiêm ngặt về sức chịu tải. Các loại móng ngoài khơi điển hình như móng giếng chìm, móng neo: dãi tấm neo hình chữ nhật, hình vuông, tấm neo hình tròn. Gần đây, sự phát triển của tấm neo hình tròn đạt được nhiều sự chú ý trong thực tế và trong nghiên cứu [1-4] do tính cơ động trong thi công, lắp đặt và khả năng chịu lực. Tuy nhiên, ở Việt Nam vẫn chưa có nhiều nghiên cứu về tấm neo tròn cũng như sức chịu tải của tấm neo tròn.

Nền sét không đồng nhất về sức chống cắt, cụ thể là nền sét có sức chống cắt s_u tăng dần theo độ sâu, Hình 1, đã được đề cập tới trong rất nhiều nghiên cứu trước đây [5-8]. Năm 2018, trong một nghiên cứu của Ukritchon và cộng sự [9], sự thay đổi của sức chống cắt không thoát nước theo độ sâu cũng được tác giả xác định là tăng tuyến tính. Cụ thể, đặc điểm đất được xem xét tương ứng với tuyến tính tăng cường độ cắt không thoát nước theo độ sâu, sức chống cắt không thoát nước S_u ở độ sâu nhất định được xác định bằng hàm số

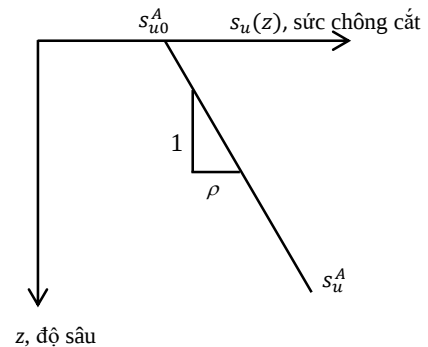
$$S_u = S_{u0} + \rho z \quad (1)$$

trong đó, S_{u0} là giá trị sức chống cắt không thoát nước tại vị trí mặt đất. Giá trị của S_{u0} phụ thuộc vào quá trình địa chất và lịch sử ứng suất của đất sét, ρ là gradient cường độ theo độ sâu z .

Nghiên cứu này cũng đề cập rằng, đối với một nền sét có kết thường, $S_{u0} = 2 \div 15$ kPa và $\rho = 0,8 \div 44$ kPa/m. Lưu ý rằng đối với đất sét ở vùng nước sâu, chẳng hạn như nền sét ở đáy biển cường độ sức chống cắt không thoát nước gần bằng 0 tại vị trí đáy biển ($S_{u0} = 0$ kPa). Sự thay đổi của sức chống cắt không thoát nước theo quy luật sức chống cắt không thoát nước của nền sét tăng tuyến tính theo độ sâu, hay là nền sét không đồng nhất về sức chống cắt không thoát nước (gọi tắt là nền sét không đồng nhất) cũng đã được các nghiên cứu chứng minh có ảnh hưởng đáng kể đến sức chịu tải của nền và các vấn đề ổn định nền trong công trình địa kỹ thuật.

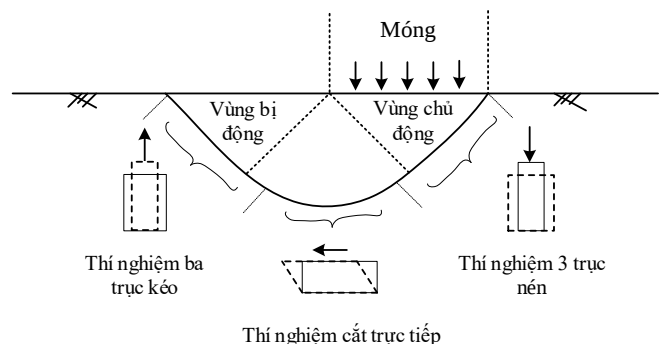
Bên cạnh đó, ở những nghiên cứu gần đây hơn, việc phân tích ứng xử về nền sét không đẳng hướng cũng nhận được nhiều quan tâm [10-15]. Nền sét không đẳng hướng ở đây là nền sét có sức chống cắt s_u theo đổi theo phương chịu lực, như được thể hiện ở Hình 2. Cụ thể hơn, ở các vùng đất chủ động, sức chống cắt của nền sét sẽ phù hợp với sức chống cắt xác định từ thí nghiệm 3 trục nén, vùng đất trung hòa, sức chống cắt sẽ phù hợp với giá trị xác định từ thí nghiệm cắt trực tiếp, và ở vùng đất bị động, sức chống cắt nên được xác định từ thí nghiệm 3 trục nở. Điều này đã được rất nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, cụ thể: Ladd CC và DeGroot DJ [11], Krabbenhoft và cộng sự [12], Grimstad và cộng sự [15]. Hiện nay, đã có các mô hình về phân tích ứng xử của nền sét không đẳng hướng như AUS, NGI-ADP. Tuy nhiên, việc áp dụng phân tích

về sức chịu tải của tấm neo tròn trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng vẫn chưa có nhiều nghiên cứu.



Hình 1. Sức chống cắt tăng theo độ sâu trong nền sét không đồng nhất về sức chống cắt.[16]

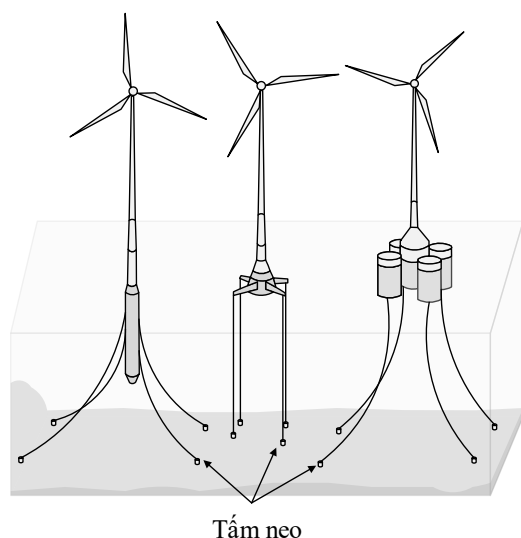
Do đó, bài báo này sẽ tiến hành phân tích sức chịu tải của tấm neo tròn trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng sử dụng mô hình vật liệu NGI-ADP và sự trợ giúp của phần mềm Plaxis 2D V2020. Sức chịu tải của tấm neo được phân tích thông qua hệ số sức chịu tải N . Cụ thể hơn, các thông số thể hiện sự không đồng nhất của nền đất sét (cụ thể sức chống cắt tăng dần theo độ sâu) và thông số thể hiện sự không đẳng hướng của nền đất sét (cụ thể là sức chống cắt thay đổi theo phương chịu lực) sẽ được đưa vào mô hình mô phỏng số để phân tích. Kết quả của bài toán số sẽ được kiểm chứng với nghiên cứu trước đây và được dùng làm dữ liệu đưa vào mô hình hồi quy đa chiều để phân tích độ nhạy của các thông số khảo sát và đề xuất công thức tương quan giữa các thông số khảo sát và kết quả hệ số sức chịu tải.



