



Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>



Challenges and approaches in three - dimensional modeling the engineering geological conditions of Hanoi area



Ha Viet Nhu *

Faculty of Geosciences and Geoengineering, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15th Jan. 2020

Accepted 16th Mar. 2020

Available online 29th Apr. 2020

Keywords:

3D model,
Engineering Geology,
Geospatial,
Geostatistic,
Hanoi.

ABSTRACT

In this study, the approaches and research methods have been proposed based on the analysis of challenges in modeling, establishing a three - dimensional model of geological engineering conditions of the Hanoi area. The three - dimensional model of the Hanoi area was composed of 21 geological engineering units as a stacked structure, with accuracy and reliability were verified by statistical evaluation. Based on the integration of engineering geological attributes, the model has contributed for reconstruction of the geospatial engineering geological structure of the study area as comprehensive, continuously, and high resolution.

Copyright © 2020 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

**Corresponding author*

E - mail: nhuvietha@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2020.61(2).01



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Thách thức và tiếp cận mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội

Nhữ Việt Hà *

Khoa Khoa học và Kỹ thuật Địa chất, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 15/02/2020

Chấp nhận 16/3/2020

Đăng online 29/4/2020

Từ khóa:

Địa chất công trình,
Địa không gian,
Hà Nội,
Mô hình ba chiều.

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, các tiếp cận và phương pháp nghiên cứu đã được đề xuất trên cơ sở phân tích các thách thức trong mô hình hóa, thiết lập mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội. Kết quả mô hình ba chiều khu vực Hà Nội có cấu trúc gồm 21 lớp địa tầng xếp chồng khít lên nhau, có độ chính xác và tin cậy được kiểm định qua các đánh giá thống kê. Mô hình được tích hợp các thuộc tính địa chất địa công trình đã góp phần tái hiện các cấu trúc địa không gian các điều kiện địa chất công trình khu vực nghiên cứu một cách toàn diện, liên tục, phân giải cao mang tính hệ thống.

© 2020 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Điều kiện địa chất công trình có ảnh hưởng rất lớn đến tính khả thi và chi phí của các dự án xây dựng. Trong tỷ lệ vùng, nó có vai trò nền tảng trong các bài toán địa chất công trình; bao gồm phát triển và dự báo các tai biến địa chất đô thị (Kessler và nnk., 2007). Thông tin điều kiện địa chất công trình được thể hiện tốt nhất ở dạng ba chiều nhưng thực tế chúng vẫn được thể hiện dạng 1 hoặc 2 chiều như: bản đồ, mặt cắt, hình trụ (hố khoan / xuyên / kết quả đo địa vật lý,...). Dưới dạng này, thông tin có thời gian xây dựng nhanh, in ấn và lưu trữ đơn giản, không yêu cầu các công cụ hay phương tiện xử lý phức tạp. Với dạng thể hiện truyền thống này, thông tin điều kiện địa chất

công trình thường mang tính cục bộ, thiếu tính liên kết - hệ thống - khái quát cho khu vực. Đây cũng là rào cản lớn cho việc tích hợp các thông tin thuộc tính môi trường địa quyền khác. Dựa vào công nghệ tin học, mô hình ba chiều được đánh giá có nhiều cải thiện cho phép tái hiện và cung cấp các thông tin điều kiện địa chất công trình một cách toàn diện, liên tục, độ phân giải cao. Mô hình ba chiều dần trở thành các điều kiện nền tảng phục vụ các bài toán địa chất công trình, đặc biệt khi mức độ phức tạp ngày càng tăng trong thực tế.

Trong những năm gần đây, nhiều quốc gia đã nhận ra tầm quan trọng của mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình cho sự phát triển bền vững đô thị. Nhiều công nghệ và phương pháp đã được nghiên cứu phát triển như: các mô hình ba chiều địa quyền, mô hình ba chiều bề mặt phục vụ khai thác than và một số loại tài nguyên khoáng sản khác (Nguyen Viet Nghia, 2020; Nguyen Viet Nghia và nnk., 2019; Bui Xuan Nam và nnk., 2019;

*Tác giả liên hệ

E - mail: nhuvietha@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2020.61(2).01

Nguyen Quoc Long và nnk., 2019). Sau đó, nâng cấp thành các mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình để phục vụ giải quyết cho các lĩnh vực khác như, địa chất - địa chất công trình, địa chất đô thị, phân tích số, kỹ thuật xây dựng, phát triển cơ sở hạ tầng và phân tích thảm họa tai biến địa chất,... Tuy nhiên, việc xây dựng mô hình ba chiều với các thông tin điều kiện địa chất công trình toàn diện, độ phân giải cao từ các dữ liệu truyền thống luôn gặp nhiều thách thức phải vượt qua. Ngoài việc phụ thuộc vào đặc điểm điều kiện địa chất, trầm tích đệ tứ, điều kiện địa chất công trình thực tế khu vực nghiên cứu, còn phụ thuộc vào tính khả dụng và chất lượng của dữ liệu, công nghệ mô hình hóa. Các thách thức cụ thể còn liên quan đến lượng dữ liệu khả dụng, sự phân bố, chất lượng và độ tin cậy của dữ liệu. Các thách thức đến từ công nghệ mô hình hóa bao gồm chất lượng, độ chính xác và tin cậy trong quá trình nhận dạng, số hóa, quản lý các đối tượng điều kiện địa chất công trình thực tế.

