

Định lượng tính không đồng nhất không gian của chỉ số nén lún Cc tại Thành phố Hồ Chí Minh bằng phương pháp Universal Kriging

Trịnh Thị Anh Đào^{1,3}, Nguyễn Thành Tâm^{2,3}, Phạm Nguyễn Linh Khánh^{1,3,*}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹Khoa Kỹ thuật và Quản lý Xây dựng, Trường Đại học Quốc tế, ĐHQG-HCM, Việt Nam

²Khoa Xây dựng, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM, Việt Nam

³Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Liên hệ

Phạm Nguyễn Linh Khánh, Khoa Kỹ thuật và Quản lý Xây dựng, Trường Đại học Quốc tế, ĐHQG-HCM, Việt Nam

Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Email: pnlinhkh@hcmu.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 31-01-2026
- Ngày sửa đổi: 27-07-2026
- Ngày chấp nhận: 21-08-2026
- Ngày đăng: 03-09-2026

DOI : <https://doi.org/10.32508/vnuhcmj-et.v9i3.1573>



Check for updates

Bản quyền

© Tạp chí ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

TÓM TẮT

Cấu trúc địa chất phức tạp và tính không đồng nhất cao của các tầng trầm tích tại thành phố Hồ Chí Minh (Tp. HCM) gây ra nhiều khó khăn cho việc dự báo chỉ số nén lún (Cc) bằng các phương pháp truyền thống. Thí nghiệm nén cố kết trong phòng chỉ cung cấp thông tin rời rạc tại từng vị trí khảo sát, trong khi các công thức thực nghiệm thường được thiết lập cho những điều kiện địa chất cụ thể nên khó mở rộng cho quy mô đô thị. Nghiên cứu này ứng dụng phương pháp địa thống kê Universal Kriging (UK) nhằm mô hình hóa sự biến thiên không gian của Cc dựa trên bộ dữ liệu gồm 3394 mẫu khảo sát tại 55 hố khoan địa chất, phân bố ở độ sâu từ 10 m đến 50 m. Hiệu năng của mô hình được đánh giá nghiêm ngặt thông qua các chỉ số MAE, MSE, và MAPE với quy trình phân tách dữ liệu 80/20. Kết quả đánh giá cho thấy sự phân hóa hiệu năng rõ rệt theo chiều sâu: các mô hình phi tuyến (Gauss và Spherical) đạt độ chính xác cao nhất tại các tầng đất nông (10 – 20 m) với MAPE từ 58.1%, trong khi mô hình tuyến tính thể hiện ưu thế vượt trội tại các tầng sâu (40 m) với MSE đạt mức thấp nhất 0.003. Xu hướng giảm sai số theo chiều sâu phản ánh mức độ đồng nhất hóa cao hơn của các thành tạo trầm tích cổ so với các lớp trầm tích trẻ nằm phía trên. Việc tích hợp kết quả nội suy trên nền tảng GIS đã tạo ra hệ thống bản đồ phân vùng nén lún trực quan, hỗ trợ đắc lực cho công tác quy hoạch hạ tầng và giải quyết các bài toán địa kỹ thuật tối ưu tại các khu vực có địa chất phức tạp.

Từ khóa: Chỉ số nén lún Cc, Universal Kriging, Địa thống kê, Biến thiên không gian, Địa chất TP.HCM, GIS

GIỚI THIỆU CHUNG

Quy hoạch và quản lý hạ tầng tại các đô thị lớn có tốc độ phát triển nhanh như Thành phố Hồ Chí Minh (Tp.HCM) đòi hỏi nguồn thông tin địa chất tin cậy cao và phản ánh đầy đủ sự biến thiên theo bán không gian của khu vực. Trong số các tham số địa kỹ thuật, chỉ số nén lún Cc đóng vai trò then chốt trong việc đánh giá lún cố kết dài hạn và lựa chọn giải pháp nền móng phù hợp. Theo Bộ Xây dựng Việt Nam, chi phí xây dựng nền móng chiếm khoảng 15–25% tổng chi phí công trình và có thể tăng đáng kể đối với các khu vực có nền đất yếu. Do quá trình lún cố kết thường kéo dài trong nhiều năm, việc dự báo chính xác đặc tính nén lún ở quy mô khu vực không chỉ ảnh hưởng đến an toàn công trình mà còn tác động trực tiếp đến hiệu quả kinh tế và tính bền vững của các dự án hạ tầng đô thị.

Việc đặc trưng hóa chỉ số nén lún Cc ở quy mô khu vực hiện vẫn là một thách thức. Các phương pháp truyền thống dựa trên thí nghiệm nén cố kết trong phòng (oedometer) cung cấp thông tin chi tiết tại từng điểm khảo sát, nhưng gặp hạn chế lớn khi mở rộng sang quy mô vùng do thời gian thí nghiệm kéo dài và chi phí cao. Trong khi đó, các công thức thực nghiệm

thường được xây dựng cho những điều kiện địa chất cụ thể, khiến khả năng áp dụng bị suy giảm trong bối cảnh địa chất đô thị phức tạp và không đồng nhất, mà Tp.HCM là một ví dụ điển hình cho thách thức này. Đáng chú ý, nhiều nghiên cứu và ứng dụng thực tế vẫn dựa trên các cách tiếp cận giản lược như sử dụng giá trị trung bình hoặc hồi quy đơn giản, vốn bỏ qua mối tương quan không gian và tính liên tục của các tham số địa kỹ thuật. Theo lý thuyết biến vùng hóa, các tính chất đất nền không biến thiên ngẫu nhiên mà có cấu trúc không gian xác định; các giá trị tại những vị trí gần nhau có xu hướng tương đồng hơn so với các vị trí ở xa^{1,2}. Tính liên tục này được đặc trưng định lượng thông qua hàm bán biến thiên, cho phép mô tả sự phụ thuộc theo khoảng cách³. Việc không mô hình hóa cấu trúc này có thể dẫn đến các đánh giá lún mang tính rời rạc, tiềm ẩn sai lệch và thiếu cơ sở định lượng về độ tin cậy của ước tính.

