



Mô phỏng số đánh giá ảnh hưởng của các tham số hình học tới độ lún bề mặt khi thi công hai đường hầm khiên đào song song tại Hà Nội

A numerical approach to evaluating the influence of geometric parameters on surface settlement during the construction of twin shield tunnels in Hanoi

Nguyễn Văn Hùng^{1,*}, Trần Xuân Thành¹, Nguyễn Thị Hương¹

¹Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội

Từ khóa: TÓM TẮT

Hầm TBM
Lún bề mặt
Phương pháp phần tử hữu hạn
Metro Hà Nội
PLAXIS 2D

Sự gia tăng lưu lượng giao thông tại các đô thị lớn đòi hỏi việc xây dựng hàng loạt các hệ thống metro ngầm. Do đó, dự báo độ lún bề mặt khi thi công đường hầm metro đóng vai trò quan trọng trong việc tối ưu hóa thiết kế và giảm thiểu thiệt hại cho các công trình hiện hữu. Bài báo sử dụng mô phỏng số bằng phần mềm Plaxis 2D để phân tích ảnh hưởng của các yếu tố như chiều sâu đặt hầm, khoảng cách giữa hai hầm và đường kính hầm tới độ lún, với dữ liệu địa chất đoạn ngầm Kim Mã - ga Hà Nội, tuyến metro số 3. Kết quả cho thấy, vùng ảnh hưởng lún dao động từ 2D-4D, một số trường hợp độ lún đã vượt ngưỡng cho phép là 15mm khi $V_l=1\%$. Việc sử dụng phần mềm giúp xác định nhanh vùng lún nguy hiểm và hỗ trợ cho thiết kế quan trắc hợp lý. Hàm hồi quy giữa độ lún và các thông số hình học cho kết quả đáng tin cậy, là cơ sở tham khảo cho các trường hợp thi công trong địa tầng tương tự.

Keywords: ABSTRACT

TBM tunnel
Surface settlement
FEM
Hanoi metro
PLAXIS 2D

The increasing traffic volume in major urban areas necessitates the construction of numerous underground metro systems. Therefore, predicting surface settlement during metro tunnel construction plays a crucial role in optimizing design and minimizing damage to existing structures. This study employs numerical simulation using Plaxis 2D software to analyze the effects of various factors such as tunnel depth, spacing between twin tunnels, and tunnel diameter on ground surface settlement, based on geological data from the Kim Ma - Hanoi Station underground section of Metro Line 3. The results show that the settlement influence zone ranges from 2D to 4D, with some cases exceeding the allowable settlement limit of 15 mm when $V_l = 1\%$. The use of simulation software allows for the rapid identification of potential settlement zones and supports reasonable monitoring system design. Regression equations between surface settlement and geometric parameters yield reliable results, serving as a useful reference for similar tunneling conditions in comparable geological settings.

* Nguyễn Văn Hùng, Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội

Email: vanhung.nguyen@vnu.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST140607>

Ngày nhận bài: 16/04/2025; Ngày nhận bài sửa: 23/07/2025; Ngày chấp nhận đăng: 20/10/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/11/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Hiện nay, Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh đang triển khai xây dựng hệ thống metro nhằm giảm áp lực giao thông trên mặt đất. Công nghệ đào hầm bằng khiên đào (TBM) được lựa chọn nhờ hiệu quả cao và khả năng hạn chế tác động đến môi trường xung quanh. Tuy nhiên, trong quá trình thi công, vẫn tồn tại nhiều thách thức, đặc biệt là hiện tượng lún mặt đất – một yếu tố có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến kết cấu và sự an toàn của các công trình lân cận. Do đó, việc nghiên cứu dự đoán mức độ lún mặt đất và đề xuất các giải pháp, giám sát chặt chẽ là rất quan trọng.

Có nhiều phương pháp dự báo lún mặt đất, có thể kể đến một số phương pháp chính như phương pháp phân tích lý thuyết; phương pháp bán thực nghiệm và phương pháp mô hình số, phương pháp mô hình vật lý, phương pháp học máy.

Sử dụng mô hình lý tâm [1], [2], cho độ chính xác cao, tuy nhiên điều kiện địa chất thay đổi dọc tuyến, việc sử dụng mô hình vật lý tốn kém và không mang tính phổ quát. Có thể sử dụng khiên đào TBM đi qua các khu vực lịch sử, công trình có tính chất quan trọng, yêu cầu nghiêm ngặt trong về độ lún.

Phương pháp phân tích lý thuyết được đề xuất qua một số nghiên cứu điển hình như Chow, Loganathan và Poulos [3], [4]. Sử dụng phương pháp giải tích cũng có những hạn chế nhất định do tính phức tạp trong công thức, kết quả dự báo có thể lớn hơn so với thông thường.

Phương pháp sử dụng học máy để phân tích các kết quả thu được từ quan trắc hiện trường [5], [6], từ đó sử dụng các mô hình phù hợp để phân tích đánh giá và đưa ra dự báo cho các dự án có tính tương tự trong tương lai. Phương pháp có thể xem xét được nhiều yếu tố ảnh hưởng đến độ lún bề mặt, tuy nhiên để làm được điều này cần phải có tập dữ liệu đủ lớn, có độ tin cậy cao. Điều này chưa thật sự phù hợp với các khu vực chưa có các dự án thực tế hoặc có nguồn dữ liệu chưa đủ tin cậy để tham khảo và triển khai.

Phương pháp bán thực nghiệm cho phép thu được kết quả nhanh, đơn giản [7], [8], [9]. Tuy nhiên các tham số trong công thức thực nghiệm

cần phải được khảo sát và đánh giá đầy đủ tại dựa trên các kết quả thực nghiệm, gắn liền với địa tầng khu vực thi công đường hầm khiên đào. Do đó thông thường, các tham số trong công thức thực nghiệm cần được hiệu chỉnh qua kết quả quan trắc thực tế và mô hình phần tử hữu hạn.