Thủ đô Hà Nội là trung tâm kinh tế, văn hóa, chính trị của Việt Nam, thuộc đồng bằng Bắc Bộ. Về không gian, thủ đô Hà Nội nằm ở phía hữu ngạn sông Đà và hai bên sông Hồng. Phía Bắc, tiếp giáp với các tỉnh Thái Nguyên và Vĩnh Phúc. Phía Nam, tiếp giáp với tỉnh Hà Nam và Hoà Bình. Phía Đông là Bắc Giang, Bắc Ninh và Hưng Yên. Phía Tây, tiếp giáp với tỉnh Hoà Bình và Phú Thọ. Trong hai thập kỷ qua, đây là một trong các khu vực có tốc độ đô thị hóa nhanh nhất cả nước và phát triển kinh tế - xã hội hàng đầu Việt Nam. Do đó, thủ đô Hà Nội có nhu cầu rất cao về điều tra cơ bản địa chất công trình phục vụ xây dựng cơ sở hạ tầng, phát triển kinh tế - xã hội. Tính toàn diện và phân giải cao của thông tin điều kiện địa chất công trình từ mô hình ba chiều có thể được sử dụng để phục vụ một cách tối ưu các bài toán địa chất công trình theo nhiều miền ứng dụng khác nhau. Là công cụ tốt trong việc hỗ trợ nghiên cứu thí điểm các dự án xây dựng (xác định vị trí, hướng tuyến xây dựng cơ sở hạ tầng, đường hầm, đường ống nước thải đô thị,...) góp phần giảm thiểu các nguy cơ phát sinh các rủi ro kỹ thuật từ nền đất trong quá trình thi công và khai thác sử dụng. Tính toàn diện và phân giải cao của thông tin điều kiện địa chất công trình từ mô hình ba chiều phụ thuộc rất nhiều mức độ chi tiết và tính khả dụng của dữ liệu địa chất công trình. Đây cũng là thách thức chung của rất nhiều khu vực đô thị trên thế giới, yêu cầu về lượng dữ liệu lớn, chi phí đắt đỏ. Nghiên cứu này đề xuất

cách tiếp cận và phương pháp phù hợp với các thách thức trong mô hình hóa ba chiều và xây dựng mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội.

2. Thách thức mô hình hóa ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội

Trên cơ sở khảo sát về tính phức tạp của điều kiện địa tầng tự nhiên; tính khả dụng, đa dạng và sự phân bố của dữ liệu thực tế với mục tiêu mô hình hóa ba chiều; các thách thức lớn đã được nhận dạng bao gồm:

- Thách thức về tính khả dụng, đa dạng và độ tin cậy của dữ liệu thông tin điều kiện địa chất công trình: Dữ liệu thông tin điều kiện địa chất công trình cho mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội được thu thập từ nhiều nguồn khác nhau như các Viện nghiên cứu, các trường đại học, các chủ đầu tư, các ban quản lý xây dựng, các công ty tư vấn xây dựng công nghiệp - giao thông - thủy lợi,... Dữ liệu thông tin đa dạng bao gồm: các loại bản đồ hai chiều đa tỷ lệ, các dữ liệu hố khoan (địa chất, địa chất thủy văn, địa chất công trình), hố xuyên, kết quả đo địa vật lý, kết quả thí nghiệm chỉ tiêu cơ lý các mẫu đất đá trong phòng và ngoài trời. Trong đó, các dữ liệu về hố khoan, hố xuyên, kết quả đo địa vật lý được xác định là quan trọng nhất. Chúng chứa đựng các thông tin địa không gian, hỗ trợ cho mô hình các thông tin cơ bản về hoạt động trầm tích, cấu trúc địa tầng và các hoạt động kiến tạo. Tiếp đó là các dữ liệu bề mặt địa hình, các thông tin cơ bản về hoạt động trầm tích, cấu trúc địa tầng và các hoạt động kiến tạo. Độ chính xác của mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình phụ thuộc rất nhiều vào chất lượng dữ liệu này. Cụ thể là độ tin cậy và tính nhất quán của dữ liệu đa nguồn gốc, giai đoạn và mục đích sử dụng.

- Thách thức về sự phức tạp của điều kiện địa tầng thực tế trong nhận dạng và xây dựng cấu trúc địa không gian mô hình ba chiều: Khu vực nghiên cứu có quá trình trầm tích phức tạp, thành phần thạch học các lớp đất đá khảo sát thực tế trong các báo cáo khảo sát địa chất công trình thường chỉ phục vụ cho từng dự án riêng lẻ, không thể hiện tính quy luật chung của địa tầng tổng hợp. Do đó, thách thức quan trọng cần vượt qua là nhận dạng được chính xác cấu trúc địa tầng của từng hố khoan, hố xuyên, kết quả đo địa vật lý theo một hệ thống tổng thể chuẩn cho toàn bộ khu vực nghiên

cứu. Đây là cơ sở quan trọng để xây dựng hệ thống các lớp địa tầng trong cấu trúc địa không gian của mô hình ba chiều. Vấn đề này cũng góp phần giải quyết các thách thức liên quan đến công tác xác định các thông số thuộc tính về tính chất cơ lý các lớp đất đá trong mô hình.