Hình 2. Sự thay đổi sức chống cắt theo các phương chịu lực khác nhau trong bài toán nền sét không đẳng hướng về sức chịu tải. [16]

2. GIỚI THIỆU VỀ TẤM NEO TRÒN – KẾT CẤU MÓNG NGOÀI KHƠI

Tấm neo thường được sử dụng trên bờ và ngoài khơi để làm nền móng cho các cấu trúc yêu cầu khả năng chống nâng (hoặc thẳng đứng hoặc nghiêng). Chúng bao gồm các giàn khoan nổi ngoài khơi, đường ống chôn lấp, tháp truyền động và tường cọc ván. Hình 3 thể hiện một ví dụ về sử dụng tấm neo cho kết cấu móng điện gió ngoài khơi.



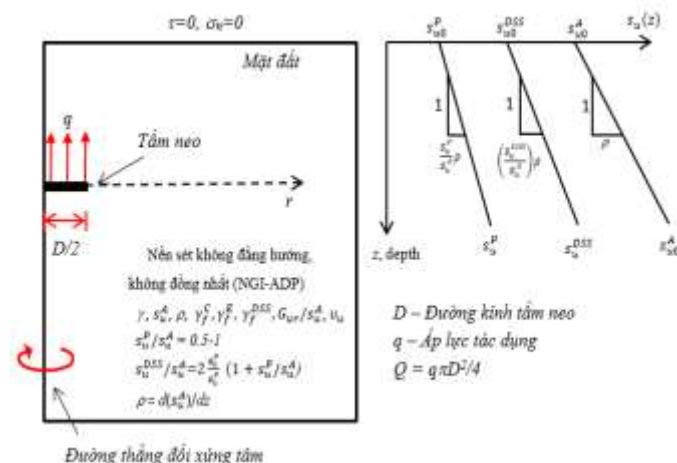
Hình 3. Kết cấu tấm neo chịu nhỏ cho móng ngoài khơi [17]

Các mô neo ngoài khơi và trên bờ rất khác nhau về hình dạng, kích thước, phương thức hoạt động, lắp đặt và sử dụng. Hơn nữa, đây là một giải pháp neo thường dùng cho các cơ sở dầu khí, giàn khoan, hay móng điện gió trên biển vì chúng là một phương pháp hiệu quả để chống lại các thành phần của tải trọng thẳng đứng để neo ở các vùng nước sâu.

3. MÔ HÌNH PLAXIS VÀ KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

3.1 Các trường hợp được phân tích

Trong bài báo này, bài toán tấm neo trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng được thể hiện ở Hình 4. Trong đó, các thông số về nền đất sét không đồng nhất, đường kính tấm neo D và độ chôn tấm neo H được hiện chi tiết.



Hình 4. Thông số bài toán phân tích sức tải tấm neo trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng. [16]

Khả năng chịu lực của tấm neo sẽ được phân tích thông qua phương pháp chuẩn hóa thông số không thứ nguyên được đề xuất bởi Butterfield (1999) [18]. Trong đó, khả năng chịu lực của móng vành khăn trong nền đất không đồng nhất, không đẳng hướng được đánh giá qua giá trị hệ số sức chịu tải không thứ nguyên N , được thể hiện ở công thức bên dưới. Hệ số này cũng được đề cập phân tích trong nghiên cứu của Khatri và Kumar [2] cho trường hợp nền sét không đồng nhất và đẳng hướng.

$$N = \frac{Q}{s_{uo} + H} = f\left(\frac{H}{D}, m = \frac{\rho D}{s_{uo}}, r_e = \frac{s_u^p}{s_u^A}\right)$$

(2)

trong đó, Q là tải trọng tập trung thẳng đứng tác dụng lên tấm neo, Q có giá trị phụ thuộc vào áp lực thẳng đứng đơn vị q , thông số r_e (thông số thể hiện sự không đẳng hướng của sức kháng cắt), m (thông số thể hiện sự không đồng nhất của sức kháng cắt theo độ sâu, hay tên gọi khác là thông số tăng dần sức kháng cắt theo độ sâu) và H/D (tỉ số độ sâu chôn tấm neo và đường kính tấm neo).

Để đánh giá ảnh hưởng của các thông số khảo sát đến hệ số sức chịu tải N , bài báo đã thay đổi các thông số r_e , m , H/D và được cụ thể hóa bởi các phân tích dưới đây:

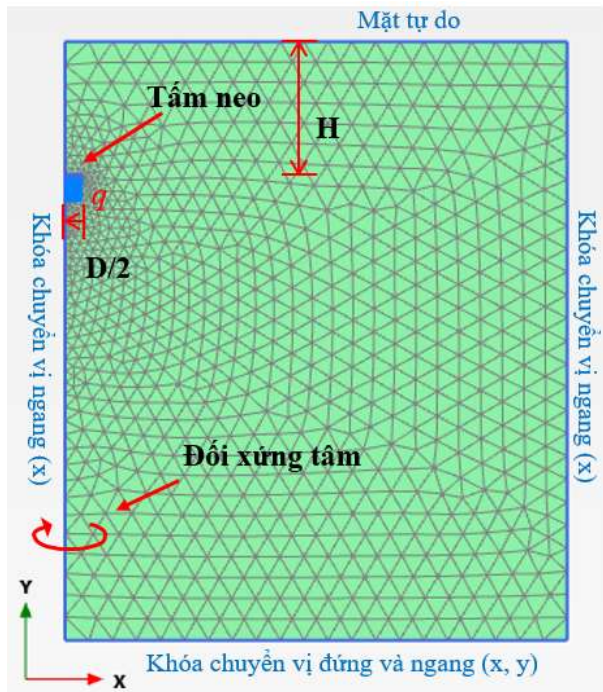
Phân tích ảnh hưởng của sự không đẳng hướng của nền sét đến khả năng chịu lực của tấm neo thông qua sự thay đổi của hệ số r_e . Các hệ số r_e được sử dụng để phân tích gồm $r_e = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1$. Các hệ số này được tham khảo trong các phân tích về nền đất sét không đẳng hướng sử dụng mô hình NGI-ADP từ các nghiên cứu trước đây [19, 20]

Phân tích ảnh hưởng của nền sét không đồng nhất đến khả năng chịu lực của tấm neo thông qua sự thay đổi của hệ số m . Các hệ số m được sử dụng để phân tích gồm $m = 0, 0.4, 1, 2$. Các hệ số này được tham khảo trong các phân tích về tấm neo trong nền sét không đồng nhất của Khatri và Kumar [2]. Hơn thế nữa các trường hợp m này cũng đại diện cho những điều kiện địa chất thực tế.

Phân tích ảnh hưởng của hệ số không thứ nguyên - độ sâu chôn tấm neo và đường kính tấm neo đến khả năng chịu lực của tấm neo thông qua sự thay đổi của hệ số H/D . Các hệ số m được sử dụng để phân tích gồm $H/D = 1, 2, 3, 4, 5, 6$. Các hệ số này được tham khảo trong các phân tích về tấm neo trong nền sét không đồng nhất của Khatri và Kumar [2].

3.2. Mô hình Plaxis

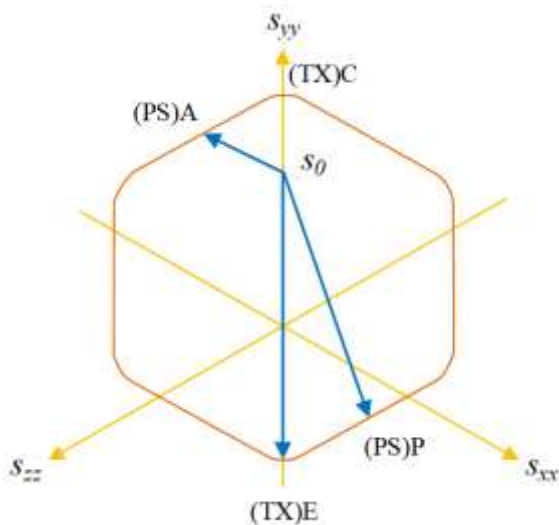
Các bài toán dự định phân tích được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn với sự hỗ trợ của phần mềm Plaxis 2D phiên bản 2020. Mô hình phân tích phần tử hữu hạn bao gồm hai bộ phận là tấm neo và nền. Do tính đối xứng trục trong hình học và tải trọng, mô hình phân tích sẽ được mô phỏng theo bài toán đối xứng tâm, Hình 5. Một tải trọng thẳng đứng hướng lên phân bố đều tác dụng lên tấm neo. Móng và tải trọng tác dụng được đặt theo độ sâu H , với tỷ lệ H/D trong khoảng từ 1-6 như đã mô tả ở phần 3.1. Chi tiết về điều kiện biên của mô hình được thể hiện ở Hình 5. Kích thước của mô hình đã được lựa chọn để bỏ qua những ảnh hưởng của điều kiện biên đến kết quả phân tích. Mô hình vật liệu đất được sử dụng là mô hình NGI-ADP. Sơ bộ về mô hình NGI-ADP sẽ được trình bày ở mục tiếp theo.



Hình 5. Mô hình phân tích tấm neo trong nền sét không đồng nhất không đẳng hướng bằng phần mềm Plaxis 2D, V2020

3.3 Mô hình vật liệu NGI-ADP cho nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng

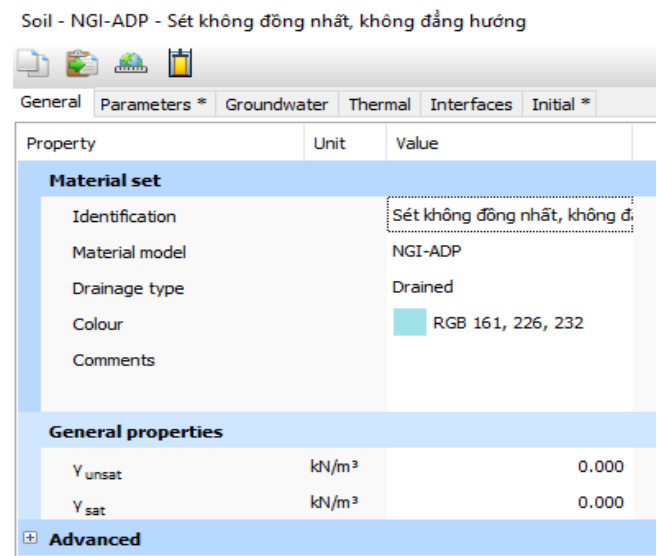
Mô hình NGI-ADP được Grimstad và cộng sự [15] lần đầu tiên đề xuất vào năm 2012. Mặt chảy dẻo trong không gian ứng xử chính của mô hình NGI-ADP được thể hiện ở hình 6. Trong mô hình này, bằng việc nhập các thông số sức kháng cắt S_u khác nhau từ thí nghiệm cắt trực tiếp, thí nghiệm ba trục nén và kéo, có thể xác định được ứng xử không đẳng hướng của nền sét. Hiện nay, mô hình NGI-ADP đã được áp dụng trong rất nhiều nghiên cứu [21-23].