Trong những thập kỷ gần đây, phương pháp địa thống kê Kriging đã được phát triển và ứng dụng rộng rãi như một công cụ hiệu quả để xử lý các dữ liệu có tương quan không gian. Với tư cách là một bộ ước lượng tuyến tính không chệch tốt nhất (Best Linear Unbiased Estimator – BLUE)⁴, Kriging cho phép

Trích dẫn bài báo này: Đào T T A, Tâm N T, Khánh P N L. Định lượng tính không đồng nhất không gian của chỉ số nén lún Cc tại Thành phố Hồ Chí Minh bằng phương pháp Universal Kriging. VNUHCM J. Eng. Technol. 2026; 9(3):3255-3266.

nội suy tối ưu các biến vùng hóa có phân bố không đều⁵⁻⁸. Mặc dù Kriging đã được ứng dụng thành công trong nhiều lĩnh vực như thủy văn, địa chất môi trường và khí tượng⁹⁻¹⁴, phần lớn các nghiên cứu địa kỹ thuật đô thị vẫn dừng lại ở việc áp dụng Kriging thông thường (Ordinary Kriging – OK), với giả định giá trị trung bình cục bộ không đổi³. Giả định này có thể phù hợp đối với các biến ngẫu nhiên thuần túy, nhưng trở nên hạn chế khi áp dụng cho các tham số cơ lý của đất, vốn thường chịu ảnh hưởng rõ rệt của chiều sâu và cấu trúc địa tầng. Khác với các phương pháp nội suy truyền thống như Inverse Distance Weighting (IDW) hay Radial Basis Function (RBF), vốn gán trọng số dựa trên hàm toán học cố định và khoảng cách Euclidean, Universal Kriging (UK) là phương pháp địa thống kê thuộc nhóm Best Linear Unbiased Estimator (BLUE). Điểm ưu việt của UK nằm ở khả năng phân tách biến vùng hóa thành hai thành phần: xu hướng xác định đại diện cho biến thiên quy mô lớn và phần dư ngẫu nhiên phản ánh các biến động cục bộ. Việc mô hình hóa cấu trúc tự tương quan không gian thông qua hàm variogram cho phép UK xử lý hiệu quả tính phi dừng của dữ liệu, đặc biệt trong trường hợp tồn tại hiện tượng “drift” theo chiều sâu như đối với chỉ số Cc tại Tp.HCM. Tuy vậy, các nghiên cứu áp dụng UK cho chỉ số nén lún Cc ở quy mô đô thị còn tương đối hạn chế. Bên cạnh đó, các nghiên cứu đánh giá một cách có hệ thống vai trò của mô hình hóa xu hướng trong Kriging đối với độ tin cậy của bản đồ phân bố Cc và khả năng hỗ trợ quy hoạch hạ tầng vẫn chưa nhiều. Vấn đề này đặc biệt đáng chú ý trong bối cảnh các đô thị ven biển có nền địa chất yếu và phân tầng phức tạp, trong đó Tp.HCM là một trường hợp điển hình.

Xuất phát từ khoảng trống nghiên cứu nêu trên, nghiên cứu này ứng dụng UK để phân tích và mô tả sự biến thiên không gian của chỉ số nén lún Cc tại Tp.HCM, dựa trên dữ liệu từ 55 hố khoan địa chất có độ sâu khảo sát từ 10 m đến 50 m, phân bố tương đối đồng đều trên toàn khu vực nghiên cứu. Việc lựa chọn khoảng cách phân tầng 10 m (từ 10 m đến 50 m) được xác lập dựa trên đặc trưng địa tầng thực tế của Tp.HCM và khả năng phân bố dữ liệu hiện có. Trong thực tế, dữ liệu địa chất thu thập từ các hố khoan thường không đồng nhất về độ sâu lấy mẫu, dẫn đến hạn chế khi phân tích ở các khoảng phân tầng nhỏ hơn. Do đó, việc sử dụng khoảng phân tầng 10 m giúp đảm bảo đủ số lượng dữ liệu trong mỗi lớp để xây dựng variogram ổn định, đồng thời phản ánh các đơn vị địa tầng chính của khu vực nghiên cứu, bao gồm các lớp đất yếu ở độ sâu nông và các lớp đất ổn định hơn ở độ sâu lớn hơn, có ý nghĩa quan trọng trong thiết kế nền móng. Điểm mới của nghiên cứu không chỉ nằm

ở việc áp dụng một biến thể Kriging phù hợp hơn với bản chất địa chất của Cc, mà còn ở việc tích hợp kết quả Kriging với hệ thống thông tin địa lý (GIS) nhằm xây dựng bản đồ phân vùng nén lún ở quy mô đô thị. Cách tiếp cận này cung cấp một khung phân tích định lượng và trực quan, cho phép nhận diện các khu vực có nguy cơ lún cao và hỗ trợ hiệu quả cho công tác quy hoạch, quản lý và giảm thiểu rủi ro lún đất tại Tp.HCM.

PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Dữ liệu địa chất khu vực Tp. HCM

Nghiên cứu này xây dựng một cơ sở dữ liệu địa kỹ thuật được thu thập từ 55 lỗ khoan tại Tp.HCM, trong đó vị trí các lỗ khoan được minh họa tại Hình 1. Nhằm đảm bảo tính chính xác của cơ sở dữ liệu và loại bỏ các nhiễu kỹ thuật phát sinh từ quy trình thực nghiệm hoặc ghi nhận dữ liệu, một quy trình kiểm soát dữ liệu nghiêm ngặt đã được áp dụng. Các dữ liệu không phù hợp được sàng lọc dựa trên ba tiêu chí thể hiện ở công thức (1). Cụ thể, phương trình (1a) kiểm tra tính nhất quán của thành phần hạt theo nguyên tắc bảo toàn khối lượng, với sai số cho phép 5% nhằm bù đắp sai số làm tròn. Phương trình (1b) loại bỏ các điểm dữ liệu có bất thường về mặt vật lý (độ rỗng, độ bão hòa và các giới hạn Atterberg), có thể phát sinh từ sai số thí nghiệm. Phương trình (1c) đảm bảo tính nhất quán giữa các quan hệ vật lý của các thông số trạng thái đất. Sau quá trình sàng lọc và loại bỏ các điểm ngoại lai, bộ dữ liệu cuối cùng bao gồm 3.394 mẫu hợp lệ, đảm bảo tính đại diện cho việc xây dựng mô hình dự báo chỉ số nén lún (Cc).

$$|100 - (Gravel + Sand + Silt + Clay)| > 5 \quad (1a)$$

$$|Sr \times e - Gs \times w| > 5 \quad (1b)$$

$$n > 100; Sr = 0, PI = LL - PL < 0 \quad (1c)$$

trong đó w (%) là độ ẩm tự nhiên của đất, Sr (%) là độ bão hòa của đất, e là hệ số rỗng, Gs là tỉ trọng riêng của đất; và LL , PL là các giới hạn Atterberg;.

Mỗi mẫu đất trong tập dữ liệu được đặc trưng bởi các đặc tính cơ lý, bao gồm: w , trọng lượng riêng (ướt γ_w và khô γ_d), Sr , e , các giới hạn Atterberg (LL , PL) và chỉ số nén (Cc). Tập dữ liệu phản ánh điều kiện địa chất đa dạng với biên độ mực nước ngầm dao động từ 0.1 m đến 7.8 m. Trong nghiên cứu này, sự biến thiên đáng kể của w , giới hạn Atterberg và Sr được ghi nhận, phản ánh đặc tính không đồng nhất của cấu trúc đất, trong khi trọng lượng riêng thể hiện sự ổn định tương đối. Các đặc trưng thống kê mô tả, bao gồm phân bố, xu hướng trung tâm và biên độ biến thiên của các thuộc tính trong phạm vi độ sâu từ 10 m đến 50 m, được tổng hợp chi tiết tại Bảng 1.