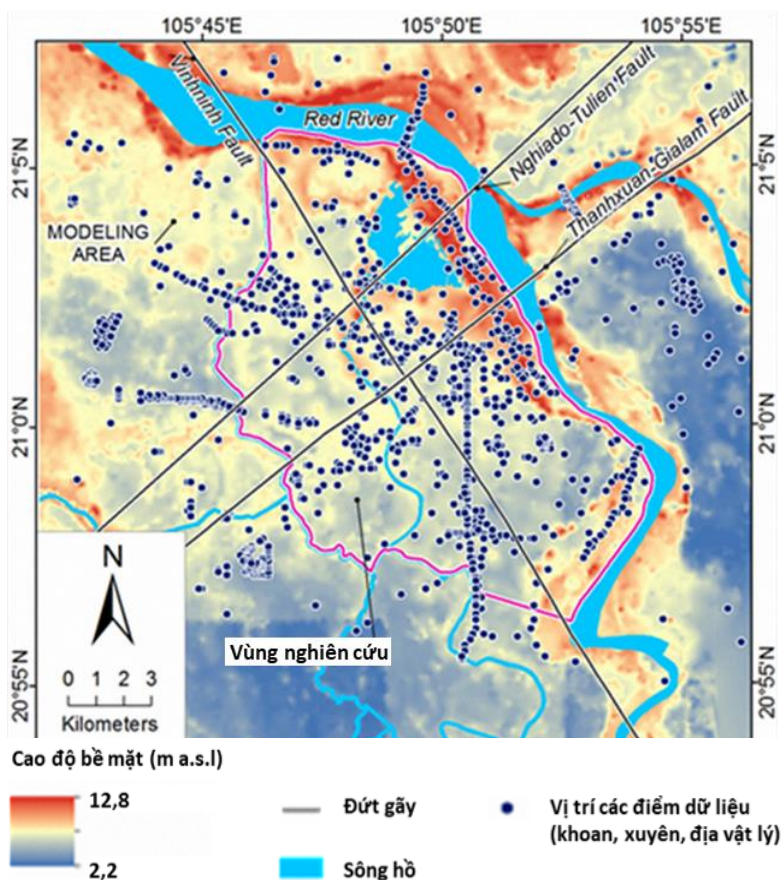
- Thách thức về phân tích dữ liệu lớn (Big data) và sự phân tán: Dữ liệu phân tích, xây dựng cấu trúc địa không gian là số liệu số dạng các vị trí bề mặt của các lớp địa tầng đã được nhận dạng từ dữ liệu truyền thống. Tuy nhiên, các dữ liệu này thường có khối lượng lớn, phân bố không có tính quy luật, phân tán mạnh, phụ thuộc vào tính khả dụng của dữ liệu được hình thành trong quá khứ. Do đó, mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình cần vượt qua thách thức lớn về công nghệ phân tích địa không gian và độ chính xác của cấu trúc địa không gian các lớp địa tầng. Việc phân tích địa không gian cần cho phép xây dựng các bề mặt/khối tích các lớp địa tầng phù hợp nhất với môi trường cấu trúc không gian ngầm thực tế.

3. Cách tiếp cận và phương pháp mô hình

hóa ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội

Dựa trên mục tiêu tổng thể, đặc điểm địa chất, trầm tích, các điều kiện địa chất công trình và tính khả dụng của dữ liệu hố khoan, hố xuyên, điểm đo địa vật; biên mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình được giới hạn trong khu vực có diện tích 700 km², từ 20°53' đến 21°23' vĩ độ Bắc và 105°44' đến 106°02' kinh độ Đông. Phía Đông Bắc được giới hạn bởi sông Hồng, phía Tây và Nam là hai sông nhỏ hơn - sông Nhuệ và Tô Lịch (Hình 1). Đây là khu vực có mật độ và tốc độ đô thị hóa cao, nhiều dự án xây dựng và phát triển cơ sở hạ tầng đã được thực thi trong hai thập kỷ qua. Do đó, có nhiều thông tin về điều kiện địa chất công trình khả dụng có thể thu thập, xử lý cho mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình.

Tất cả dữ liệu địa chất, địa chất công trình truyền thống khả dụng đã được thu thập và phân tích một cách có hệ thống để tích hợp vào mô hình bằng tổ hợp các thao tác phân tích dữ liệu. Các dữ liệu bao gồm: Bản đồ địa hình tỷ lệ 1:2.000; Bản đồ



Hình 1. Vùng nghiên cứu và dữ liệu khả dụng cho mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình.

trầm tích Độ tỷ lệ 1:50.000; Bản đồ địa chất tỷ lệ 1:50.000; 1.386 hố khoan, hố xuyên và kết quả đo địa vật lý với thông tin thuộc tính từ kết quả thí nghiệm 10.278 mẫu đất trong phòng và 16.626 thí nghiệm hiện trường. Vị trí các hố khoan, hố xuyên và kết quả đo địa vật lý khả dụng được định vị không gian trong vùng nghiên cứu, thể hiện trên Hình 1. Các dữ liệu bản đồ được xuất bản bởi (VIGMR, 1995; NARENCA, 2000; VIGMR, 2010a; VIGMR, 2010b) trong khi các dữ liệu trụ hố khoan đã được thu thập từ 348 báo cáo khảo sát địa chất công trình phục vụ thiết kế thi công các dự án xây dựng và cơ sở hạ tầng khu vực Hà Nội trong suốt 20 năm qua.