Với phương pháp phần tử hữu hạn, cũng cho phép dự đoán độ lún bề mặt và phân tích tương tác giữa kết cấu hầm với địa tầng xung quanh [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18]. Mô hình cũng cho phép khảo sát được ảnh hưởng của độ lún tới các công trình lân cận đường hầm trong quá trình thi công. Tuy việc xác định các tham số đầu vào của mô hình cũng có những vấn đề khó khăn. Mặc dù vậy, phương pháp phần tử hữu hạn được đánh giá cao về tính phù hợp trong giai đoạn đầu của dự án. Qua đó, có số liệu để đánh giá được vùng ảnh hưởng và các khu vực có giá trị độ lún lớn, khuyến cáo đối với các công trình lân cận.

Phần lớn các nghiên cứu này hiện tập trung hầu hết vào tuyến metro số 1 của Tp. Hồ Chí Minh, khu vực có điều kiện địa chất đặc thù như lớp đất yếu và mực nước ngầm cao. Do đó, việc áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn để khảo sát trong điều kiện địa chất Hà Nội là cần thiết nhằm đảm bảo độ chính xác trong dự báo độ lún và phạm vi ảnh hưởng. Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn Plaxis 2D, để đánh giá ảnh hưởng các tham số đến độ lún bề mặt khi thi công hai đường hầm khiên đào song song cùng độ sâu với điều kiện địa chất tham khảo tại tuyến metro số 3 Hà Nội.

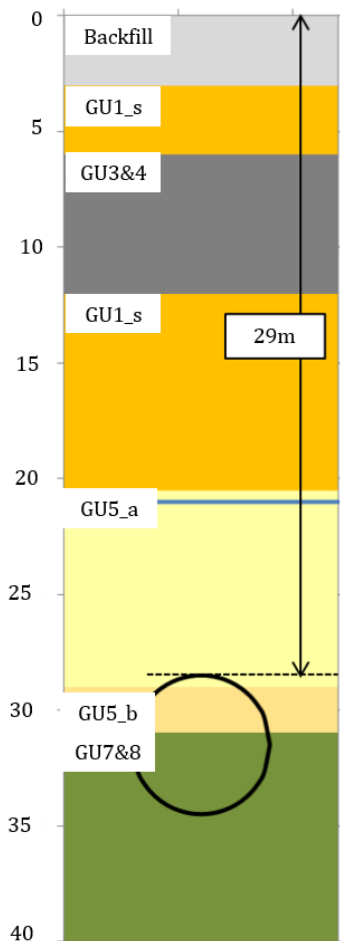
2. Trường hợp nghiên cứu

Địa chất sử dụng trong khảo sát các tham số hình học được tham khảo từ báo cáo địa kỹ thuật của tuyến đường sắt đô thị (ĐSĐT) số 3 Hà Nội (HN). Tuyến ĐSĐT số 3, đoạn Nhổn – ga Hà Nội được khởi công xây dựng từ năm 2009 theo Quyết định số 1970/QĐ-UBND ngày 27/4/2009. Tuyến có chiều dài 12,5km (8,5km đi trên cao và 4km đi ngầm). Tuyến có 12 nhà ga: trong đó: 8 ga trên cao (Nhổn, Minh Khai, Phú Diễn, Cầu Diễn, Lê Đức Thọ, ĐH Quốc gia Hà Nội, Chùa Hà, Cầu Giấy) và 4 ga ngầm (Kim Mã, Cát Linh, Văn Miếu, Ga Hà Nội) [19]. Mặt cắt địa chất trong bài báo, được chọn giữa ga Kim Mã & ga Cát Linh, khu vực bắt đầu

đoạn đường hầm TBM giữa 4 nhà ga ngầm, được thể hiện trong hình 1.

2.1. Điều kiện địa chất

Địa tầng tại khu vực nghiên cứu gồm năm lớp đất chính cụ thể: Lớp đắp (Backfill): Hỗn hợp không đồng nhất cát pha, sét pha; GU1s: Đất sét ít dẻo có trộn một ít bột hoặc sét dẻo; GU3&4: Đất hữu cơ và đất sét; GU5-a: Cát pha hoặc cát bột từ chặt vừa đến chặt; GU5-b: Cát hạt vừa đến chặt; GU7&8: Sỏi cát và sạn rất chặt.



Hình 1. Mặt cắt địa chất tại KM 19+793 tuyến số 3 HN.

Thông số cường độ của các lớp đất tương ứng sử dụng trong mô hình tham khảo từ báo cáo địa chất [20], được dẫn ra trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của các lớp đất.

Thông số	Lớp đất					
	Back fill	GU 1s	GU 3&4	GU 5a	GU 5b	GU 7&8
Mô hình	MC	MC	MC	MC	MC	MC
E (kPa)	10000	20000	5000	40000	50000	100000

Thông số	Lớp đất					
	Back fill	GU 1s	GU 3&4	GU 5a	GU 5b	GU 7&8
ν	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
γ (kN/m ³)	19	18,5	16	20	20,5	21
K_0	0,577	0,58	0,66	0,44	0,43	0,36
γ_{sat} (kN/m ³)	19	18,5	16	20	20,5	21
c (kPa)	15	10	5	0	0	0
φ (°)	25	25	20	33	35	40

2.2. Thông số vỏ hầm

Đường kính hầm (D) được thay đổi với các giá trị lần lượt là 5,0 ÷ 8,0m. Độ sâu đặt hầm cũng được thay đổi trong khảo sát từ 1 ÷ 4D, với D là đường kính ngoài của vỏ hầm sử dụng theo thông số vỏ hầm tuyến đường sắt đô thị số 3 Hà Nội (D=6,3m).

Vỏ đường hầm được mô phỏng bằng phần tử tấm sử dụng mô hình vật liệu đàn hồi tuyến tính. Thông số tính toán của vỏ hầm, trong trường hợp điển hình được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số kỹ thuật của kết cấu hầm TBM.