Bảng 1: Mô tả thống kê của các đặc trưng đầu vào của cơ sở dữ liệu [Nguồn: Nhóm tác giả]

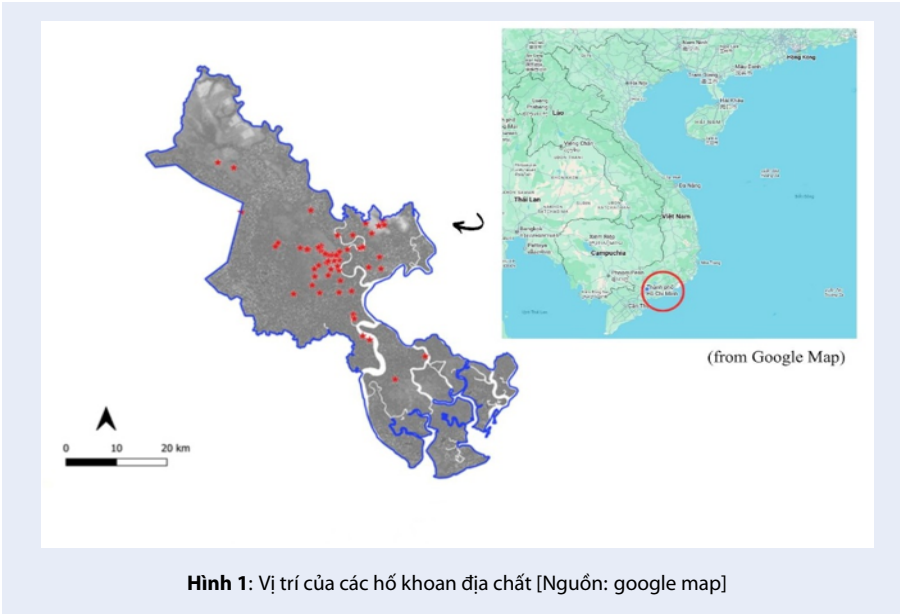
Độ sâu (m)	Đặc trưng thống kê	w (%)	γ_w (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	Gs (g/cm ³)	Sr (%)	e	LL (%)	PL (%)	Cc (cm ² /kG)
10	Trung bình	36.97	1.84	1.38	2.69	88.19	1.07	43.37	22.57	0.40
	Độ lệch chuẩn	26.98	0.24	0.38	0.06	7.66	0.71	18.22	8.94	0.44
	Nhỏ nhất	11.33	1.39	0.71	2.58	63.00	0.46	16.10	12.00	0.04
	Q1 (25%)	19.42	1.53	0.95	2.62	84.08	0.62	28.63	16.93	0.07
	Trung vị	22.63	1.96	1.56	2.69	90.00	0.68	40.50	19.22	0.12
	Q3 (75%)	60.72	2.02	1.68	2.73	94.00	1.77	52.60	27.10	0.78
	Lớn nhất	98.92	2.11	1.84	2.75	98.10	2.71	90.58	51.80	1.25
20	Trung bình	28.98	1.91	1.49	2.67	87.60	0.84	38.27	21.24	0.22
	Độ lệch chuẩn	20.11	0.21	0.32	0.05	7.25	0.53	18.06	8.53	0.30
	Nhỏ nhất	12.05	1.41	0.78	2.59	67.00	0.41	10.10	11.03	0.04
	Q1 (25%)	17.80	1.90	1.23	2.66	83.00	0.56	23.40	14.42	0.05
	Trung vị	20.37	1.98	1.61	2.67	89.80	0.65	34.20	18.10	0.07
	Q3 (75%)	25.33	2.05	1.71	2.72	93.00	0.75	53.50	26.60	0.14
30	Lớn nhất	89.96	2.16	1.88	2.79	98.00	2.43	86.60	46.60	1.21
	Trung bình	24.30	1.94	1.54	2.68	86.77	0.75	35.61	20.20	0.13
	Độ lệch chuẩn	12.76	0.16	0.27	0.03	7.96	0.36	15.51	6.55	0.15
	Nhỏ nhất	10.77	1.46	0.85	2.64	62.00	0.39	17.30	12.77	0.03
	Q1 (25%)	17.06	1.89	1.46	2.65	84.00	0.55	21.42	15.17	0.04
	Trung vị	19.88	1.98	1.64	2.67	89.00	0.62	34.60	18.00	0.06
	Q3 (75%)	25.33	2.05	1.71	2.72	92.00	0.75	48.96	23.60	0.13
	Lớn nhất	71.60	2.12	1.91	2.74	98.90	2.08	73.70	40.00	0.65

Continued on next page

Table 1 continued

Độ sâu (m)	Đặc trưng thống kê	w (%)	γ_w (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	Gs (g/cm ³)	Sr (%)	e	LL (%)	PL (%)	Cc (cm ² /kG)
40	Trung bình	20.72	2.00	1.60	2.67	85.00	0.65	33.19	19.41	0.07
	Độ lệch chuẩn	7.46	0.11	0.22	0.03	9.66	0.19	13.82	5.58	0.04
	Nhỏ nhất	11.25	1.73	1.09	2.65	64.00	0.41	4.90	12.16	0.03
	Q1 (25%)	16.03	1.93	1.56	2.65	79.00	0.53	20.55	15.05	0.04
	Trung vị	18.30	2.02	1.67	2.67	87.20	0.59	32.60	18.60	0.06
	Q3 (75%)	22.34	2.08	1.73	2.67	93.00	0.69	44.36	22.56	0.08
	Lớn nhất	46.55	2.23	1.89	2.74	99.20	1.35	62.36	34.80	0.20
50	Trung bình	21.09	2.01	1.66	2.73	87.26	0.65	38.58	20.82	0.07
	Độ lệch chuẩn	7.50	0.10	0.16	0.04	7.13	0.20	10.87	4.73	0.05
	Nhỏ nhất	11.79	1.75	1.20	2.65	65.00	0.40	19.00	14.20	0.03
	Q1 (25%)	17.01	1.96	1.60	2.72	82.18	0.53	31.32	18.10	0.04
	Trung vị	19.52	2.03	1.70	2.74	89.00	0.60	36.90	20.92	0.05
	Q3 (75%)	21.15	2.06	1.76	2.75	92.63	0.69	46.26	22.69	0.07
	Lớn nhất	45.71	2.15	1.89	2.76	97.00	1.31	62.38	32.95	0.25

Q1 và Q3: phân vị thứ nhất và thứ ba



Sự phân bố C_c theo chiều sâu cùng các đặc trưng thống kê liên quan được minh họa tại Hình 2. Kết quả phân tích cho thấy một xu hướng biến đổi rõ rệt theo cao độ, trong đó giá trị trung bình của C_c tỉ lệ nghịch với độ sâu. Cụ thể, tại các tầng địa chất nông (10–20 m), đất có đặc tính nén lún cao và biên độ biến thiên lớn, phản ánh tính không đồng nhất rõ rệt trong cấu trúc đất. Ngược lại, tại các lớp đất sâu (40–50 m), chỉ số C_c có xu hướng giảm dần và duy trì trạng thái ổn định hơn. Sự biến thiên có hệ thống của giá trị trung bình theo phương đứng cho thấy sự tồn tại của một xu thế chủ đạo (drift), khẳng định tính phù hợp của việc áp dụng phương pháp UK trong nghiên cứu này.