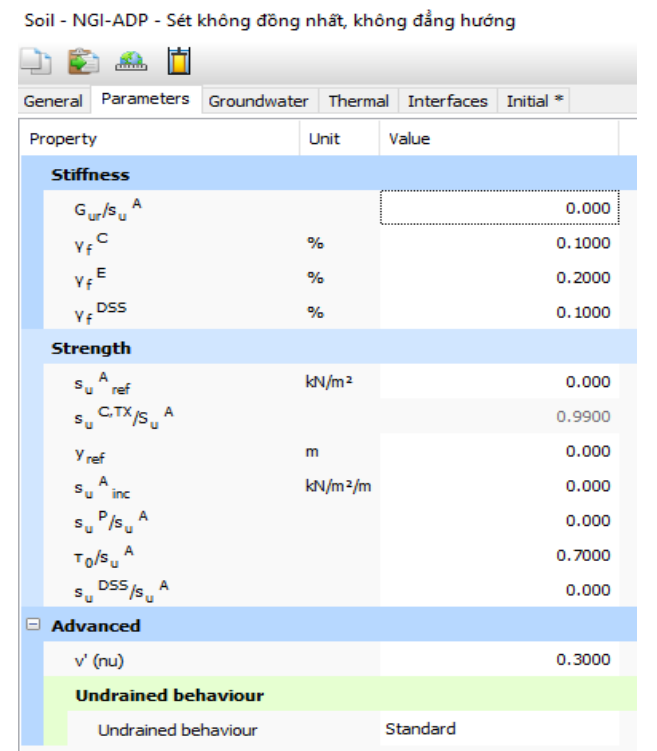
Hình 6. Mặt chảy dẻo trong không gian ứng xử chính của mô hình NGI-ADP [theo Plaxis 2D, V2020]

Trong chương trình phần tử hữu hạn Plaxis 2D V2020 đã cập nhật mô hình vật liệu NGI-ADP trong phân tích các bài toán địa kỹ thuật và giới thiệu chi tiết về các thông số. Trong đó, các thông số cơ bản của mô hình NGI-ADP được thể hiện ở Hình 7, Hình 8. Chi tiết hơn về mô hình

NGI-ADP có thể tham khảo trong phần manual của Plaxis 2D V2020.



Hình 7. Thông số đầu vào mô hình NGI-ADP

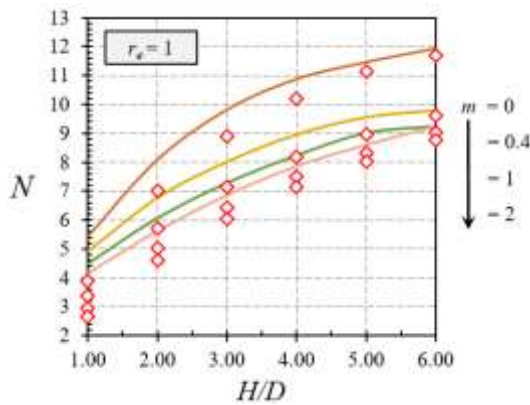


Hình 8. Thông số đầu vào mô hình NGI-ADP (tiếp theo)

3.4 Kết quả phân tích

Các kết quả phân tích của 144 trường hợp được thể hiện ở Bảng 1. Để kiểm tra tính phù hợp của các kết quả phân tích. Kết quả phân tích sẽ được so sánh với trường hợp phân tích tấm neo trong nền đất sét không đồng nhất và đẳng hướng ($r_e = 1$) của Khatri và Kumar [2]. Việc so sánh kết quả phân tích được thể hiện ở hình số 9. Với kết quả thể hiện ở hình 9, ta thấy rằng kết quả phân tích hệ số sức chịu tải N bằng mô hình NGI-ADP cho tấm neo trong nền sét không đồng nhất và đẳng hướng ($r_e = 1$) là tương đồng với kết quả của Khatri và Kumar [2]. Sự tương đồng này được giải thích là do mô hình NGI-ADP sẽ chuyển thành

mô hình Tresca – mô hình được sử dụng trong bài toán phân tích của Khatri và Kumar [2] ứng với trường hợp $r_e = 1$. Điều này cho thấy, kết quả phân tích là phù hợp với nghiên cứu trước đây và có thể mở rộng phân tích cho trường hợp tấm neo trong nền sét không đẳng hướng. Lưu ý rằng, việc phân tích cho tấm neo trong nền sét không đẳng hướng bằng mô hình NGI-ADP chưa được thực hiện trước đây, nên bài báo không thể so sánh cho các trường hợp không đẳng hướng ứng với $r_e = 0.4 - 0.8$. Bên cạnh đó, cũng cho thấy sự tối ưu của mô hình NGI-ADP, bên cạnh việc phân tích cho nền sét đẳng hướng còn có thể phân tích cho nền sét không đẳng hướng.



Hình 9. So sánh với nghiên cứu trước đây về phân tích sức chịu tải tấm neo trong nền đất sét không đồng nhất, đẳng hướng.

Bảng 1. Kết quả phân tích các trường hợp

r_e	m	H/D					
		1	2	3	4	5	6
0.4	0	5.444	8.093	9.812	10.870	11.451	11.924
	0.4	4.908	6.771	8.015	8.961	9.559	9.796
	1	4.501	6.068	7.277	8.224	8.996	9.221
	2	4.180	5.630	6.864	7.865	8.602	9.238
0.5	0	4.890	7.272	8.808	9.524	10.168	10.441
	0.4	4.406	6.079	7.200	7.950	8.283	8.687
	1	4.040	5.449	6.520	7.366	7.795	8.248
	2	3.751	5.053	6.166	7.019	7.513	7.987
0.6	0	4.611	6.862	8.304	8.897	9.257	9.536
	0.4	4.155	5.731	6.785	7.455	7.711	8.130
	1	3.808	5.141	6.146	6.853	7.269	7.720
	2	3.535	4.765	5.816	6.601	7.159	7.552
0.7	0	4.333	6.450	7.818	8.227	8.386	8.848
	0.4	3.903	5.390	6.365	6.867	7.161	7.574

	1	3.586	4.829	5.789	6.446	6.893	7.119
	2	3.484	4.477	5.467	6.173	6.767	7.011
0.8	0	4.055	6.043	7.311	7.623	7.878	7.920
	0.4	3.650	5.045	5.960	6.465	6.776	6.962
	1	3.343	4.517	5.426	6.030	6.518	6.737
	2	3.101	4.189	5.120	5.856	6.226	6.584
1	0	3.775	5.629	6.816	7.170	7.384	7.493
	0.4	3.397	4.700	5.585	5.898	6.409	6.574
	1	3.109	4.209	5.068	5.606	6.134	6.292
	2	2.882	3.901	4.783	5.381	5.852	6.213

Trong bài báo này, với mục tiêu là sử dụng mô hình hồi quy đa chiều để đề xuất công thức và xác định độ nhạy của các thông số, nên sẽ không đi sâu vào phân tích kết quả của mô hình số. Việc phân tích kết quả của mô hình số sẽ được thực hiện ở một nghiên cứu khác. Phần kết quả thể hiện trong Bảng 1 sẽ được áp dụng để huấn luyện mô hình hồi quy đa chiều ở phần tiếp theo.