Các dữ liệu này được phân tích, xử lý, để đảm bảo chất lượng dữ liệu cho các phân tích, mô hình hóa. Thủ tục này xác định tính nhất quán của dữ liệu, loại bỏ những dữ liệu không đảm bảo, giảm thiểu các lỗi ảnh hưởng đến chất lượng dữ liệu. Tính nhất quán của dữ liệu đã được kiểm tra đánh giá cho cả tọa độ, cao độ và được chuyển về một hệ tọa độ thống nhất cho các hố khoan, hố xuyên, kết quả đo địa vật lý. Các dữ liệu bị thiếu hụt các thông tin về tọa độ được khôi phục thông qua địa chỉ, hồ sơ thiết kế công trình và xác thực trên thực địa. Trên cơ sở so sánh ở nhiều khía cạnh, các dữ liệu không phù hợp được loại khỏi cơ sở dữ liệu. Sự nhất quán của dữ liệu về cao độ được tiến hành dựa vào các bản đồ địa hình và mô hình số độ cao cùng thời kỳ. Tương tự, việc so sánh cũng được tiến hành tỷ mỉ ở nhiều khía cạnh, nếu các dữ liệu ở cùng hoặc lân cận vị trí có sự sai khác thì loại bỏ không sử dụng cho giai đoạn tiếp theo.

Cấu trúc địa tầng khu vực nghiên cứu được hình thành theo các quá trình phát triển trầm tích đồng bằng sông Hồng. Các dữ liệu hố khoan, hố xuyên, kết quả đo địa vật lý cung cấp các thông tin được quan sát trực tiếp về thuộc tính thạch học và cấu trúc địa tầng địa chất công trình dưới bề mặt đất. Do đó, cấu trúc địa không gian mô hình ba chiều địa chất công trình được xây dựng trên cơ sở kết quả nhận dạng các lớp địa tầng cho từng hố khoan, hố xuyên và kết quả đo địa vật lý. Một lớp địa tầng trong mô hình được nhận dạng trên cơ sở thỏa mãn đồng thời các tiêu chí về phân hệ địa tầng nguồn gốc, thành phần thạch học và tính chất xây dựng. Tương tự, tất cả các thông số chỉ tiêu cơ lý các lớp đất đá từ thí nghiệm trong phòng, ngoài trời trong phạm vi phân bố không gian các lớp địa tầng cũng được sử dụng bổ sung để xác định và

hiệu chuẩn kết quả nhận dạng lớp địa tầng. Cơ sở dữ liệu nhận dạng được số hóa, lưu trữ trên hệ quản trị dữ liệu địa không gian địa chất công trình dùng riêng và được lập trình trên nền tảng Microsoft Excel.

Công nghệ thông tin đã có tốc độ phát triển rất nhanh chóng trong thập kỷ qua. Đặc biệt, hệ thống thông tin địa lý được đánh giá có nhiều tính năng mạnh mẽ cho ứng dụng số hóa, quản trị và phân tích dữ liệu lớn về điều kiện địa chất công trình. Công nghệ phân tích địa không gian mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội là công nghệ phân tích địa thống kê tích hợp hiệu chuẩn xác thực chéo sử dụng ArcGIS 10.3. Độ chính xác và tin cậy của các phân tích địa thống kê đa tầng được kiểm nghiệm thông qua đánh giá địa thống kê. Các tham số sử dụng cho đánh giá bao gồm: Hệ số tương quan (R) (Công thức 1), sai số trung bình (ME) (Công thức 2) và sai số trung phương trung bình (RMSE) (Công thức 3):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(a_i - \bar{a})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}} \quad (1)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Trong đó, $p_1, p_2, \dots, p_n$ là các giá trị dự báo, $a_1, a_2, \dots, a_n$ là các giá trị thực tế, $\bar{p}$ và $\bar{a}$ lần lượt là dự báo trung bình và giá trị thực tế trung bình. Mô hình phân tích địa không gian được coi là tốt nhất khi có: giá trị R gần bằng một, giá trị ME gần bằng 0 và giá trị RMSE là tối thiểu. Giá trị ME gần bằng 0 khi các sai số dự đoán không thiên vị. Kết quả mô hình được đánh giá thấp nếu giá trị ME dương trong khi nó được coi là đánh giá quá cao nếu giá trị của nó là âm (Ormsby và nnk., 2010; Witten, Frank, 2011). Chu trình tổng thể mô tả phương pháp mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội được thể hiện Hình 2.

4. Kết quả và thảo luận

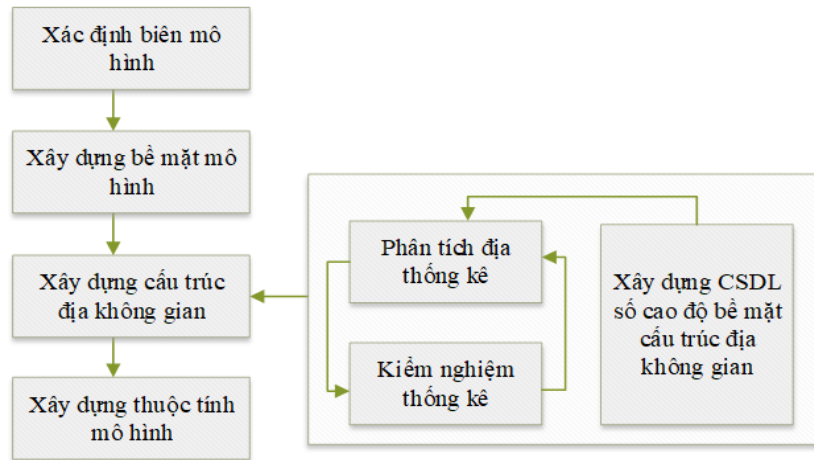
Kết quả mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội đã được phát triển với ba thành phần chính gồm: bề mặt đất tự nhiên,

cấu trúc địa không gian các lớp địa tầng, các thuộc tính địa chất công trình (Hình 3).