Kriging phổ quát (UK)

UK là một phương pháp ước lượng địa thống kê tối ưu, cho phép mô hình hóa một trường ngẫu nhiên $z(x)$ thông qua việc phân tách thành hai thành phần cấu trúc hai thành phần độc lập. Cụ thể, cấu trúc của mô hình được biểu diễn qua phương trình (2):

$$z(x) = m(x) + \epsilon(x) \quad (2)$$

trong đó, $m(x)$ là thành phần xu thế định tính (deterministic trend) đại diện cho biến thiên quy mô lớn, và x là hàm ngẫu nhiên dư phản ánh các biến động cục bộ và tính phụ thuộc không gian. Thành phần dư này có giá trị trung bình bằng 0 và thỏa mãn tính dừng bậc hai.

Trong công thức (3) ước lượng của UK, giá trị tại vị trí cần dự báo $z^*(x_0)$ được xác định dựa trên điều kiện ước lượng tuyến tính không chệch tối ưu:

$$z^*(x_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} z(x_{\alpha}) \quad (3)$$

Để tối thiểu hóa sai số dưới các ràng buộc không chệch, các trọng số ω_{α} và các nhân tử Lagrange μ_l được xác định thông qua hệ phương trình hệ thống:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n \omega_{\beta} C(x_{\alpha} - x_{\beta}) - \sum_{l=0}^L \mu_l f_l(x_{\alpha}) = C(x_{\alpha} - x_0) \\ \qquad \qquad \qquad \text{với } \alpha = 1 \dots n \\ \sum_{\beta=1}^n \omega_{\beta} f_l = f_l(x_0) \qquad \text{với } l = L \dots n \end{cases} \quad (4)$$

Hệ phương trình (4) được thể hiện dưới dạng ma trận (5) để thuận tiện cho việc tính toán:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{b} \\ \mathbf{F}^T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix} \quad (5)$$

trong đó, $\mathbf{C}$ là ma trận biến lượng giữa các điểm mẫu, $\mathbf{F}$ là ma trận các hàm cơ sở tại vị trí mẫu, $\boldsymbol{\omega}$ là vector trọng số, và $\boldsymbol{\mu}$ là vector nhân tử.

Độ chính xác của mô hình UK phụ thuộc mật thiết vào việc lựa chọn mô hình bán biến thiên (variogram) phù hợp để mô tả cấu trúc không gian của dữ liệu. Ba

mô hình phổ biến thường được áp dụng bao gồm mô hình Gauss, mô hình tuyến tính, và mô hình hình cầu. Mô hình Gauss đặc trưng cho các biến ngẫu nhiên có tính liên tục không gian cao và bề mặt toán học có độ trơn đáng kể. Đồ thị hàm bán biến thiên có dạng parabol gần gốc tọa độ và tiệm cận dần với giá trị ngưỡng (sill) khi khoảng cách tách biệt tăng dần, xác lập giới hạn của sự phụ thuộc không gian trong bộ dữ liệu. Về mặt toán học, hàm bán biến thiên của mô hình Gauss được xác lập thông qua phương trình (6) như sau:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{h^2}{a^2}\right) \right] \quad (6)$$

trong đó h là khoảng cách giữa các điểm, C_0 là hiệu ứng nugget, C là độ sill từng phần, và a là khoảng cách bán biến thiên.

Mô hình tuyến tính (Linear model) phản ánh các trường dữ liệu có tính phi dừng (nonstationarity) rõ rệt, trong đó phương sai biến thiên tăng vô hạn theo khoảng cách (h) mà không tồn tại giá trị ngưỡng cố định. Trong phân tích địa kỹ thuật, việc sử dụng mô hình này hàm ý tầm ảnh hưởng không gian vượt xa phạm vi quan sát của tập dữ liệu hiện hữu. Đặc tính này được mô tả cụ thể bởi phương trình tuyến tính (7):

$$\gamma(h) = C_0 + bh \quad (7)$$

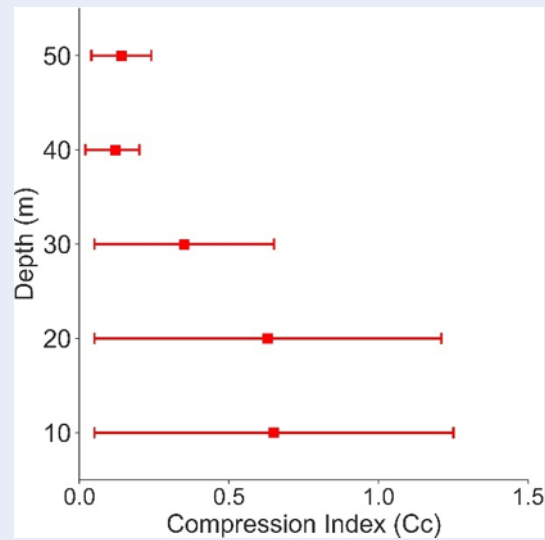
trong đó b là độ dốc của đường thẳng.

Mô hình Cầu (Spherical model) là cấu trúc phổ biến nhất trong thực tiễn địa thống kê nhờ tính tính giản và khả năng tương thích cao với đặc tính biến thiên của nhiều loại dữ liệu tự nhiên. Về mặt hình học, hàm bán biến thiên thể hiện sự gia tăng tuyến tính tại khu vực gần gốc tọa độ, phản ánh tính liên tục ở mức trung bình của trường ngẫu nhiên. Đồ thị sau đó đạt đến giá trị ngưỡng (sill) tại một khoảng cách xác định, được gọi là phạm vi ảnh hưởng, đánh dấu điểm mà tại đó sự tương quan không gian giữa các giá trị dữ liệu không còn tồn tại. Mô hình này được mô tả toán học bằng hàm bán biến thiên phân đoạn tại phương trình (8):

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{nu } 0 < h \leq a \\ C_0 + C & \text{nu } h > a \end{cases} \quad (8)$$

KẾT QUẢ

Quy trình xây dựng mô hình Kriging được triển khai thông qua việc trích xuất các đặc tính phân bố không gian từ cơ sở dữ liệu địa kỹ thuật, xác định là giai đoạn huấn luyện (training phase). Mục tiêu cốt lõi của giai đoạn này là thiết lập khả năng tổng quát hóa (generalization) cao, cho phép mô hình dự báo chính xác các



Hình 2: Mô tả thống kê của hệ số nén lún C_c từ tập dữ liệu [Nguồn: Nhóm tác giả]

giá trị tại những vị trí chưa được khảo sát dựa trên các quy luật đã xác lập.