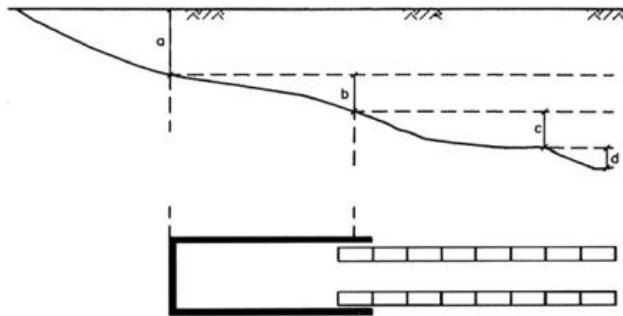
Thông số	Vỏ hầm
Đường kính trong hầm, D_{int} (m)	5,7
Chiều dày vỏ hầm (m)	0,3
Modul đàn hồi, E (kPa)	$3,5 \times 10^7$
Hệ số Poisson, ν	0,2
Trọng lượng riêng, γ (kN/m ³)	25

2.3. Phần trăm mất mát thể tích

Sự lún mặt đất khi thi công khiến đào chủ yếu do mất mát thể tích (volume loss). Khi thi công đào đất, đất xung quanh hầm giải phóng ứng suất do có sự chênh lệch giữa diện tích gương đào và diện tích máy khiên đào & vỏ hầm vĩnh cửu, cũng như quá trình lấp vỏ hầm vĩnh cửu trở hơn. Do đó xảy ra biến dạng hướng tâm và dọc máy khiên đào và vỏ hầm.

Phần trăm thể tích mất mát V_l là tỷ số giữa thể tích đất bị mất xung quanh khoang hầm (V_t so với thể tích đường hầm trên một đơn vị chiều dài.

Tổng thể tích bị mất bao gồm mất mát tại mặt gương đào (a), mất mát dọc theo khiên hầm (b), mất mát tại đuôi khiên (c) và mất mát sau đuôi khiên (d) do vữa co lại và biến dạng của vỏ hầm. Dẫn đến các đoạn lún tương ứng [21], được thể hiện ở Bảng 3.



Hình 2. Lún bề mặt dọc đường hầm khiên đào.

Trong bài báo này, nhóm tác giả thông qua khai báo phần trăm thể tích mất mát để biểu thị quá trình mất mát này. Thông thường, giá trị hao hụt dao động từ 0,5% đến 1,5%, tùy thuộc vào điều kiện địa chất và công nghệ thi công. Khi thi công hầm bằng công nghệ khiên đào, mức hao hụt có thể giảm xuống khoảng 0,5%. Trên cơ sở tham khảo từ một số dự án trên thế giới [22], nhóm tác giả lựa chọn khảo sát với mức thể tích mất mát trong khoảng $V_l = 0,5\%$ đến $V_l = 1\%$. Phần trăm thể tích mất mát trong một số dự án tham khảo được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 1. Cơ sở dữ liệu mất mát thể tích.

Tài liệu tham khảo	Đất	% Thể tích mất mát, V_l	Loại đường hầm
Ledesma and Romero (1997)	Clay with some gravel	1.20%	Barcelona Subway
Mair and Taylor (1997)	Stiff Clay	1.0-2.0%	Open faced method
	Stiff clay	0.5-1.5%	NATM
	Sand	0.5%	Closed faced TBM
	Soft clay	1.0-2.0%	Closed faced TBM
Macklin and Field (1998)	London Clay	2.40%	Full face TBM
Nyren (1998)	Very Stiff London Clay	1.1-1.8%	Jubilee Line Extension, NATM
Sugiyama et al. (1999)	Stiff Clay	<1.0%	Slurry Shield Method
Loganathan et al.(2000)	Sand	0.2-0.6%	TBM Sydney
Cooper et al. (2002b)	Clay	1.3-2.5%	Piccadilly Line Tunnels
Wu and Lee (2003)	Clay	1-2%	Taipei MRT Projects
Coulter and Martin (2006)	Glacial moraine	0.35%	Excavated using a Jet grout
Hunt (2005)	London Clay	1.20%	
Tjie-Liong (2005)	Soft Marine Clay	Up to 3%	EPBM Singapore
	Gravels below water level	0.2%	EPBM Tokyo
Hsiung (2011)	Gravels below water level Sand	0.38-0.53%	Shield machine Bored Tunnels
Zhang et al. (2011)	Old Alluvium	0.1-0.9%	Singapore Circle Line tunnels
Wan et al. (2017)	London clay	0.80%	EPBM London

2.4. Mô hình phần tử hữu hạn

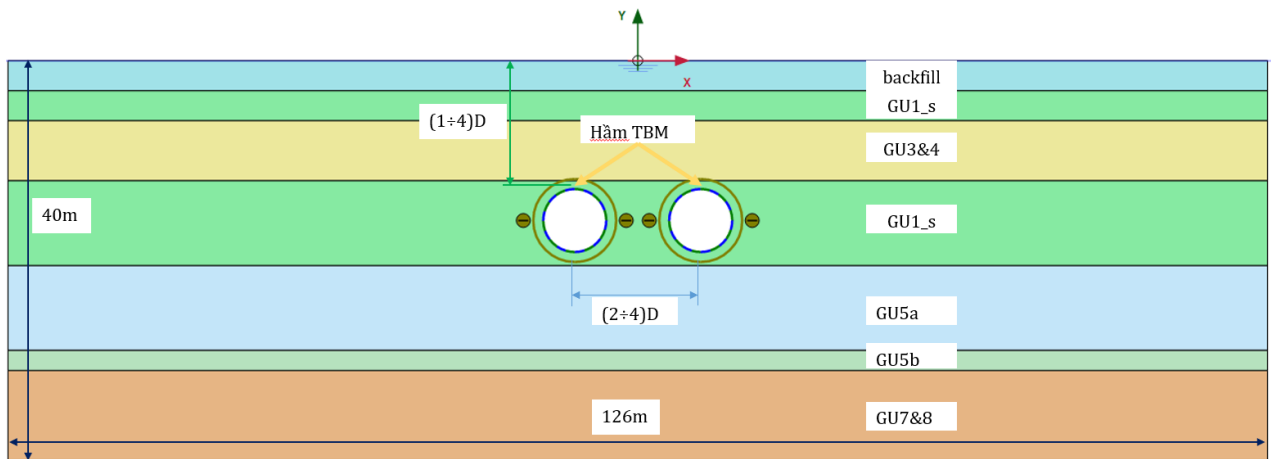
Sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn PLAXIS 2D mô hình quá trình thi công đường hầm. Các lớp địa chất sử dụng mô hình Mohr-Coulomb, vỏ hầm được mô phỏng dạng tấm (phần tử plate). Phần tử tiếp giáp (interface) được sử dụng để mô phỏng