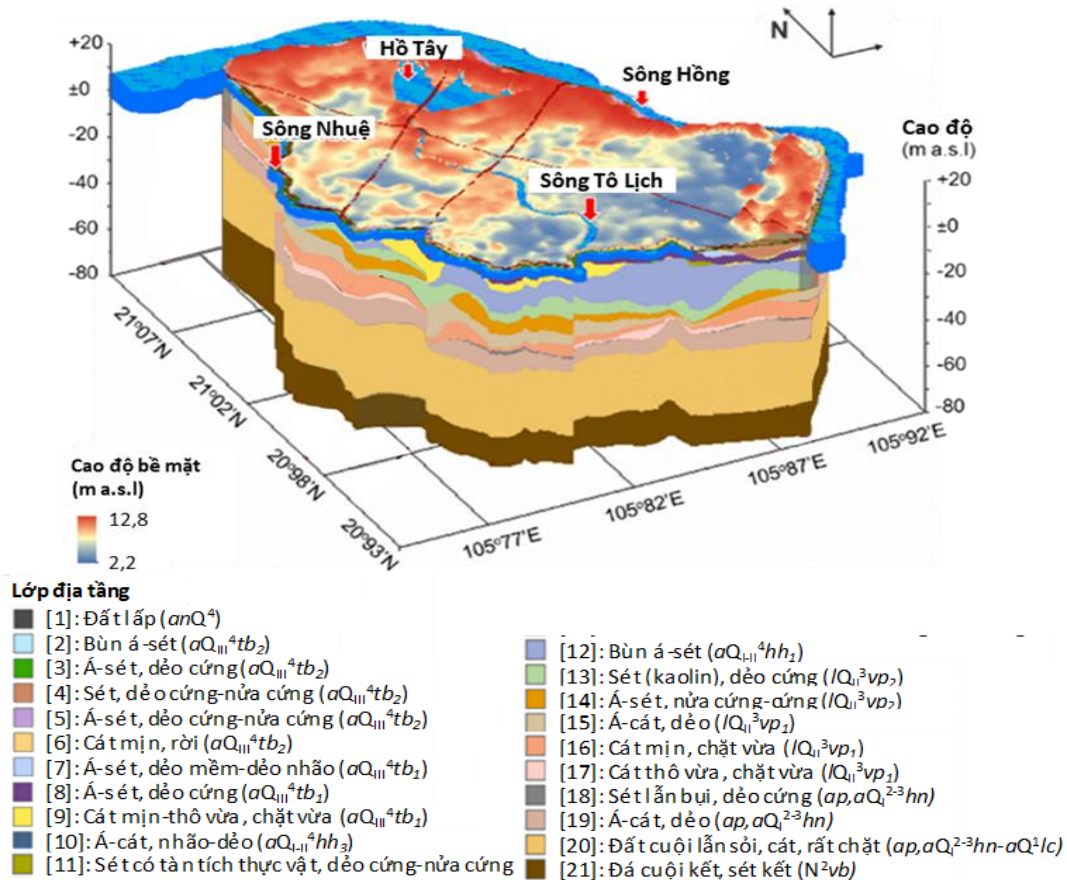
Bề mặt trên cùng của mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội có cao độ biến đổi từ 2,2 đến 12,8 m a.s.l và thoải dần về phía Đông Nam. Bề mặt dưới cùng của mô hình là bề mặt đá gốc hệ tầng có tuổi Neogene - Đá cuội kết,

sét kết (N2vb) (Hình 3).

Cấu trúc địa không gian của mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội gồm 21 lớp địa tầng. Đây là cấu trúc gồm nhiều thể tích các lớp địa tầng xếp chồng khít lên nhau với độ phân giải cao nhất, tương ứng với sự đồng nhất về tính chất xây dựng.



Hình 2. Chu trình mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội.



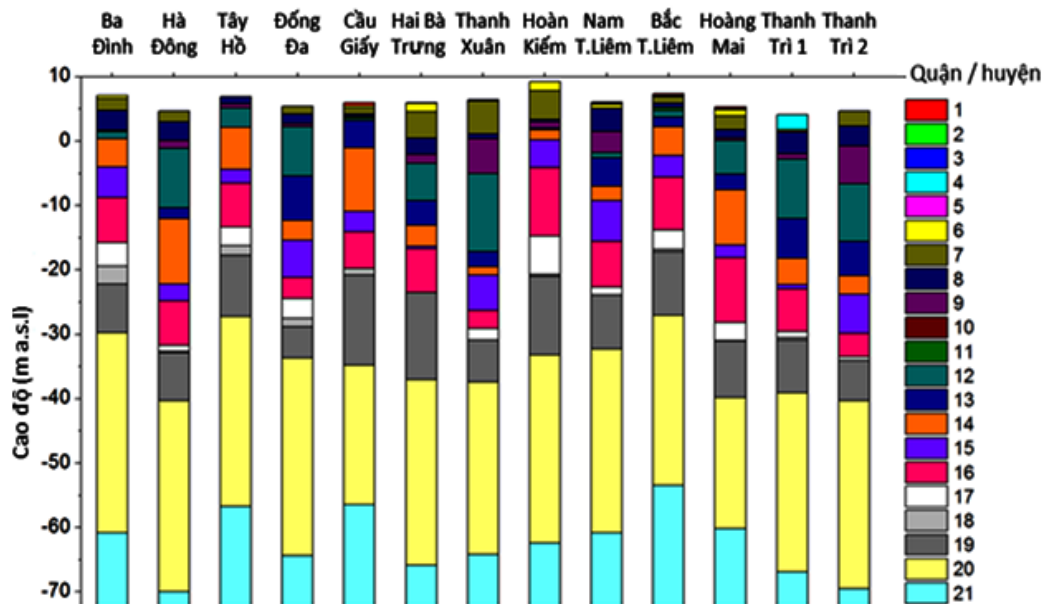
Hình 3. Mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội.