Để đánh giá hiệu suất mô hình một cách khách quan, bộ dữ liệu được phân tách ngẫu nhiên thành hai tập con độc lập: 80% dữ liệu phục vụ quá trình huấn luyện và 20% dữ liệu dành cho giai đoạn kiểm định (testing phase). Tỷ lệ phân tách 80/20 được lựa chọn nhằm đảm bảo đủ dữ liệu huấn luyện để xây dựng variogram ổn định, đồng thời duy trì tập kiểm chứng có tính đại diện. Các thử nghiệm sơ bộ với các tỷ lệ khác (60/40, 70/30) cho thấy không làm thay đổi đáng kể xu hướng kết quả, tuy nhiên tỷ lệ 80/20 cho độ ổn định cao hơn. Hiệu quả của mô hình UK được đánh giá thông qua các chỉ số thống kê tiêu chuẩn, bao gồm: sai số tuyệt đối trung bình (MAE) (công thức (9a)), sai số bình phương trung bình (MSE) (công thức (9b)), và sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE) (công thức (9c)). Các chỉ số này cung cấp thước đo toàn diện về độ chính xác dự báo và khả năng hội tụ của mô hình để xuất

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (9a)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (9b)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (9c)$$

với y_i là giá trị thực tế tại điểm i , $\hat{y}_i$ là giá trị dự đoán tại điểm i , và n là tổng số điểm dữ liệu.

Kết quả đánh giá tại Bảng 2 và Hình 3 cho thấy hiệu năng dự báo của mô hình UK có sự phân hóa rõ rệt

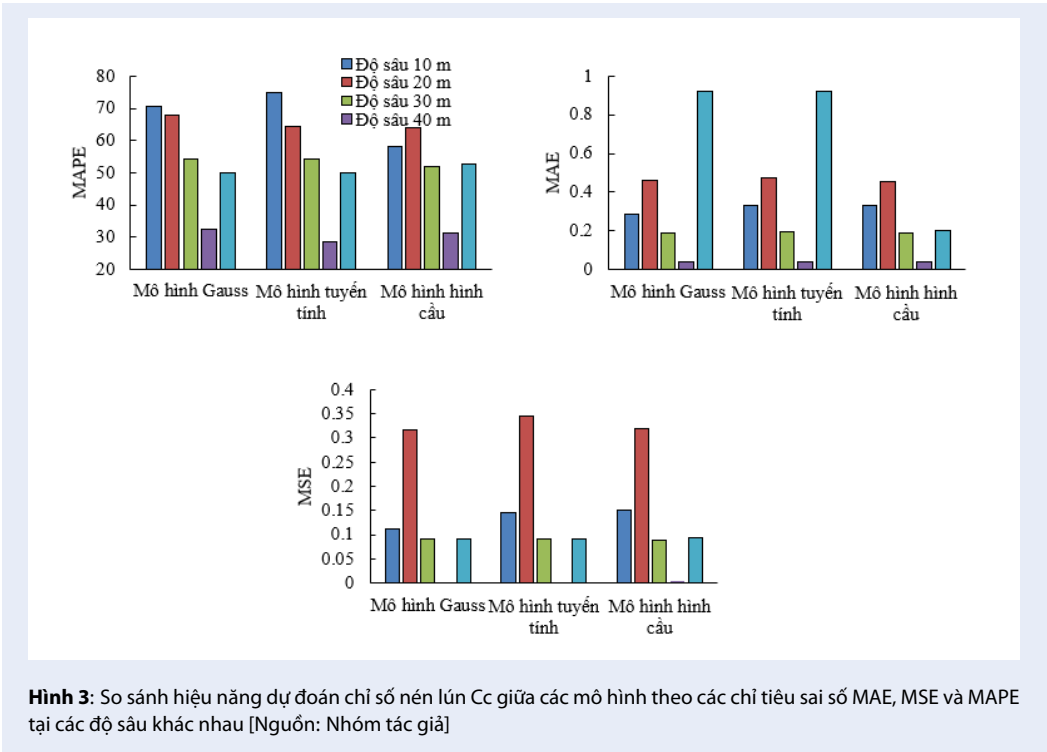
theo chiều sâu địa tầng. Tại các tầng đất nông (10–20 m), mô hình hiệp phương sai phi tuyến như Gaussian và Spherical chiếm ưu thế về độ chính xác. Tại độ sâu 10 m, mô hình hình cầu đạt giá trị $MAPE$ thấp nhất (khoảng 58.2%), so với mô hình Gaussian (70.5%) và tuyến tính (74.8%). Tuy nhiên, khi xét chỉ số MAE và MSE , mô hình Gaussian lại thể hiện sự ổn định hơn ở độ sâu này. Tại 20 m, mô hình hình cầu tiếp tục duy trì hiệu suất tốt với các chỉ số sai số ở mức trung bình so với các mô hình còn lại. Điều này phản ánh sự biến thiên phức tạp và tính không đồng nhất cao của C_c , hệ quả từ tác động mạnh mẽ của các quá trình bồi tích bề mặt và điều kiện hình thành địa chất không ổn định. Tại các tầng đất sâu (30–40 m), sai số dự báo có xu hướng giảm mạnh, minh chứng cho tính dừng bậc hai của hàm ngẫu nhiên dư được đảm bảo tốt hơn ở độ sâu này. Tại độ sâu 30 m, tất cả các mô hình đều ghi nhận sự sụt giảm đáng kể của $MAPE$ (xuống mức 50% – 55%) và MAE (xấp xỉ 0.2).

Đặc biệt ở độ sâu 40 m, mô hình tuyến tính thể hiện ưu thế vượt trội. Trong khi các mô hình Gaussian và hình cầu có xu hướng tăng nhẹ sai số hoặc duy trì ở mức cao ($MAPE$ trên 30%, MAE đạt ngưỡng 0.9), mô hình tuyến tính ghi nhận sai số bình phương trung bình (MSE) đạt mức thấp kỷ lục là 0.003 và MAE xấp xỉ 0.04. Điều này phù hợp với lý thuyết về mô hình tuyến tính khi áp dụng cho các trường dữ liệu có tính phi dừng hoặc xu thế rõ rệt theo phương đứng.

Xu hướng này là minh chứng thực nghiệm cho thấy cấu trúc không gian của các tầng địa chất sâu tại Tp.HCM sở hữu tính ổn định và độ đồng nhất cao hơn so với các lớp trầm tích hiện đại phía trên. Việc

Bảng 2: Kết quả đánh giá hiệu năng hồi quy của mô hình Kriging – UK [Nguồn: Nhóm tác giả]

Độ sâu (m)	Biểu đồ biến dị	MAPE	MAE	MSE
10	Mô hình Gauss	70.461	0.286	0.111
	Mô hình tuyến tính	74.771	0.334	0.145
	Mô hình hình cầu	58.164	0.33	0.152
20	Mô hình Gauss	67.722	0.461	0.317
	Mô hình tuyến tính	64.324	0.475	0.345
	Mô hình hình cầu	63.857	0.456	0.318
30	Mô hình Gauss	54.331	0.191	0.09
	Mô hình tuyến tính	54.183	0.192	0.09
	Mô hình hình cầu	51.961	0.19	0.089
40	Mô hình Gauss	32.623	0.041	0.003
	Mô hình tuyến tính	28.551	0.037	0.003
	Mô hình hình cầu	31.117	0.041	0.004
50	Mô hình Gauss	49.87	0.918	0.09
	Mô hình tuyến tính	49.87	0.918	0.09
	Mô hình hình cầu	52.878	0.203	0.093



Hình 3: So sánh hiệu năng dự đoán chỉ số nén lún Cc giữa các mô hình theo các chỉ tiêu sai số MAE, MSE và MAPE tại các độ sâu khác nhau [Nguồn: Nhóm tác giả]

lựa chọn mô hình bán biến thiên phù hợp với từng khoảng độ sâu là yếu tố tiên quyết để tối ưu hóa trọng số trong hệ phương trình Kriging, từ đó nâng cao độ tin cậy cho các dự báo rủi ro nén lún trong kỹ thuật nền móng.