tương tác giữa đất với kết cấu vỏ hầm TBM với số giảm cường độ $R_{inter}=0,67$. Phân bố các lớp đất & kích thước mô hình được thể hiện trong Hình . Kích thước phương ngang của mô hình được xem xét đủ để khoảng cách từ mép đường hầm TBM tới

biên mô hình đảm bảo lớn hơn 5D, theo phương đứng phù hợp với điều kiện địa chất.

Trong khảo sát này, không xem xét đến ảnh hưởng do thay đổi mực nước ngầm tới độ lún bề

mặt. Hai đường hầm được giả thiết thi công đồng thời. Lún bề mặt do thi công đường hầm TBM được mô tả qua các giai đoạn: thiết lập trạng thái ứng suất ban đầu, khởi tạo khoang đào TBM, lắp đặt vỏ hầm & khai báo mất mát thể tích.



Hình 3. Phân lớp địa tầng của mô hình & sự thay đổi các thông số khảo sát.

2.5. So sánh độ lún theo công thức thực nghiệm và mô hình phần tử hữu hạn

Phương pháp thực nghiệm phổ biến để dự báo độ lún bề mặt S khi thi công TBM là dựa trên công thức của Peck [8], [9], giả định có dạng hàm phân phối chuẩn Gauss. Công thức xác định độ lún S_{max} và lún bề mặt theo phương trình (1) sau đây:

$$S = S_{max} \left[e^{-\frac{(x-l/2)^2}{2i^2}} + e^{-\frac{(x+l/2)^2}{2i^2}} \right] \quad (1)$$

Trong đó:

$S_{max} = \frac{V_l \cdot \pi \cdot (\frac{D}{2})^2}{2.5 \cdot i}$ - giá trị độ lún lớn nhất theo phương thẳng đứng dọc đường hầm, m;

V_l - phần trăm mất mát thể tích;

D - đường kính hầm;

$i = k \cdot z_0$ - độ lệch tiêu chuẩn của đường cong tính lún, còn gọi là thông số bề rộng máng lún;

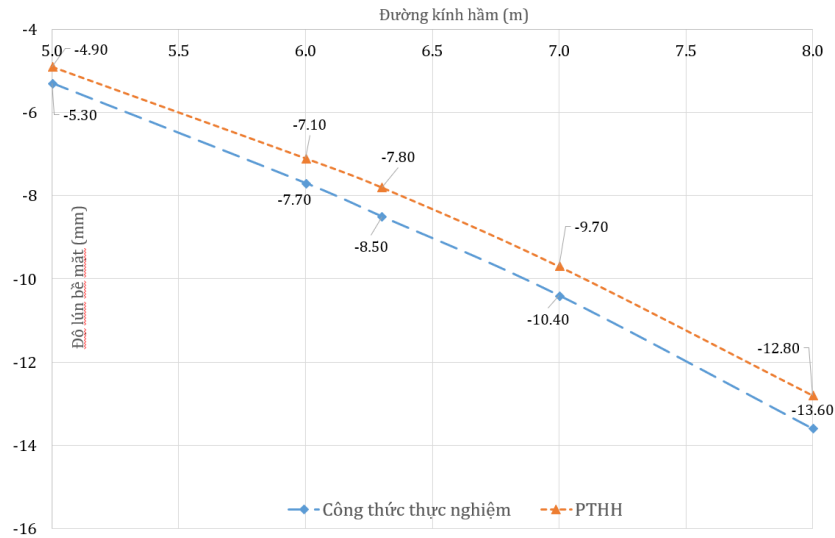
k - tham số chiều rộng vùng lún, phụ thuộc vào điều kiện và loại đất mà được hầm thi công qua;

z_0 - chiều sâu của tim hầm so với mặt đất;

k - hệ số kinh nghiệm phụ thuộc vào từng loại đất.

l - khoảng cách giữa 2 tim hầm.

Hình 4 chỉ ra giá trị độ lún lớn nhất khi thay đổi đường kính được xác định theo hai phương pháp. Giá trị khảo sát: độ sâu hầm $z_0 = 16$ m, khoảng cách giữa hai hầm $d = 12,6$ m và đường kính hầm thay đổi từ 5 đến 8 m.



Hình 4. Biểu đồ so sánh độ lún từ công thức thực nghiệm và mô hình phần mềm.