4. MÔ HÌNH HỒI QUY ĐA CHIỀU TRONG PHÂN TÍCH ĐỘ NHẠY CỦA CÁC THÔNG SỐ VÀ ĐỀ XUẤT CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH HỆ SỐ SỨC CHỊU TẢI

Trong phần này, bài báo sẽ sử dụng mô hình hồi quy đa chiều (Multivariate Adaptive Regression Spline – MARS model) để tìm được hàm tương quan giữa các thông số đầu vào (r_e , m , H/D) và thông số đầu ra (hệ số sức chịu tải). Bên cạnh đó, mô hình MARS còn cho thấy được ảnh hưởng của từng thông số đến kết quả đầu ra (hay nói cách khác độ nhạy của các thông số đến kết quả đầu ra). Kết quả phân tích độ nhạy cũng sẽ được trình bày trong phần này.

4.1 Tổng quan về mô hình hồi quy đa chiều

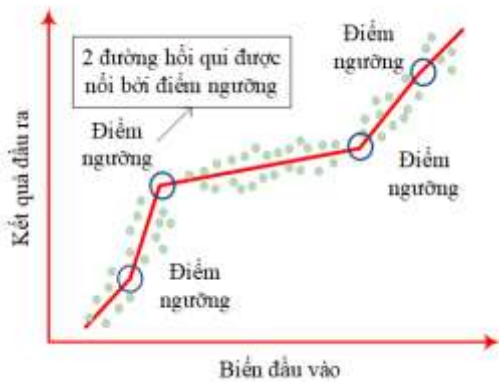
Mô hình hồi quy đa chiều (MARS) do Friedman đề xuất lần đầu tiên vào năm 1991 [24], là một phương pháp học máy trong phân tích dữ liệu. MARS được áp dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật như môi trường, khí hậu [25, 26]. Trong thời gian gần đây, mô hình hồi quy đa chiều đã được áp dụng rộng rãi trong lĩnh vực địa kỹ thuật. Lai và cộng sự [27] đã áp dụng MARS để phân tích độ nhạy của các thông số đầu vào đối với độ lún của móng giếng chìm. Jearsiripongkul et al. [28] đã sử dụng MARS để đề xuất một phương trình mới nhằm xác định khả năng chịu nhỏ của móng hình giếng chìm. Zhang và cộng sự. [29] đã áp dụng MARS để xác định chuyển vị ngang của tường D trong các bài toán hố đào, Raja và cộng sự. [30] đã áp dụng MARS trong phân tích sức chịu tải của nền đất có gia cường vải địa kỹ thuật. Còn ra còn rất nhiều nghiên cứu khác sử dụng mô hình MARS [31, 32]

Ý tưởng của mô hình MARS được thể hiện trong hình 10; trong đó, dữ liệu được phân chia thành nhiều nhóm phù hợp với hồi quy tuyến tính. Quá trình này giúp

chuyển đổi mô hình hồi quy phi tuyến phức tạp thành hồi quy nhiều tuyến tính đơn giản. Ranh giới của mỗi nhóm dữ liệu là cặp điểm ngưỡng. Cặp điểm ngưỡng được xác định bằng thuật toán hồi quy tương thích. Trong mỗi phạm vi dữ liệu, mô hình hồi quy tuyến tính được thực hiện. Các đường hồi quy nối với nhau bằng điểm ngưỡng. Các đường hồi quy có gradient của chúng và được biểu diễn toán học bằng các hàm cơ bản, như được mô tả trong Công thức (3)

$$BF = \max(0, x - t) = \begin{cases} x - t & \text{if } x \geq t \\ 0 & \text{truonghopkhac} \end{cases} \quad (3)$$

trong đó, t là giá trị điểm ngưỡng, x là các thông số đầu vào



Hình 10. Ý tưởng của mô hình hồi quy đa chiều

Thuật toán trong mô hình MARS bao gồm hai bước chính. Thứ nhất, mô hình hồi quy đa chiều tạo ra các hàm tuyến tính cơ bản (hay các mô hình hồi quy tuyến tính) trên toàn bộ dữ liệu. Sau đó, MARS xóa hàm tuyến tính cơ bản kém hiệu quả nhất bằng cách sử dụng thuật toán cắt bỏ dựa trên xác thực chéo tổng quát (GCV) [33, 34]. Cuối cùng, thiết lập một mô hình tối ưu có thể chỉ ra mối quan hệ phi tuyến giữa các biến đầu vào và đầu ra.

Để thiết lập phương trình thể hiện mối quan hệ giữa đầu vào và đầu ra, mô hình hồi quy đa chiều kết hợp tất cả các hàm tuyến tính cơ bản (BFs) được thể hiện ở công thức (3) thành một công thức tổng quát. Dạng của công thức tổng quát này được thể hiện trong Công thức (4), trong đó a_0 là hằng số, N là số BF, g_n là hàm tuyến tính cơ bản (BF) thứ n , a_n là hệ số thứ n của g_n . Lưu ý rằng, việc tăng số lượng phần dữ liệu, hay nói cách khác là số lượng các hàm tuyến tính cơ bản, có thể làm tăng độ chính xác của mô hình hồi quy đa chiều [31-34]

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n g_n(X) \quad (4)$$

4.2 Thu thập dữ liệu cho mô hình hồi quy đa chiều

Để huấn luyện cho mô hình hồi quy đa chiều, bài báo sử dụng kết quả của mô hình mô phỏng số được đề cập tới ở mục 3. Có 144 trường hợp được phân tích bằng mô hình mô phỏng số tương ứng với việc thay đổi các biến không có thứ nguyên đầu vào, tức là $H/D = 1, 2, 3, 4, 5, 6$; $r_c =$

0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1; $m = 0, 0.4, 1, 2$. Tất cả dữ liệu của các biến đầu vào và số ổn định đầu ra được nhập vào mô hình hồi quy đa chiều.