Sự tương quan hệ thống giữa các chỉ số thống kê định lượng (*MAPE*, *MAE*, *MSE*) và kết quả trực quan hóa không gian trên nền tảng GIS (Hình 4) khẳng định mô hình UK là một công cụ đáng tin cậy trong việc định lượng hóa rủi ro nén lún địa kỹ thuật. Thông qua bản đồ phân vùng, các khu vực có tiềm năng lún lớn được nhận diện rõ rệt bằng dải phổ màu xanh (tương ứng với giá trị *Cc* cao), trong khi các khu vực có đặc tính nén lún thấp được biểu thị bằng dải màu đỏ. Kết quả này không chỉ chứng minh độ tin cậy của mô hình mà còn thiết lập một cơ sở dữ liệu không gian quan trọng, hỗ trợ đắc lực cho công tác quy hoạch và phân vùng rủi ro địa kỹ thuật tại khu vực nghiên cứu.

THẢO LUẬN

Kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu này cho thấy sự tương đồng chặt chẽ với các công bố trước đây^{2,15} về hiệu quả của việc ứng dụng các mô hình hiệp phương sai phi tuyến trong việc mô phỏng sự biến thiên không gian liên tục. Đặc biệt, việc mô hình tuyến tính đạt độ chính xác tối ưu tại các tầng địa chất sâu đã củng cố thêm nhận định xu hướng đồng nhất hóa cấu trúc địa tầng theo chiều sâu¹⁶.

Tính thực tiễn của nghiên cứu được minh chứng qua sự tương thích cao giữa mô hình dự báo và đặc điểm địa chất công trình đặc thù của khu vực Tp.HCM. Hệ thống bản đồ nội suy phản ánh sự phân hóa chỉ số *Cc* hoàn toàn phù hợp với đặc điểm trầm tích Đệ Tứ¹⁷. Cụ thể, các khu vực phía Nam (Cần Giờ, Nhà Bè) ghi nhận giá trị *Cc* cao, tương ứng với các lớp bùn sét yếu thuộc hệ tầng Bình Chánh và Cần Giờ có đặc tính nén lún lớn. Ngược lại, tại khu vực phía Bắc (Củ Chi), mô hình phản ánh chỉ số *Cc* thấp, khớp với đặc điểm nền đất ổn định trên các thành tạo trầm tích cổ thuộc hệ tầng Thủ Đức.

Đặc biệt, kết quả dự báo tại các tầng sâu (30–50 m) cung cấp thông tin hữu ích về sự phân bố không gian của chỉ số nén lún trong các lớp đất chịu lực chính. Tại Tp.HCM, các lớp đất ở độ sâu này thường được xem xét trong các bài toán nền móng và hạ tầng. Kết quả từ mô hình UK, với sai số nhỏ ($MSE \approx 0,003$ tại độ sâu 40 m), cho thấy khả năng mô tả hợp lý sự biến thiên của *Cc* theo không gian. Thông tin này có thể được sử dụng như cơ sở tham khảo để hỗ trợ đánh giá điều kiện nền đất và định hướng công tác khảo sát. Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng các kết quả từ mô hình không thay thế cho các phân tích thiết kế chi tiết, mà đóng vai trò bổ trợ nhằm cung cấp cái nhìn tổng thể

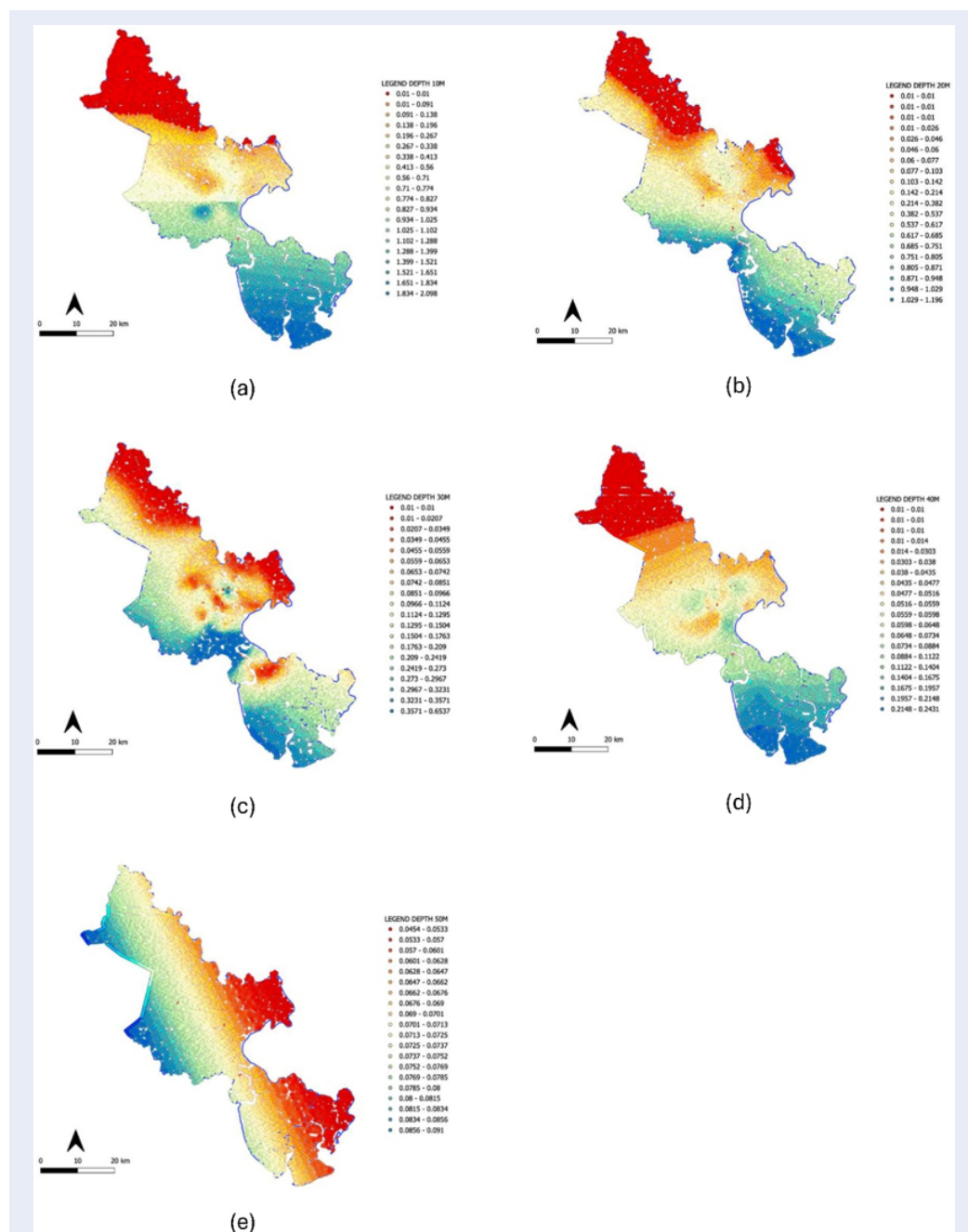
về đặc điểm địa tầng và biến thiên của các thông số cơ lý trong khu vực nghiên cứu.