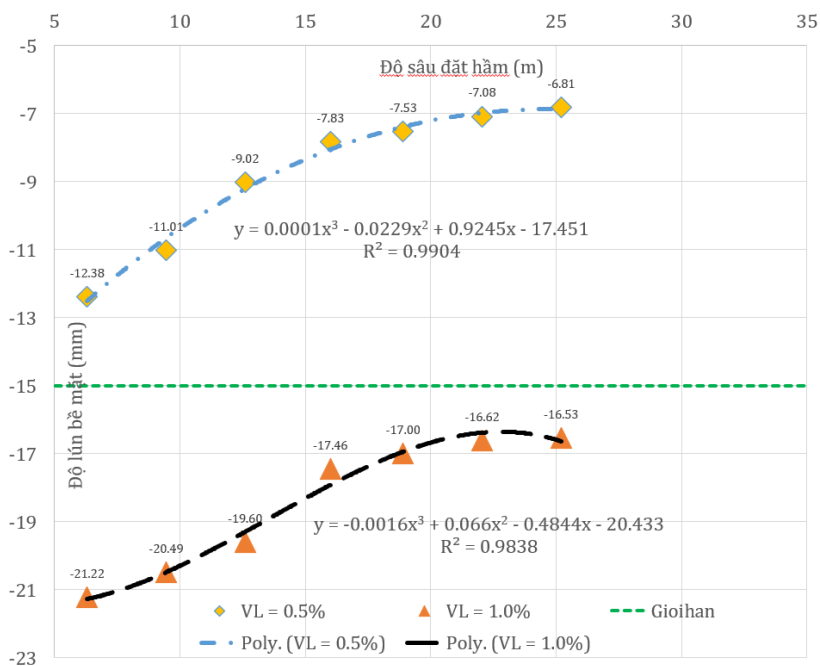
Biểu đồ cho thấy sự tương đồng tương đối giữa kết quả tính độ lún từ công thức thực nghiệm và mô hình phần mềm. Cả hai phương pháp đều thể hiện xu hướng biến đổi gần như đồng nhất, cho thấy tính hợp lý và độ tin cậy của mô hình tính toán được sử dụng. Tuy nhiên, kết quả so sánh cho thấy, giá trị độ lún theo công thức thực nghiệm lớn hơn so với kết quả trên phần mềm PLAXIS. Vì vậy cần xem xét nhiều yếu tố để điều chỉnh các thông số công thức thực nghiệm cho phù hợp với điều kiện áp dụng tại các dự án ở Việt Nam.

3. Khảo sát ảnh hưởng của các tham số

Trong bài báo này sẽ đánh giá sự ảnh hưởng của các tính chất hình học của hầm đến độ lún bề mặt như độ sâu hầm trong khoảng $5 \div 25m$, đường kính hầm trong khoảng $5 \div 8m$ và khoảng cách giữa hai hầm từ $2,0D \div 4D$ (D là đường kính hầm).

3.1. Ảnh hưởng của độ sâu đặt hầm

Khi độ sâu tăng đặt hầm $H = (1 \div 4)D$, độ lún lớn nhất (S_{max}) trên bề mặt giảm dần, thể hiện trong Hình 5. Tỷ lệ giữa H/D càng lớn, giá trị S_{max} của bề mặt càng bé. Tuy nhiên, việc chọn độ sâu quá lớn sẽ gặp khó khăn trong thi công, vì vậy cần cân đối giữa hiệu quả giảm lún và khả năng thi công.



Hình 5. Biểu đồ quan hệ giữa độ lún mặt đất và sự thay đổi chiều sâu đặt hầm.

Từ số liệu tính toán bằng mô hình, thiết lập quan hệ giữa S_{max} và chiều sâu đặt hầm thể hiện qua các đường Poly như trong Hình 3. Phương trình thể hiện mối quan hệ giữa độ sâu đặt hầm và độ lún Max bề mặt khi $V_l=0.5\%$ & $V_l=1\%$ lần lượt qua phương trình (2),(3):

$$y_1 = -0.0001x^3 - 0.0229x^2 + 0.9245x - 17.451 \quad (2)$$

$$y_2 = -0.0016x^3 + 0.066x^2 - 0.4844x - 20.433 \quad (3)$$

Phương trình thể hiện mối quan hệ này là dạng hàm đa thức bậc ba, với hệ số xác định lần lượt là $R^2= 0.9904$ và $R^2= 0.9838$ tương ứng với trường hợp $V_l = 0,5\%$ & 1% , thể hiện mức độ phù hợp tốt của hàm hồi quy.

Có thể thấy giá trị độ lún, khi mất mát thể tích là $V_l = 1\%$, thì độ lún bề mặt S_{max} có thể lớn hơn giá trị độ lún cho phép 15mm [18] được sử dụng với các công trình ngầm ở Việt Nam.

3.2. Ảnh hưởng của đường kính đường hầm

Khi thay đổi đường kính hầm từ $5 \div 8m$, độ lún có xu hướng tăng dần khi đường kính mở rộng, sự thay đổi được thể hiện trong Hình . Độ dốc của đường cong khá đều, phản ánh sự gia tăng ổn định

của độ lún theo kích thước của hầm. Độ lún trong trường hợp $V_l = 1\%$, tăng nhanh hơn so với $V_l = 0.5\%$ thể hiện qua độ dốc đường xu hướng lớn. Phần lớn các giá trị độ lún lớn nhất khi $V_l = 1\%$ vượt quá giá trị lún tuyệt đối giới hạn cho phép [18].

Từ kết quả mô hình, thiết lập mối quan hệ giữa đường kính hầm và độ lún bề mặt, kết quả được chỉ ra trong Hình là các hàm đa thức bậc 2 (Poly $V_l = 0.5\%$ & 1%), lần lượt là phương trình (4) & (5):

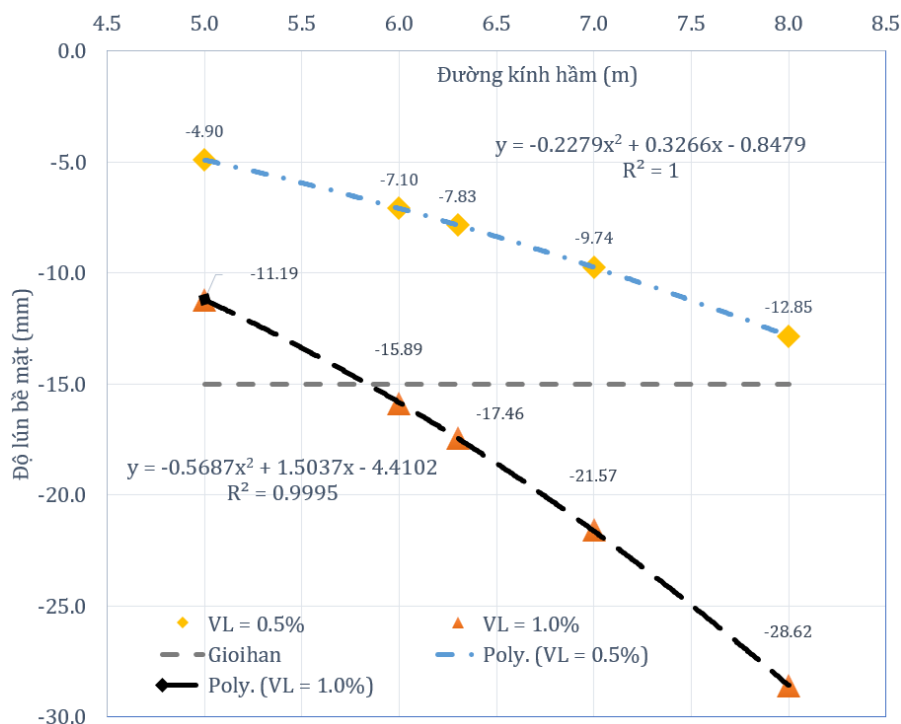
$$y_3 = -0.2279x^2 + 0.3266x - 0.8479 \quad (4)$$