Tất cả bề mặt các lớp địa tầng này đều giảm dần từ phía Bắc (khu vực núi) đến phía Nam. Lớp địa tầng số 20 (Cuội sỏi lẫn cát, rất chặt, tuổi $ap, aQ_1^{2-3}hn - aQ_1^{1lc}$) dày nhất với độ cao đỉnh và đáy biến đổi lần lượt là (- 20 m, - 48,8 m) và (- 50,1 m, - 70,8 m). Mặt đáy của lớp địa tầng này cũng là mặt đáy của trầm tích Đệ tứ hoặc bề mặt trên cùng của lớp đất đá tuổi Neogene (lớp địa tầng số 21 - Đá cuội kết, sét kết, tuổi N^2vb). Các lớp địa tầng mỏng nhất gồm số 18 (Sét lẫn bụi, dẻo cứng, tuổi $ap, aQ_1^{2-3}hn$) và hai nhóm lớp địa tầng bao gồm lớp 2 đến 7 (Bùn á - sét, tuổi $aQ_{III}^{4tb_2}$; á - sét, dẻo cứng, tuổi $aQ_{III}^{4tb_2}$; Sét, dẻo cứng - nửa cứng, tuổi $aQ_{III}^{4tb_2}$; Á - sét, dẻo cứng - nửa cứng, tuổi $aQ_{III}^{4tb_2}$; Cát mịn, rời, tuổi $aQ_{III}^{4tb_2}$; á - sét, dẻo mềm - dẻo nhão, tuổi $aQ_{III}^{4tb_1}$) và lớp 10 (Á - cát, nhão - dẻo, tuổi $aQ_I - II^{4hh_3}$) đến 11 (Sét có tàn tích thực vật, dẻo cứng - nửa cứng, tuổi $aQ_I - II^{4hh_2}$) (Hình 3). Cấu trúc địa không gian các lớp địa tầng của mô hình ba chiều địa chất công trình đại diện tại 13 quận huyện khu vực Hà Nội được trình bày trên Hình 4.

Các thuộc tính địa chất công trình và hoạt động kiến tạo của mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội đã được tích hợp tổng thể và chi tiết cho từng đơn vị cấu trúc địa không gian của mô hình. Tổng cộng 19 chỉ tiêu cơ lý đã được phân loại và tích hợp vào mô hình. Một số chỉ tiêu cơ bản như: thành phần hạt, hệ số rỗng, độ rỗng, độ ẩm tự nhiên, độ ẩm giới hạn chảy, độ ẩm giới hạn dẻo, độ sệt, hệ số nén lún, hệ số nén lún thể tích, mô đun tổng biến dạng, góc ma sát trong,

lực dính đơn vị (Smoltczyk, 2003).

Ngoại trừ đá gốc Neogene, các thuộc tính tính chất cơ lý đất đá được tích hợp đầy đủ cả 20 lớp địa tầng. Lớp địa tầng số 20 (tuổi $ap, aQ_1^{2-3}hn - aQ_1^{1lc}$) có thành phần đất cuội lẫn sỏi, cát; trạng thái rất chặt (mô đun tổng biến dạng $8,0 \div 13,0$ MPa), hệ số thấm rất cao ($25,9 \div 101,3$ md⁻¹). Các lớp địa tầng số 6 ($aQ_{III}^{4tb_2}$), 9 ($aQ_{III}^{4tb_1}$), 16 ($IQ_{II}^{3vp_1}$), và 17 ($IQ_{II}^{3vp_1}$) có thành phần thạch học là cát mịn đến thô vừa, mô đun tổng biến dạng biến đổi từ $5 \div 27$ MPa, hệ số thấm từ $3,0 \div 33,1$ md⁻¹. Các lớp địa tầng số 1 (anQ^4), số 3 ($aQ_{III}^{4tb_2}$), số 4 ($aQ_{III}^{4tb_2}$), số 5 ($aQ_{III}^{4tb_2}$), số 8 ($aQ_{III}^{4tb_1}$), số 13 ($IQ_{II}^{3vp_2}$), số 14 ($IQ_{II}^{3vp_2}$), số 15 ($IQ_{II}^{3vp_1}$), số 18 ($ap, aQ_1^{2-3}hn$) và số 19 ($ap, aQ_1^{2-3}hn$) có thành phần là sét, á - sét, á - cát với trạng thái từ dẻo mềm đến dẻo cứng. Độ ẩm tự nhiên biến đổi từ $25,5 \div 35,6\%$, độ ẩm giới hạn chảy và dẻo biến đổi lần lượt từ $30,9 \div 44,7\%$ và từ $21,6 \div 25,2\%$. Hệ số rỗng từ $0,77 \div 0,99$, hệ số thấm nhỏ ($9,5 - 8,2 \cdot 10^{-4}$ md⁻¹), hệ số nén lún thể tích từ $1,5 \div 100,0 \cdot 10^{-6}$ cm²kg⁻¹. Xen kẽ trong mô hình là các lớp địa tầng có tính chất xây dựng kém (các lớp đất yếu), chúng bao gồm các lớp địa tầng số 2 ($aQ_{III}^{4tb_2}$), 8 ($aQ_{III}^{4tb_1}$), 11 ($aQ_I - II^{4hh_2}$), 12 ($aQ_I - II^{4hh_1}$) và 13 ($IQ_{II}^{3vp_2}$). Thành phần thạch học là bùn á - sét, than bùn và đất sét có hàm lượng hữu cơ cao. Các lớp này có hệ số rỗng lớn ($1,04 \div 1,90$), độ ẩm tự nhiên cao ($36,3 \div 63,7\%$), độ ẩm giới hạn chảy và độ ẩm giới hạn dẻo nằm trong khoảng $42,9 \div 62,8\%$ và từ $26,8 \div 38,2\%$. Hệ số nén