Đóng góp cốt lõi của nghiên cứu này nằm ở việc thiết lập quy trình dự báo chỉ tiêu cơ lý dựa trên nền tảng địa thống kê hiện đại, thay thế cho các phương pháp nội suy truyền thống vốn hạn chế trong việc xử lý tính phi dừng của dữ liệu. Nghiên cứu không chỉ cung cấp một khung dự báo có độ tin cậy cao mà còn thực hiện trực quan hóa dữ liệu thông qua hệ thống bản đồ số hóa. Đây là nguồn tài liệu quan trọng hỗ trợ các nhà hoạch định chính sách trong việc nhận diện các vùng nguy cơ lún, từ đó tối ưu hóa quy hoạch sử dụng đất và thiết kế hạ tầng bền vững. Việc kiểm soát sai số nghiêm ngặt thông qua các chỉ số *MAE*, *MSE* và *MAPE* giúp mô hình trở thành tài liệu tham khảo có giá trị cho các dự án hạ tầng đô thị tại những khu vực có cấu trúc địa tầng phức tạp. Mô hình Kriging dự đoán chỉ số *Cc* không chỉ giới hạn trong việc tối ưu hóa chiều dài cọc mà còn là công cụ hữu ích cho các kỹ sư trong giai đoạn tiền khả thi để ước tính sơ bộ độ lún của các tầng địa chất, giúp giảm thiểu chi phí khảo sát đại trà mà vẫn đảm bảo độ tin cậy cho nhiều loại hình công trình khác nhau.

Mặc dù đạt được những kết quả khả quan, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế liên quan đến đặc điểm và phân bố dữ liệu khảo sát. Cụ thể, dữ liệu địa chất được tổng hợp từ nhiều hồ sơ khoan với mật độ không đồng đều và độ sâu lấy mẫu không đồng nhất, dẫn đến hạn chế khi phân tích ở các khoảng phân tầng nhỏ hơn. Tại các khu vực có mạng lưới điểm đo thưa thớt, sai số dự báo cục bộ vẫn còn hiện diện và có thể ảnh hưởng đến khả năng mô tả chi tiết biến thiên không gian của các thông số địa kỹ thuật. Bên cạnh đó, phạm vi nghiên cứu hiện mới chỉ tập trung vào chỉ số nén lún *Cc*, chưa xem xét đầy đủ các thông số cơ lý khác của đất nền. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc mở rộng cơ sở dữ liệu với mật độ cao hơn và phân bố độ sâu đồng nhất hơn sẽ cho phép nâng cao độ phân giải không gian của mô hình. Đồng thời, việc tích hợp các phương pháp học máy (Machine Learning) với Kriging đa biến (Co-Kriging) được kỳ vọng sẽ góp phần xây dựng mô hình địa chất 3D hoàn chỉnh, nâng cao độ chính xác và khả năng dự báo cho các đặc trưng địa kỹ thuật phức tạp.

KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chứng minh phương pháp UK là một công cụ dự báo đáng tin cậy cho sự phân bố không gian của *Cc*, trong đó hiệu năng dự báo phụ thuộc chặt chẽ vào việc lựa chọn mô hình bán biến thiên (variogram) phù hợp với đặc tính địa tầng theo chiều sâu. Các kết luận chính của nghiên cứu bao gồm:



Hình 4: Phân hóa không gian của hệ số Cc theo độ sâu (a) 10 m; (b) 20 m; (c) 30 m; (d) 40 m và (e) 50m [Nguồn: Nhóm tác giả]

- Tính thích ứng của mô hình: Tại các tầng địa chất nông (10–20 m), việc kết hợp UK với các mô hình phi tuyến như Gaussian và Spherical đem lại độ chính xác tối ưu nhờ khả năng mô phỏng hiệu quả tính không đồng nhất và các biến thiên phức tạp của lớp đất mặt. Ngược lại, mô hình tuyến tính thể hiện sự ổn định và sai số thấp nhất tại các tầng địa chất sâu hơn (30–50 m), nơi cấu trúc địa tầng có xu hướng đồng nhất hóa.
- Giá trị thực tiễn: Mô hình Universal Kriging trong nghiên cứu này được sử dụng như một công cụ hỗ trợ phân tích ở quy mô khu vực, phục vụ công tác quy hoạch và thiết kế sơ bộ. Mô hình không thay thế công tác khảo sát địa chất (KSĐC) chi tiết tại hiện trường. Giá trị của nghiên cứu nằm ở việc cung cấp thông tin về sự phân bố không gian của chỉ số nén lún Cc, qua đó hỗ trợ nhận diện các khu vực có nguy cơ lún cao và định hướng công tác khảo sát hiệu quả hơn.
- Hướng phát triển: Để khắc phục các hạn chế liên quan đến giả định mô hình và sự phụ thuộc vào mật độ dữ liệu, các nghiên cứu trong tương lai cần mở rộng cơ sở dữ liệu khảo sát, đặc biệt tại các khu vực có địa tầng phức tạp, đồng thời xem xét tích hợp các phương pháp học máy nhằm nâng cao khả năng mô tả và dự báo của mô hình.

ACKNOWLEDGEMENTS

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh (ĐHQG – HCM) trong khuôn khổ đề tài mã số B2026-28-13.

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

BLUE: Bộ ước lượng tuyến tính không chệch tốt nhất
Cc: Chỉ số nén lún
GIS: Hệ thống thông tin địa lý
IDW: Nội suy nghịch đảo khoảng cách có trọng số
KSĐC: Khảo sát địa chất
LL: Giới hạn chảy
MAE: Sai số tuyệt đối trung bình
MAPE: Sai số phần trăm tuyệt đối trung bình
MSE: Sai số bình phương trung bình
OK: Kriging thông thường
PI: Chỉ số dẻo
PL: Giới hạn dẻo
RBF: Hàm cơ sở bán kính
Tp.HCM: Thành phố Hồ Chí Minh
UK: Kriging phổ quát

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả cam kết không có bất kỳ xung đột lợi ích nào liên quan đến nội dung nghiên cứu và kết quả được công bố trong bài báo “Định Lượng Tính Không Đồng Nhất Không Gian Của Chỉ Số Nén Lún Cc tại Thành Phố Hồ Chí Minh Bằng Phương Pháp Universal Kriging”.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Trịnh Thị Anh Đào: thu thập và kiểm soát chất lượng cơ sở dữ liệu địa kỹ thuật, xây dựng mô hình Universal Kriging, thực hiện nội suy không gian và biên soạn bản thảo ban đầu.