$$y_4 = -0.5687x^2 + 1.5037x - 4.4102 \quad (5)$$

Với tỷ lệ phần trăm phương sai R^2 các mối quan hệ này lần lượt là ~ 1 & 0.9995 với các trường hợp thể tích mất mát $V_l = 0,5\%$ & $V_l = 1\%$. Cho thấy sự phù hợp của hàm hồi quy, có thể sử dụng dự báo độ lún bề mặt trong khoảng khảo sát.

3.3. Ảnh hưởng khoảng cách giữa hai hầm

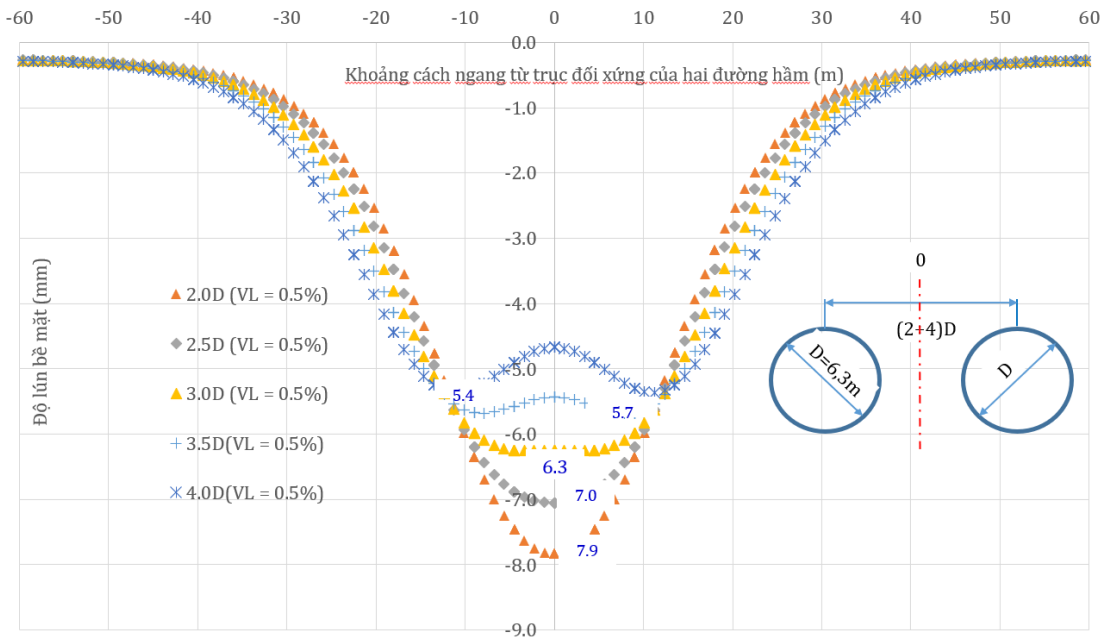
Hình , Hình thể hiện giá trị lún bề mặt khi thay đổi khoảng cách giữa hai hầm tương ứng các giá trị $2 \div 4D$. Kết quả khảo sát lún bề mặt đối với trường hợp $V_l = 0.5\%$ & $V_l = 1\%$ cho kết quả tương đồng nhau.



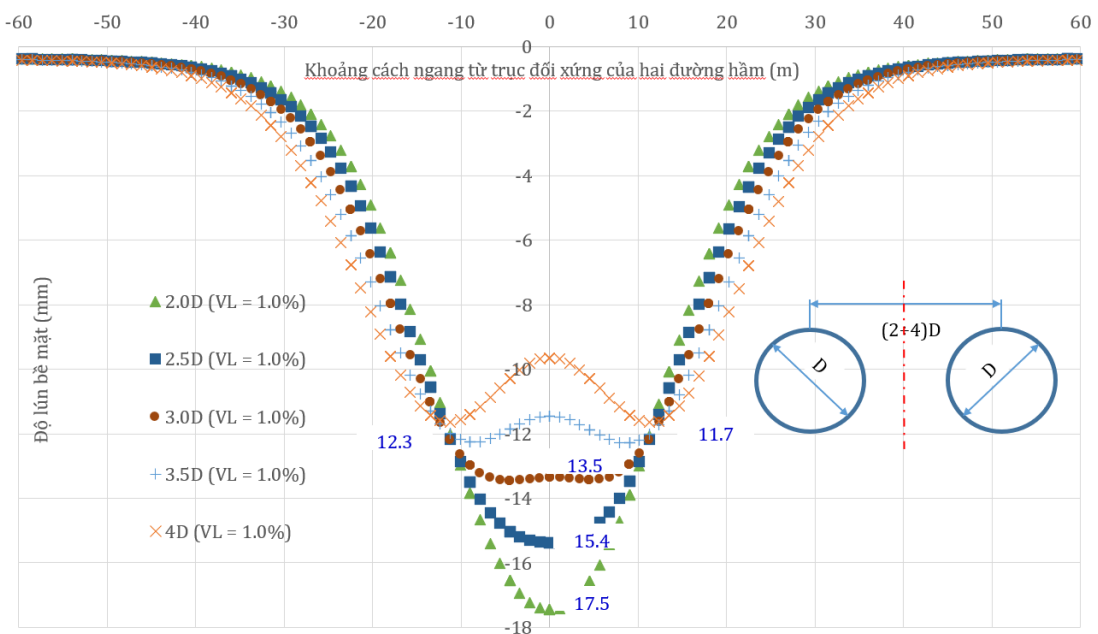
Hình 6. Biểu đồ quan hệ giữa độ lún mặt đất và đường kính đường hầm.