Hình 4. Cột địa tầng đại diện tại 13 quận huyện khu vực Hà Nội.

lún thể tích nằm trong khoảng $2,3 \div 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ kg}^{-1}$.

Mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội đã được xây dựng trong vùng có mật độ thông tin địa chất công trình có tính khả dụng cao trong hai thập kỷ qua. Các dữ liệu này đã được làm sạch, kiểm tra tính nhất quán để đảm bảo chất lượng của dữ liệu cho các phân tích mô hình hóa. Tính khả dụng của dữ liệu của mỗi lớp địa tầng và đặc tính thống kê được trình bày trong Bảng 1

Bảng 1. Thống kê tính khả dụng của dữ liệu trên mỗi lớp địa tầng (GL).

GL	Số lượng (điểm)	Cao độ thấp nhất (m)	Cao độ lớn nhất (m)	Cao độ trung bình (m)	Độ lệch tiêu chuẩn (m)
2	1.109	- 2,4	13,0	6,3	1,9
3	1.109	- 2,4	13,0	6,1	1,8
4	1.108	- 2,4	13,0	6,1	1,8
5	1.108	- 6,8	13,0	6,0	1,9
6	1.108	- 7,1	12,7	5,8	2,1
7	1.108	- 7,6	12,7	5,2	2,4
8	1.096	- 20,6	12,7	3,8	3,6
9	1.085	- 25,3	12,4	1,4	5,1
10	1.004	- 33,3	12,4	- 0,2	6,9
11	987	- 33,3	12,4	- 2,0	8,1
12	976	- 34,3	12,4	- 3,5	8,9
13	961	- 35,9	12,4	- 5,4	10,1
14	939	- 36,5	12,4	- 8,2	10,9
15	901	- 36,5	12,4	- 11,48	11,0
16	880	- 42,5	8,5	- 15,1	10,7
17	788	- 49,8	6,8	- 22,3	10,1
18	718	- 49,8	6,8	- 24,0	9,8
19	717	- 49,8	6,8	- 24,5	9,7
20	695	- 55,0	- 15,9	- 34,6	6,7
21	390	- 76,6	- 39,5	- 59,8	7,4

Tổng cộng có 1.109 (80,0%) từ 1.386 hố khoan, hố xuyên và điểm kết quả đo vật lý đã được giữ lại, nhận dạng, số hóa và thiết lập cơ sở dữ liệu bề mặt các lớp địa tầng. Kết quả cấu trúc địa không gian mô hình ba chiều địa chất công trình là kết quả phân tích địa thống kê tích hợp hiệu chuẩn xác thực chéo cuối cùng cho từng lớp địa tầng. Cấu trúc địa không gian mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình đảm bảo tính chính xác và tin cậy cao với kết quả đánh giá thống kê là $(0,81 \div 0,94)$, $(- 0,001 \div 0,081 \text{ m})$, $(0,59 \div 3,92 \text{ m})$ tương ứng các chỉ số R, RMSE và ME (Bảng 2).

Bảng 1. Thống kê tính khả dụng của dữ liệu trên mỗi lớp địa tầng (GL).

GL	R	RMSE (m)	ME (m)	GL	R	RMSE (m)	ME (m)
1	0,93	0,69	- 0,001	12	0,91	2,80	- 0,057
3	0,92	0,80	- 0,005	13	0,91	2,80	- 0,036
4	0,89	0,80	- 0,004	14	0,92	2,77	0,016
5	0,85	0,99	- 0,002	15	0,91	2,95	- 0,010
6	0,94	0,59	0,005	16	0,91	2,45	- 0,027
7	0,90	0,72	0,006	17	0,89	2,56	0,012
8	0,83	1,59	0,015	18	0,90	2,52	0,019
9	0,81	3,92	- 0,021	19	0,94	1,39	- 0,005
10	0,86	2,30	- 0,013	20	0,92	2,34	0,081
11	0,90	2,40	- 0,053	21	0,91	2,80	- 0,057

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, các cách tiếp cận và phương pháp được đề xuất trên cơ sở các thách thức được nhận dạng và phân tích cho mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội. Kết quả, mô hình ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội được thiết lập trên diện tích 700 km², từ các dữ liệu địa chất công trình đa thời kỳ, đa nguồn gốc, dạng 1 hoặc 2 chiều truyền thống. Các dữ liệu đã được phân tích, xử lý, đảm bảo chất lượng làm cơ sở để xây dựng cơ sở dữ liệu số cho việc xây dựng cấu trúc địa không gian của mô hình ba chiều. Cấu trúc địa không gian bao gồm 21 lớp địa tầng xếp chồng khít lên nhau cùng các thuộc tính địa chất địa công trình và hoạt động kiến tạo. Tính chính xác và tin cậy được kiểm định thông qua các đánh giá thống kê với giá trị cao.