Nguyễn Thành Tam: tham gia thiết kế phương pháp luận, kiểm chứng mô hình bán biến thiên, phân tích và thảo luận kết quả, rà soát và hiệu chỉnh bản thảo.

Phạm Nguyễn Linh Khánh: đề xuất ý tưởng và định hướng nghiên cứu, giám sát quá trình thực hiện, xây dựng bản đồ phân vùng trên nền tảng GIS, biên tập và hoàn thiện bản thảo, chịu trách nhiệm liên hệ với toà soạn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Matheron G. Principles of geostatistics. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists. 1963;58(8):1246–66. Available from: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>.
2. Webster R, Oliver MA. Geostatistics for environmental scientists. John Wiley & Sons; 2007. Available from: <https://doi.org/10.1002/9780470517277>.
3. Goovaerts P. Geostatistics for natural resources evaluation. Oxford university press; 1997. Available from: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195115383.001.0001>.
4. Negreiros J, Painho M, Aguiar F, Aguiar M. Geographical information systems principles of ordinary kriging interpolator. Journal of Applied Sciences (Faisalabad). 2010;10(11):852–67. Available from: <https://doi.org/10.3923/jas.2010.852.867>.
5. Balasundram SK, Husni MH, Ahmed OH. Application of geostatistical tools to quantify spatial variability of selected soil chemical properties from a cultivated tropical peat. Journal of Agronomy. 2008;7(1):82–7. Available from: <https://doi.org/10.3923/ja.2008.82.87>.
6. Balasundram SK, Mulla DJ, Robert PC. Spatial data calibration for site-specific phosphorus management. International Journal of Agricultural Research. 2007;2(11):888–99. Available from: <https://doi.org/10.3923/ijar.2007.888.899>.
7. Bayraktar H, Turalioglu FS. A Kriging-based approach for locating a sampling site—in the assessment of air quality. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2005;19(4):301–5. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00477-005-0234-8>.
8. Emery X. Simple and ordinary multigaussian kriging for estimating recoverable reserves. Mathematical Geology. 2005;37(3):295–319. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11004-005-1560-6>.
9. Krige DG. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1951;52:119–39.
10. Matheron G. Kriging or polynomial interpolation procedures. CIMM Trans. 1967;70:240–4.
11. Rabah FK, Ghabayen SM, Salha AA. Effect of GIS interpolation techniques on the accuracy of the spatial representation of groundwater monitoring data in Gaza Strip. Journal of Environmental Science and Technology. 2011;4(6):579–89. Available from: <https://doi.org/10.3923/jest.2011.579.589>.

12. Sokouti R, Mahdian MH. Comparative efficacy of some geostatistical methods for the estimation of spatial variability of topsoil salinity; 2009. Available from: <https://doi.org/10.3923/jas.2009.588.592>.
13. Yasrebi J, Saffari M, Fathi H, Karimian N, Emadi M, Baghernejad M. Spatial variability of soil fertility properties for precision agriculture in Southern Iran. *Journal of Applied Sciences (Faisalabad)*. 2008;8(9):1642–50. Available from: <https://doi.org/10.3923/jas.2008.1642.1650>.
14. Smith M, Konrad JM. Assessing hydraulic conductivities of a compacted dam core using geostatistical analysis of construction control data. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011;48(9):1314–27. Available from: <https://doi.org/10.1139/t11-038>.
15. Wackernagel H. *Multivariate geostatistics: an introduction with applications*. Springer Science & Business Media; 2003. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05294-5>.
16. Allard D.J.-P, Chilès, P, Delfiner: *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*; Wiley, 2012; 2013.
17. Võ NL. Nghiên cứu đặc điểm địa kỹ thuật khu vực Thành phố Hồ Chí Minh phục vụ phát triển giao thông ngầm [luận án tiến sĩ]; 2023.

Quantifying the spatial heterogeneity of the compression index C_c in Ho Chi Minh City using Universal Kriging

Trinh Thi Anh Dao^{1,3}, Nguyen Thanh Tam^{2,3}, Pham Nguyen Linh Khanh^{1,3,*}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹School of Civil Engineering and Management, International University, Ho Chi Minh City, Vietnam

²Faculty of Civil Engineering, Ho Chi Minh City University of Technology, Ho Chi Minh City, Vietnam

³Vietnam National University Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Correspondence

Pham Nguyen Linh Khanh, School of Civil Engineering and Management, International University, Ho Chi Minh City, Vietnam

Vietnam National University Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam

Email: pnkhanh@hcmiu.edu.vn

History

- Received: 31-01-2026
- Revised: 27-07-2026
- Accepted: 21-08-2026
- Published Online: 03-09-2026

DOI : <https://doi.org/10.32508/vnuhcmj-et.v9i3.1573>



Check for updates

Copyright

© VNUHCM Journal. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

ABSTRACT

The complex geological structure and the high heterogeneity of the Quaternary sedimentary layers in Ho Chi Minh City (HCMC) pose considerable difficulties for predicting the compression index (C_c) using conventional approaches. Laboratory oedometer tests provide only discrete information at individual investigation points, whereas empirical correlations are usually established for specific geological conditions and are therefore difficult to extend to an urban scale. This study applies the Universal Kriging (UK) geostatistical method to model the spatial variation of C_c , based on a database of 3,394 valid samples extracted from 55 geotechnical boreholes distributed at depths ranging from 10 m to 50 m. Hiệu năng của mô hình được đánh giá nghiêm ngặt thông qua các chỉ số MAE , MSE , và $MAPE$ với quy trình phân tách dữ liệu 80/20. Model performance was rigorously evaluated through the MAE , MSE and $MAPE$ indices using an 80/20 data-splitting procedure. The evaluation results reveal a clear differentiation of performance with depth: the nonlinear models (Gaussian and spherical) achieve the highest accuracy in the shallow layers (10 – 20 m), with the lowest $MAPE$ of approximately 58.1%, whereas the linear model shows a marked advantage at the depth of 40 m, with the lowest MSE of 0.003. The decreasing trend of the prediction error with depth reflects the higher degree of structural homogenization of the older sedimentary formations compared with the younger deposits lying above them. Integrating the interpolation results into a GIS platform has generated visual settlement zoning maps, effectively supporting infrastructure planning and optimizing geotechnical problem-solving in areas with complex geology.

Key words: Compression Index C_c , Universal Kriging, Geostatistics, Spatial Variability, Ho Chi Minh City Geology, Geographic Information Systems (GIS)

Cite this article : Dao T T A, Tam N T, Khanh P N L. Quantifying the spatial heterogeneity of the compression index C_c in Ho Chi Minh City using Universal Kriging. *VNUHCM J. Eng. Technol.* 2026; 9(3):3255-3266.