Khi khoảng cách giữa hai hầm tăng lên, sự tương tác và ảnh hưởng lẫn nhau giữa hai hầm giảm đi, dẫn đến độ lún bề mặt cũng giảm. Khi khoảng cách 2 hầm giảm, phễu lún hình thành sâu và hẹp hơn. Phễu lún mở rộng khi khoảng cách hai hầm tăng, ngoài ra giá trị độ lún tại trục đối xứng

giữa 2 hầm đã nhỏ hơn giá trị lún cực đại ($S < S_{max}$). Khoảng cách hai hầm càng lớn, giá trị lệch giữa độ lún tại tim 2 hầm và tại trục đối xứng càng tăng, hình dạng phễu lún chuyển từ đường cong một điểm uốn sang đường cong ba điểm uốn, Hình 7, Hình 8.



Hình 7. Biểu đồ quan hệ giữa độ lún mặt đất và khoảng cách giữa hai hầm tuyến đôi với trường hợp thể tích mất mát $V_l = 0.5\%$.



Hình 8. Biểu đồ quan hệ giữa độ lún mặt đất và khoảng cách giữa hai hầm tuyến đôi với trường hợp thể tích mất mát $V_l = 1\%$.

Khi thay đổi khoảng cách giữa 2 hầm từ $(2 \div 4)D$ ứng với trường hợp $V_l = 0,5\%$ độ lún cực đại bề mặt giảm 31,6%. Tương tự, ứng với $V_l = 0,5\%$, độ lún cực đại bề mặt giảm 32,6%. Qua đồ thị cũng

thấy, độ lún bề mặt cực đại giảm nhanh khi khoảng cách thay đổi từ $2 \div 3D$, thay đổi rất nhỏ từ $3,5 \div 4D$. Ngoài ra, khi khoảng cách giữa hai hầm tăng, khu vực ảnh hưởng của lún bề mặt càng được mở

rộng, tuy nhiên có thể thấy từ khoảng $35 \div 40m$ từ trục đối xứng hai hầm, sự khác lún bề mặt khi thay đổi khoảng cách hai tim hầm không đáng kể. Do đó, để hạn chế độ lún bề mặt, việc lựa chọn khoảng cách giữa hai hầm lớn hơn là hợp lý, nhưng cũng cần cân nhắc về mặt kinh tế và không gian xây dựng.

4. Kết luận và kiến nghị

Việc sử dụng phần mềm phần tử hữu hạn cho kết quả dự báo độ lún bề mặt của đường hầm TBM một cách nhanh chóng. Dựa vào kết quả khảo sát chúng ta có thể đưa ra đánh giá sơ bộ, xác định được vùng ảnh hưởng, khu vực lún có thể gây nguy hiểm cho công trình trên bề mặt. Qua phân tích có thể thấy vùng có thể gây ảnh hưởng tới công trình nằm trong khoảng từ $2D \div 4D$ khi khoảng cách giữa 2 tim hầm tăng, dựa trên kết quả này cho phép thiết kế phạm vi quan trắc lún và xác định các công trình trong phạm vi cần phải theo dõi trong quá trình thi công.

Khi khảo sát sự ảnh hưởng của các yếu tố đường kính hầm đơn, khoảng cách hai hầm, chiều sâu đặt hầm tới độ lún bề mặt, tuy chưa khảo sát được đầy đủ các thông số ảnh hưởng nhưng cũng đã hình thành được bức tranh sơ bộ về sự thay đổi của lún bề mặt trong các trường hợp, từ đó có cơ sở để lựa chọn, điều chỉnh vị trí, khoảng cách giữa hai hầm trên cơ sở đảm bảo các thông số hình học yêu cầu, cũng như để đảm bảo lún bề mặt nằm trong các giá trị cho phép.

Dựa trên kết quả mô phỏng của phần mềm, có thể hình thành các hàm hồi quy biểu diễn mối quan hệ giữa giá trị độ lún bề mặt và các thông số thay đổi như đường kính hầm, khoảng cách giữa hai hầm, chiều sâu đặt hầm. Giá trị R^2 từ những biểu diễn này thể hiện được độ tin cậy của các hàm hồi quy. Điều này có thể là cơ sở tham khảo, để xác định giá trị độ lún bề mặt trong các điều kiện địa tầng tương tự.

Giá trị độ lún cực đại trên bề mặt thu được từ mô phỏng với hai trường hợp $V_l = 1\%$ & $V_l = 0.5\%$, đã có những khoảng giá trị lớn hơn các giá trị cho phép khi thi công đường hầm TBM [17]. Với các giá trị này có thể gây nguy hiểm cho các công trình phía trên bề mặt đất. Do đó, trong quá trình đào hầm, phải dự trù các biện pháp phù hợp: cải

tạo đất; giải pháp chống đỡ, gia cố phù hợp... để đảm bảo an toàn cho kết cấu khu vực lân cận khi thi công đường hầm khiên đào.