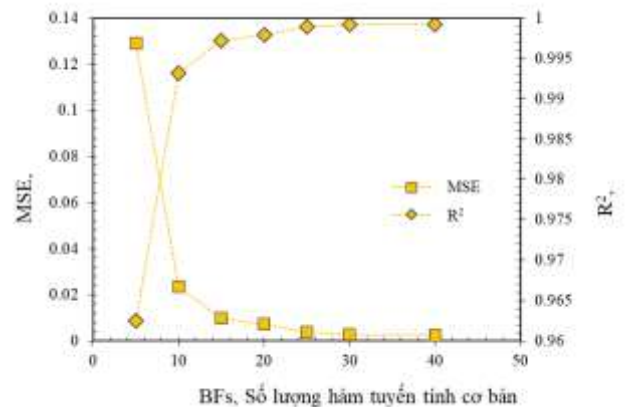
4.3 Kết quả phân tích của mô hình hồi quy đa chiều

Như đã trình bày trước đó, số lượng của hàm tuyến tính cơ bản có thể làm tăng độ chính xác của mô hình hồi quy đa chiều. Trong nghiên cứu này, mô hình hồi quy đa chiều tối ưu được chọn bằng cách thay đổi số lượng hàm tuyến tính cơ bản. Hai tiêu chuẩn thống kê, sai số trung bình bình phương (MSE) và hệ số tương quan bội số (R^2) được sử dụng để kiểm tra hiệu suất của các mô hình hồi quy đa chiều. Trong đó, R^2 nằm trong phạm vi từ 0 đến 1. R^2 gần bằng 1 có nghĩa là sự đồng ý chính xác giữa giá trị dự đoán và giá trị mục tiêu thu được trong khi R^2 gần 0 có nghĩa là ngược lại. MSE được sử dụng để xác định sai số giữa giá trị dự đoán và giá trị mục tiêu. Giá trị MSE nhỏ hơn cho thấy mô hình có độ chính xác cao hơn. MSE có thể được xác định bằng phương trình dưới đây:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2 \quad (5)$$

trong đó, n là số lượng mẫu và $(y'_i - y_i)$ là kết quả của giá trị dự đoán trừ đi giá trị mục tiêu.

Như thể hiện trong Hình 11, MSE và R^2 thay đổi do sự thay đổi của số lượng chức năng cơ bản. MSE giảm trong khi R^2 tiến tới 1 khi số lượng hàm tuyến tính cơ bản tăng. Các biến thể của MSE và R^2 trở nên ổn định khi số chức năng cơ bản là 40. Vì vậy, mô hình MARS với 40 BF được sử dụng cho phân tích tiếp theo.



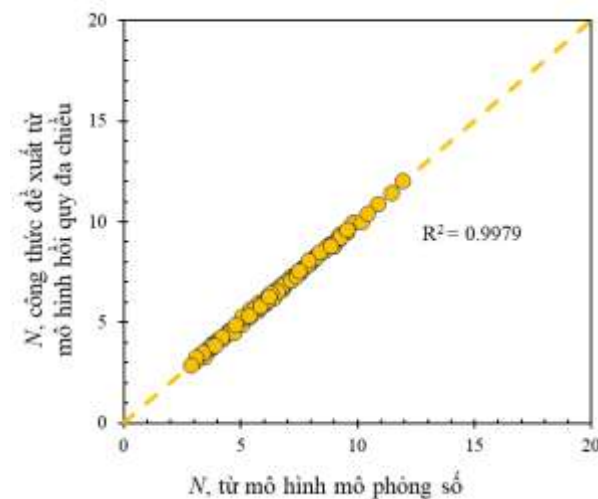
Hình 11. Ảnh hưởng của số lượng hàm tuyến tính cơ bản đến sự thay đổi giá trị MSE và R^2

Dựa trên mô hình hồi quy đa chiều tối ưu, một phương trình cho thấy mối quan hệ giữa các biến đầu vào được khảo sát và số sức chịu nhỏ N được biểu thị bằng phương trình (6). Các hàm tuyến tính cơ bản được chuẩn bị trước trong Bảng 2. Để xác minh tính chính xác của phương trình đề xuất, bài báo tiến hành so sánh giữa sức chịu tải từ mô hình hồi quy đa chiều và các kết quả từ mô hình mô phỏng số trước đó.

Kết quả so sánh được thể hiện trong Hình 12. Như kết quả, có thể thấy rằng kết quả xác định sức chịu tải từ mô hình hồi quy đa chiều và kết quả mô phỏng số là tương đồng nhau. Điều này có nghĩa là phương trình đề xuất có

thể được áp dụng để xác định sức chịu nhỏ của tấm neo trong nền đất sét không đồng nhất không đẳng hướng. Điều quan trọng cần lưu ý là phương trình đề xuất là gần đúng với giá trị của tham số trong các khoảng được khảo sát, như được trình bày trong Bảng 1. Kết quả có thể không chính xác với giá trị đầu vào nằm ngoài phạm vi.

$$N = 5.51159 - 1.01078 \times BF2 + 4.00597 \times BF3 - 0.399542 \times BF4 + 2.69391 \times BF5 - 0.602835 \times BF7 + 0.589906 \times BF8 - 1.83751 \times BF9 + 1.461 \times BF11 + 0.886002 \times BF12 - 0.780114 \times BF14 + 0.40639 \times BF16 - 1.08863 \times BF19 + 0.854428 \times BF20 \quad (6)$$