Thông qua nghiên cứu này, lần đầu tiên thông tin ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội được tái hiện và cung cấp một cách toàn diện, liên tục và phân giải cao mang tính hệ thống so với các nghiên cứu trước đây (Liên đoàn II - ĐCTV, 1996; Nguyễn Đức Đại, 1996; Thu, Fredlund, 2000; Nguyễn Huy Phương, 2004; Yonezawa, 2008; 2009; Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Châu Lâm, 2010). Kết quả nghiên cứu là minh chứng về tính khả thi của cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu đã vượt qua những thách thức mô hình hóa ba chiều điều kiện địa chất công trình khu vực Hà Nội. Từ đó, tạo điều kiện nền tảng phát triển các giải pháp mới, độ chính xác cao cho các bài toán địa chất công trình, cho phát triển cơ sở hạ tầng và phân tích dự báo thảm họa tai biến địa chất ở cấp độ ba chiều.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ Trường Đại học Mỏ - Địa chất trong đề tài khoa học và công nghệ cấp cơ sở mã số T18 - 08.

Tài liệu tham khảo

- Bui Xuan Nam, Lee Changwoo, Nguyen Quoc Long, Adeel Ahmad, Cao Xuan Cuong, Nguyen Viet Nghia, Le Van Canh, Nguyen Hoang, Le Qui Thao, Duong Thuy Huong, Nguyen Van Duc, 2019. Use of Unmanned Aerial Vehicles for 3D topographic Mapping and Monitoring the Air Quality of Open - pit Mines, *Journal of the Polish Mineral Engineering Society* 2(2). 201.
- Kessler, H., Mathers, S., Lelliott, M., Hughes, A., Macdonald, D., 2007. Rigorous 3D geological models as the basis for groundwater modeling, *Three - dimensional Geologic Mapping for Groundwater Applications*.
- Liên đoàn II - ĐCTV, 1996. Báo cáo Điều tra địa chất đô thị hành lang kinh tế Hà Nội - Hải Phòng - Quảng Ninh. *Liên đoàn II - Địa chất thủy văn*. Hà Nội - Hải Phòng - Quảng Ninh.
- NARENCA, 2000. Topographic maps at scale of 1:2000. *Vietnam publishing house of natural resources, environment and cartography* (NARENCA).
- Nguyễn Đức Đại, 1996. Báo cáo kết quả điều tra Địa chất đô thị Thành phố Hà Nội, Liên đoàn II Địa chất thủy văn, *Cục Địa chất Việt Nam*, Hà Nội.
- Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Châu Lân, 2010. Địa môi trường với khai thác và sử dụng hiệu quả không gian ngầm đô thị Hà Nội. *Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải* 29. 65 - 69.
- Nguyễn Huy Phương, 2004. Thu thập, kiểm chứng các tài liệu đã có, nghiên cứu bổ sung lập bản đồ phân vùng đất yếu Hà Nội phục vụ phát triển bền vững Thủ đô. *Đề tài trọng điểm cấp thành phố Hà Nội*. Mã số TC - ĐT/06 - 02 - 03.
- Nguyen Quoc Long, Xuan - Nam Bui, Cao Xuan Cuong, Le Van Canh, 2019. An approach of mapping quarries in Vietnam using low - cost unmanned aerial vehicles. *Inzynieria Mineralna* 44(2). 248 - 262.
- Nguyen Viet Nghia, 2020. Building DEM for deep open - pit coal mines using DJI Inspire 2 (Vietnamese). *Journal of Mining and Earth Sciences* 61 (1). 1 - 10.
- Nguyen Viet Nghia, Nguyen Quoc Long, Nguyen Thi Cuc, Xuan - Nam Bui, 2019. Applied Terrestrial Laser Scanning for coal mine High Definition mapping. *World of Mining - Surface and Underground* 71(4). 237 - 242.
- Ormsby, T., Napoleon, E., Burke, R., Groessl, C., Bowden, L., 2010. Getting to know ArcGIS desktop. *Esri Press Redlands*.
- Smoltczyk, U., 2003. Geotechnical engineering handbook. *John Wiley & Sons*.
- Thu, T. M., Fredlund, D. G., 2000. Modelling Subsidence in the Hanoi City area. Vietnam. *Canadian Geotechnical Journal*. 37. 621 - 637.
- VIGMR, 1995. Hanoi quaternary deposit map at scale of 1:150,000. *Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources (VIGMR)*.
- VIGMR, 2010a. Hanoi geological map at scale of 1:50000. *Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources (VIGMR)*.
- VIGMR, 2010b. Hanoi lithological map at scale of 1:50000. *Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources (VIGMR)*.
- Witten, I. H., Frank, E., 2011. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, Second Edition. *Morgan Kaufmann*.
- Yonezawa, G., 2008. Developing of 3D Urban Modeling of Hanoi. *Intriguing ASIA* 113. 168 - 174.
- Yonezawa, G., 2009. 3D Topographical Analysis of Hanoi, Vietnam. *Japanese Journal of Southeast Asian Studies* 46. 519 - 531.