Tuy nhiên đây là các kết quả dự báo độ lún, khi chưa xét đến sự có mặt của các công trình bên trên bề mặt đất cũng như các phụ tải khác trên bề mặt. Do đó, từ kết quả này, cần có sự đánh giá cẩn thận ảnh hưởng tới các công trình bên trên theo kết cấu hiện trạng.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Nguyễn Văn Hùng: Phương pháp, Giám sát, Phân tích đánh giá kết quả, Phản hồi ý kiến phản biện, Viết - bản thảo gốc. **Trần Xuân Thành:** Phương pháp, Quản lý dữ liệu, Thu thập số liệu đầu vào, Mô hình bài toán, Phân tích dữ liệu. **Nguyễn Thị Hương:** Thu thập số liệu đầu vào, Quản lý dữ liệu, Phân tích dữ liệu, Chỉnh sửa bản thảo.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Nhóm tác giả tuyên bố không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

1st Nguyen Van Hung*. *VNU University of Engineering and Technology*

2nd Tran Xuan Thanh. *VNU University of Engineering and Technology*

3rd Nguyen Thi Huong. *VNU University of Engineering and Technology*

*Corresponding author:

vanhung.nguyen@vnu.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] S. Divall and R. J. Goodey, "Apparatus for centrifuge modelling of twin tunnel construction," *Int. J. Phys. Model. Geotech.*, vol. 12, no. 3, pp. 102–111, 2012, doi: 10.1680/ijpmg.11.00014.
- [2] R. J. Grant and R. N. Taylor, "Tunnelling-induced ground movements in clay," *Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng.*, vol. 143, pp. 43–55, 2000.
- [3] L. Chow, "The prediction of surface settlements due to tunnelling in soft ground," M.Sc. thesis, University of Oxford, 1994.
- [4] N. Loganathan, H. G. Poulos, and A. Bustos-Ramirez, "Estimation of ground loss during tunnel

- excavations,” presented at the *ISRM Int. Symp.*, Melbourne, Australia, Nov. 2000.
- [5] H. K. Lee, M. K. Song, and S. S. Lee, “Prediction of subsidence during TBM operation in mixed-face ground conditions from realtime monitoring data,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1213, 2021, doi: 10.3390/app112412130.
- [6] M. R. Moghaddasi and M. Noorian-Bidgoli, “ICA-ANN, ANN and multiple regression models for prediction of surface settlement caused by tunneling,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 79, pp. 197–209, 2018, doi: 10.1016/j.tust.2018.04.016.
- [7] E. Bilotta and G. Russo, “Ground movements induced by tunnel boring in Naples,” in *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Viggiani (ed.), London: Taylor & Francis, 2012, pp. 979–986.
- [8] M. P. O’Reilly and B. M. New, “Settlements above tunnels in the UK—their magnitude and prediction,” *Tunnelling 82*, pp. 173–181, 1982.
- [9] R. B. Peck, “Deep excavations and tunnelling in soft ground,” in *Proc. 7th ICSMFE, State-of-the-Art Volume*, Mexico City, pp. 225–290, 1969.
- [10] B. T. Le, N. T. Nguyen, S. Divall, R. J. Goodey, and R. N. Taylor, “Modified gap method for prediction of TBM tunnelling-induced soil settlement in sand—a case study,” in *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Abingdon, UK: Taylor & Francis, pp. 584–589, doi: 10.1201/9780429321559.
- [11] N. V. Hung and N. T. Tam, “Evaluate the influence of excavation geometry of the full-length construction on the longitudinal deformation of the existing tunnel when constructing the excavation using an analytical approach,” *J. Transp. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. 24–32, 2024, doi: 10.55228/JTST.13(3).24-32.
- [12] N. C. Giang, N. T. Phương, and N. T. Long, “Nghiên cứu ảnh hưởng do lún đến Tháp Bút khi thi công tuyến đường sắt đô thị số 2 Hà Nội đoạn ga Hàng Đậu – ga Hoàn Kiếm,” *Tạp chí Khoa học Kiến trúc – Xây dựng*, vol. 43, pp. 11–14, 2021.
- [13] N. T. Bích, “Nghiên cứu ảnh hưởng của quá trình xây dựng đường hầm bằng tổ hợp khoan đào hầm (TBM) đến lún và các công trình trên bề mặt tại Thành phố Hồ Chí Minh,” Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Giao thông Vận tải, Hà Nội, 2022.
- [14] O. Duangsano, K. Kandavorawong, A. Asanprakit, and P. Jongpradist, “Ground movements in shield tunnelling for MRT Orange Line in Bangkok,” in *Proc. 5th Int. Conf. on Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development, Lect. Notes Civil Eng.*, vol. 395, doi: 10.1007/978-981-99-9722-0_37.
- [15] N. T. Tam, N. V. Hung, N. V. Bac, and N. A. Tuan, “Deformation analysis of existing tunnel using finite element method during construction of a full-length excavation pit,” *J. Transp. Sci. Technol.*, vol. 12, pp. 1–9, 2023, doi: 10.55228/JTST.12(1).1-9.
- [16] D. N. Thai, D. V. Kien, P. V. Vi, and N. V. Quang, “Prediction of surface settlement due to twin tunnel construction in soft ground of Hanoi metro line 03,” *Int. J. GEOMATE*, vol. 22, no. 99, pp. 66–72, 2022, doi: 10.21660/2022.94.3209.
- [17] T. Q. Đức, L. Đ. Tân, and T. V. Văn, “Dự đoán lún bề mặt của môi trường đất yếu xung quanh khi thi công metro số 6 Thành phố Hồ Chí Minh,” *Xây dựng*, no. 2, pp. 76–80, 2017.
- [18] V. N. Luận, “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 kỹ thuật địa chất, Trường Đại học Mở - Địa chất, Hà Nội, 2023.
- [19] HANOI METRO, “Tuyến số 3” [Online]. Available: <https://hanoimetro.net.vn/metro-network/ban-do-cac-tuyen-metro/tuyen-so-3/>. [Accessed: Mar. 29, 2025].
- [20] Hanoi Pilot Light Metro Project, “Section Nhon – Hanoi Railway Station, site specific geological, hydrogeological and geotechnical report—tunnel,” Technical design report, 2012.
- [21] ITA/AITES, “Settlement induced by tunneling in soft ground,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 22, pp. 119–149, 2007, doi: 10.1016/j.tust.2006.11.001.
- [22] M. S. Islam and M. Iskander, “Twin tunnelling induced ground settlements: A review,” *Tunn. Undergr. Space Technol.*, vol. 110, pp. 1–27, 2021, doi: 10.1016/j.tust.2020.103614.