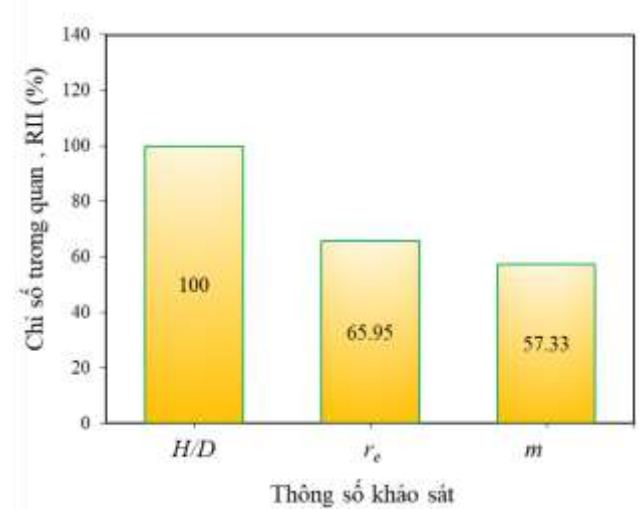
Hình 12. So sánh giữa hệ số sức chịu tải từ dự đoán của mô hình hồi quy đa chiều và kết quả của quá trình mô phỏng số

Bảng 2. Các hàm tuyến tính cơ bản

BF	Equation
BF1	$\max(0, H/D - 3)$
BF2	$\max(0, 3 - H/D)$
BF3	$\max(0, r_e - 0.4)$
BF4	$\max(0, m - 0.4)$
BF5	$\max(0, 0.4 - m)$
BF7	$\max(0, 4 - H/D) \times BF3$
BF8	$\max(0, H/D - 2) \times BF5$
BF9	$\max(0, 2 - H/D) \times BF5$
BF11	$\max(0, 1 - m) \times BF3$
BF12	$\max(0, r_e - 0.5) \times BF8$
BF14	$\max(0, H/D - 3) \times BF4$
BF16	$\max(0, r_e - 0.6) \times BF1$
BF19	$\max(0, 2 - H/D) \times BF11$
BF20	$\max(0, m - 0.0000000596046)$
$N = 5.51159 - 1.01078 \times BF2 + 4.00597 \times BF3 - 0.399542 \times BF4 + 2.69391 \times BF5 - 0.602835 \times BF7 + 0.589906 \times BF8 - 1.83751 \times BF9 + 1.461 \times BF11 + 0.886002 \times BF12 - 0.780114 \times BF14 + 0.40639 \times BF16 - 1.08863 \times BF19 + 0.854428 \times BF20$	

Như đã trình bày trước đó, mô hình hồi quy đa chiều còn có thể xác định tầm ảnh hưởng của các thông số đến kết quả đầu ra. Trong bài báo này, ảnh hưởng của các thông số đầu ra được thể hiện thông qua hệ số tương quan (*RII*). Giá trị *RII* tương ứng cho ba thông số khảo sát là *H/D*, *r_e*, *m* được thể hiện ở Hình 13. Trong đó, *RII* là 100% chỉ ra rằng biến tương ứng là quan trọng nhất. Theo kết quả trong Hình 13, *H/D* là tham số quan trọng nhất với *RII* = 100%. Các thông số *r_e* và *m* ít ảnh hưởng hơn với *RII*

tương ứng là 65.95% và 57.33%. Từ kết quả này cho thấy, các thông số *H/D*, *r_e*, *m* là cần được quan tâm và đưa vào phân tích sức chịu tải của tấm neo trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng.



Hình 13. Kết quả khảo sát ảnh hưởng của các thông số khảo sát đến kết quả hệ số sức chịu tải thông qua hệ số *RII* từ mô hình hồi quy đa chiều

5. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất công thức xác định hệ số sức chịu tải của tấm neo trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng bằng mô hình hồi quy đa chiều. Kết quả cho thấy công thức đề xuất từ mô hình hồi quy đa chiều cho kết quả chính xác cao với kết quả mô phỏng số với $R^2 = 99.79\%$. Từ đó, công thức này có thể áp dụng để xác định sức chịu nhỏ của tấm neo trong nền sét không đồng nhất, không đẳng hướng. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng thể hiện tầm ảnh hưởng của các thông số khảo sát *H/D*, *r_e*, *m* đến giá trị hệ số sức chịu tải *N*. Kết quả cho thấy, thông số *H/D* có tầm ảnh hưởng nhất, kế đến là các thông số *r_e* và *m*.

6. TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Merifield, R.S., Sloan, S.W., Yu, H.S.: Stability of plate anchors in undrained clay. *Geotechnique* 51(2), 141–153, **2001**.
- [2] Khatri, V.N., Kumar, J.: Vertical uplift resistance of circular plate anchors in clays under undrained condition. *Comput. Geotech.* 36(8), 1352–1359, **2009**.
- [3] Pandey, A., & Chauhan, V. B. Evaluation of pull-out capacity of helical anchors in clay using finite element analysis. In *Geo-Congress 2020: Modeling, Geomaterials, and Site Characterization* (pp. 60-68). Reston, VA: American Society of Civil Engineers, **2020**
- [4] Lai, Ying, Bin Zhu, Yunhan Huang, and Chuan Chen. "Behaviors of drag embedment anchor in layered clay profiles." *Applied Ocean Research* 101, **2020**, 102287.
- [5] Xiao, Z., Fu, D., Zhou, Z., Lu, Y., & Yan, Y. Effects of strain softening on the penetration resistance of offshore bucket foundation in nonhomogeneous clay. *Ocean Engineering*, 193, **2019**, 106594.
- [6] Keawsawasvong, S., & Ukritchon, B. Design equation for stability of a circular tunnel in anisotropic and heterogeneous clay. *Underground Space*, 7(1), 76-93, **2022**.
- [7] Ouahab, M. Y., Mabrouki, A., Frank, R., Mellas, M., & Benmeddour, D. Undrained bearing capacity of strip footings under inclined load on non-homogeneous clay underlain by a

- rough rigid base. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(2), 1733–1745, **2020**
- [8] Li, Sen, Jian Yu, Maosong Huang, and C. F. Leung. "Upper bound analysis of rectangular surface footings on clay with linearly increasing strength." *Computers and Geotechnics* 129, **2021**, 103896.
- [9] Ukritchon, B., Panuvat Wongtoythong, Keawsawasvong, S.: New design equation for undrained pullout capacity of suction caissons considering combined effects of caisson aspect ratio, adhesion factor at interface, and linearly increasing strength. *Applied Ocean Research*. 75, 1–14, **2018**.
- [10] Casagrande, A., Carillo, N.: Shear failure of anisotropic soils. *Contributions to Soil Mechanics (BSCE)* 1941–1953, 122–135, **1944**
- [11] Ladd CC, DeGroot DJ.: Recommended practice for soft ground site characterization, Arthur Casagrande Lecture. In *Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Cambridge, (**2003**)
- [12] Krabbenhoft, K., Galindo-Torres, S.A., Zhang, X., Krabbenhoft, J.: AUS: anisotropic undrained shear strength model for clays. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 43(17), 2652–2666, **2019**.
- [13] Yang, X.L., Du, D.C.: Upper bound analysis for bearing capacity of nonhomogeneous and anisotropic clay foundation. *KSCE J. Civ. Eng.* 20(7), 2702–2710 (**2016**)
- [14] Van Qui Lai; Banyong Rungkhun, and Suraparb Keawsawasvong. "Stability of Limiting Pressure Behind Soil Gaps in Contiguous Pile Walls in Anisotropic Clays." *Engineering Failure Analysis* (**2022**): 106049.
- [15] Grimstad, G., Andresen, L., & Jostad, H. P. NGI-ADP: Anisotropic shear strength model for clay. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 36(4), 483–497, **2012**
- [16] Asim, Taimoor, Sheikh Zahidul Islam, Arman Hemmati, and Muhammad Saif Ullah Khalid. "A Review of Recent Advancements in Offshore Wind Turbine Technology." *Energies* 15, no. 2 (**2022**): 579.
- [17] Keawsawasvong, Suraparb. "Bearing capacity of conical footings on clays considering combined effects of anisotropy and non-homogeneity." *Ships and Offshore Structures* (**2021**): 1–12.
- [18] Lai, Van Qui, Dang Khoa Nguyen, Rungkhun Banyong, and Suraparb Keawsawasvong. "Limit analysis solutions for stability factor of unsupported conical slopes in clays with heterogeneity and anisotropy." *International Journal of Computational Materials Science and Engineering* (**2021**): 2150030.
- [19] Zhang, Wengang, Runhong Zhang, Chongzhi Wu, Anthony TC Goh, and Lin Wang. "Assessment of basal heave stability for braced excavations in anisotropic clay using extreme gradient boosting and random forest regression." *Underground Space* (**2020**).
- [20] Zhang, Runhong, Chongzhi Wu, Anthony TC Goh, Thomas Böhlke, and Wengang Zhang. "Estimation of diaphragm wall deflections for deep braced excavation in anisotropic clays using ensemble learning." *Geoscience Frontiers* 12, no. 1 (**2021**): 365–373.
- [21] Li, Yongqin, and Wengang Zhang. "Investigation on passive pile responses subject to adjacent tunnelling in anisotropic clay." *Computers and Geotechnics* 127 (**2020**): 103782.
- [22] Friedman, J.H.: Multivariate adaptive regression splines. *Ann. Stat.* 19, 1–67 (**1991**).
- [23] Yang, C–C., S. O. Prasher, R. Lacroix, and S. H. Kim. "Application of multivariate adaptive regression splines (MARS) to simulate soil temperature." *Transactions of the ASAE* 47, no. 3: 881 (**2004**).
- [24] Deo, Ravinesh C., Ozgur Kisi, and Vijay P. Singh.: Drought forecasting in eastern Australia using multivariate adaptive regression spline, least square support vector machine and M5Tree model. *Atmospheric Research* 184 149–175 (**2017**).
- [25] Lai, F., Zhang, N., Liu, S., Sun, Y., Li, Y.: Ground movements induced by installation of twin large diameter deeply-buried caissons: 3D numerical modeling. *Acta Geotech*, 16, 2933–2961 (**2021**).
- [26] Thira Jearsiripongkul., Van Qui Lai., Suraparb Keawsawasvong., Thanh Son Nguyen., Chung Nguyen Van., Chanachai Thongchom and Peem Nuaklong.: Prediction of Uplift Capacity of Cylindrical Caissons in Anisotropic and Inhomogeneous Clays Using Multivariate Adaptive Regression Splines, *Sustainability* **2022**, 14, 4456.
- DOI: <https://doi.org/10.3390/su14084456>
- [27] Zhang, W., Zhang, R., Wang, W., Zhang, F., Goh, A.T.C.: A multivariate adaptive regression splines model for determining horizontal wall deflection envelope for braced excavations in clays. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 84, 461–471 (**2019**).
- [28] Raja, M.N.A., Shukla, S.K.: Multivariate adaptive regression splines model for reinforced soil foundations. *Geosynth. Int.* 28, 368–390 (**2021**).
- [29] Lai, V. Q., Banyong, R., & Keawsawasvong, S. Undrained sinkhole collapse in anisotropic clays. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(8), 1–13. (**2022**)
- [30] Yodsomjai, W., Lai, V. Q., Banyong, R., Chauhan, V. B., Thongchom, C., & Keawsawasvong, S. A machine learning regression approach for predicting basal heave stability of braced excavation in non-homogeneous clay. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(9), 1–14. (**2022**)
- [31] Sirimontree, S., Jearsiripongkul, T., Lai, V.Q., Eskandarinejad, A., Lawongkerd, J., Seehavong, S., Thongchom, C., Nuaklong, P. and Keawsawasvong, S.: Prediction of Penetration Resistance of a Spherical Penetrometer in Clay Using Multivariate Adaptive Regression Splines Model. *Sustainability*, 14(6), p.3222, (**2022**)
- [32] Caraka, R.E., Chen, R.C., Bakar, S.A., Tahmid, M., Toharudin, T., Pardamean, B.: Employing Best Input SVR Robust Loss Function with Nature-Inspired Metaheuristics in Wind Speed Energy Forecasting. *IAENG Int. J. Comput. Sci.* **2020**, 47, 572–584 (**2020**).