

TRƯỜNG ĐẠI HỌC TRÀ VINH (TVU)

HỘI ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH
VÀ MÔI TRƯỜNG VIỆT NAM (VAEGE)



HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC
ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH - ĐỊA KỸ THUẬT
VÀ MÔI TRƯỜNG PHỤC VỤ PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG
(VIETGEO 2025)



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

Không phần nào trong xuất bản phẩm này được phép sao chép hay phát hành dưới bất kỳ hình thức hoặc phương tiện nào nếu không được phép của Nhà xuất bản Giao thông vận tải

NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

Số 8 phố Tăng Bạt Hổ - Phường Cửa Nam - TP. Hà Nội

Điện thoại: 024 39423346 - 39424620 * Fax: 024 38224784

Website: www.nxbgtvt.vn

Chịu trách nhiệm xuất bản, nội dung:

Giám đốc - Tổng Biên tập:

NGUYỄN MINH NHẬT

Biên tập nội dung:

VŨ VĂN BÁI

Biên tập sách điện tử:

VŨ VĂN BÁI

Kỹ thuật sách điện tử:

NGÔ NHỊ LƯƠNG

Trình bày:

HIỀN LƯƠNG

Số xác nhận đăng ký xuất bản: 3850-2025/CXBIPH/1-78/GTVT.

Số quyết định xuất bản: 13 NB/QĐSĐT-XBGT ngày 22/10/2025.

Nộp lưu chiều tháng 10 năm 2025.

ISBN: 978-604-76-3233-6

TRƯỜNG ĐẠI HỌC TRÀ VINH
(TVU)

HỘI ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH
VÀ MÔI TRƯỜNG VIỆT NAM (VAEGE)

NGÀY 24 & 25 THÁNG 10 NĂM 2025

HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC
ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH -
ĐỊA KỸ THUẬT VÀ MÔI TRƯỜNG
PHỤC VỤ PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG
(VIETGEO 2025)

NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

MỤC LỤC

Chủ đề I: ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH VÀ ĐỊA KỸ THUẬT

1. PHÁT HIỆN SẠT LỎ ĐẤT DỰA TRÊN KỸ THUẬT HỌC SÂU <i>Nguyễn Kim Cường, Kei Kawamura, Nguyễn Trung Kiên</i>	8
2. NGHIÊN CỨU CHẤT LƯỢNG CẤP PHỐI VỮA CHÈN LẤP VỎ HÀM TBM DỰ ÁN TUYẾN ĐƯỜNG SẮT ĐÔ THỊ THÍ ĐIỂM THÀNH PHỐ HÀ NỘI, ĐOẠN NHỒN - GA HÀ NỘI <i>Nguyễn Thị Nụ, Bùi Trường Sơn, Ngô Thị Thoan, Ngô Văn Luyện</i>	15
3. GEOLOGICAL EVOLUTION AND GEOMORPHOLOGICAL HERITAGES OF THE NAM O ROCKY SHORE PLATFORM IN THE COASTAL AREA OF DANANG, VIETNAM <i>La Duong Hai, Pham Phuoc Toan, Do Quang Thien</i>	22
4. XÁC ĐỊNH CÁC CHỈ TIÊU CHO DỰ TÍNH ĐỘ LÚN ỔN ĐỊNH CỦA NỀN ĐẤT YẾU BẰNG THÍ NGHIỆM DILATOMETER, ÁP DỤNG CHO KHU VỰC CẢI MẸP <i>Nguyễn Văn Phóng, Phan Tự Hương, Phan Thành Tiền, Trương Thanh Cẩn</i>	32
5. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG HỆ THỐNG PHÂN CẤP VÀ TIÊU CHÍ PHÂN ĐỊNH ĐỊA TẦNG ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH <i>Nguyễn Văn Phóng, Bùi Trường Sơn, Bùi Văn Bình, Nguyễn Song Thanh, Nguyễn Tiến Dũng</i>	43
6. NGHIÊN CỨU MÔ PHÒNG LỮ Bùn ĐÁ TẠI TRÀ LÈNG, THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG BẰNG PHẦN MỀM IRIC - MORPHO 2DH <i>Vũ Văn Kiên, Nguyễn Châu Lân, Đỗ Tuấn Nghĩa</i>	53
7. KHẢO SÁT ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH CHO CÁC DỰ ÁN ĐIỆN GIÓ NGOÀI KHƠI: THỬ THÁCH VÀ KINH NGHIỆM THỰC TẾ <i>Trương Thanh Cẩn, Nguyễn Quỳnh Luân, Nguyễn Văn Phóng</i>	64
8. ỨNG DỤNG PHẦN MỀM STATISTICAL PROCESS TRONG XỬ LÝ THỐNG KÊ KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM ĐẤT ĐÁ <i>Phan Tự Hương, Đỗ Minh Tinh</i>	73
9. NGHIÊN CỨU, ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP XỬ LÝ THẨM QUA NỀN ĐẬP HỒ CHỨA NƯỚC SÔNG THAN, TỈNH KHÁNH HÒA <i>Phạm Thị Ngọc Hà, Nguyễn Tấn Sơn, Bùi Trường Sơn, Nguyễn Thành Dương</i>	82
10. NGHIÊN CỨU ĐỊA KỸ THUẬT PHỤC VỤ QUY HOẠCH XÂY DỰNG ĐÔ THỊ ÁP DỤNG CHO PHƯỜNG HẢI DƯƠNG, THÀNH PHỐ HẢI PHÒNG <i>Đỗ Hồng Thắng</i>	91
11. PHÂN TÍCH THẨM VÀ ỔN ĐỊNH ĐẬP ĐẤT TRONG TRƯỜNG HỢP MỰC NƯỚC THƯỢNG LƯU HẠ THẤP NHANH <i>Nguyễn Văn Hương, Nguyễn Trung Quân, Nguyễn Thị Lộc, Nguyễn Văn Tươi, Nguyễn Quang Huy</i>	99
12. ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH ĐẬP ĐẤT KHI XẢY RA ĐỘNG ĐẤT: ÁP DỤNG CHO ĐẬP ĐẤT THƯỢNG KON TUM <i>Nguyễn Trung Quân, Nguyễn Quang Huy, Nguyễn Thị Lộc, Lê Ngọc Viên, Nguyễn Văn Hương</i>	109
13. ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA TỶ LỆ BẢN ĐỒ ĐỊA CHẤT ĐẾN VIỆC CHỌN TUYẾN ĐƯỜNG CAO TỐC TUYẾN QUANG - HÀ GIANG, ĐOẠN QUA TỈNH TUYẾN QUANG CŨ <i>Nguyễn Đức Đảm, Phạm Thái Bình, Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Công Định</i>	120
14. NGHIÊN CỨU SỨC CHỐNG CẮT ĐẤT SÉT LẤN SẠN TRÊN MẪU CHẾ BỊ CÓ KÍCH THUỐC KHÁC NHAU BẰNG THIẾT BỊ CẮT PHẪNG <i>Cao Trọng Công, Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Châu Lân, Phạm Thu Trang</i>	127

15. XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM TRONG PHÒNG KHẢO SÁT SỰ LÀM VIỆC CỦA NHÓM TRỤ VẬT LIỆU HẠT RỜI KẾT HỢP VỚI LƯỚI ĐỊA KỸ THUẬT TRONG XỬ LÝ NỀN ĐẤT YẾU	
<i>Nguyễn Hải Hà, Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Thái Linh, Lê Thị Hồng Vân</i>	135
16. ẢNH HƯỞNG TRƯỢT NÔNG TỚI ỔN ĐỊNH NỀN ĐƯỜNG GIAO THÔNG Ở VÙNG NÚI - NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH TUYẾN TL128 ĐOẠN TỪ CHẶN NỬA ĐI SÌN HỒ, TỈNH LAI CHÂU	
<i>Nguyễn Việt Tiệp, Nguyễn Đức Mạnh, Mai Sỹ Hùng</i>	145
17. ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC - KINH NGHIỆM THẾ GIỚI VỀ QUY HOẠCH, XÂY DỰNG, VẬN HÀNH VÀ KHẢO SÁT ĐỊA KỸ THUẬT	
<i>Nguyễn Thành Dương, Nguyễn Quang Phích</i>	155
18. THÀNH LẬP BẢN ĐỒ SỬ DỤNG ĐẤT CHO KHU VỰC XÃ SÓP CỘP, TỈNH SƠN LA PHỤC VỤ ĐÁNH GIÁ NGUY CƠ TRƯỢT LỞ DỰA TRÊN DỮ LIỆU VIỄN THÁM VÀ GIS	
<i>Dương Văn Bình, Phạm Thị Việt Nga, Phạm Thị Ngọc Hà</i>	163
19. ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP XÁC SUẤT TRONG DỰ BÁO ĐỘ LÚN CỎ KẾT CỦA NỀN ĐƯỜNG ĐẤT YẾU	
<i>Bùi Văn Bình</i>	171
20. NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG VẬT LIỆU ĐÁ TỰ NHIÊN TRONG XÂY DỰNG ĐƯỜNG GIAO THÔNG Ở NINH THUẬN	
<i>Phạm Minh Tân, Bùi Trường Sơn</i>	179
21. NGHIÊN CỨU SỬ DỤNG XỈ ĐÁY LÒ NHIỆT ĐIỆN THAY THẾ CÁT TỰ NHIÊN TRONG VỮA XÂY	
<i>Nguyễn Văn Hùng</i>	186
22. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA LƯỢNG MƯA TỚI ỔN ĐỊNH NỀN ĐƯỜNG ĐẮP CAO TRÊN TUYẾN CAO TỐC ĐỒNG ĐẰNG - TRÀ LĨNH BẰNG MÔ PHÒNG SỐ	
<i>Nguyễn Bá Đồng, Nguyễn Đức Hạnh</i>	194
23. CƠ SỞ VÀ CÔNG NGHỆ CHUYỂN ĐỔI SỐ ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH - ĐỊA KỸ THUẬT	
<i>Nhữ Việt Hà</i>	202
24. MỘT SỐ VẤN ĐỀ VỀ CÔNG TÁC QUẢN LÝ CÔNG TRÌNH ĐỂ PHÒNG TRÁNH SỰ CỐ TRONG XÂY DỰNG	
<i>Nguyễn Thị Nụ</i>	211
25. RIVER DYNAMICS AND POST-FLOOD SAND REGENERATION: A GEODYNAMIC AND SEDIMENTOLOGICAL APPROACH	
<i>Pham Phuoc Toan, Do Quang Thien</i>	218

Chủ đề II: KỸ THUẬT XÂY DỰNG VÀ VẬT LIỆU ĐỊA KỸ THUẬT

26. ĐỀ XUẤT TỶ LỆ PHỐI TRỘN XỈ LÒ CAO VỚI CÁT LÀM VẬT LIỆU THAY THẾ CÁT TRONG XÂY DỰNG	
<i>Nguyễn Thị Thanh Nhân, Trần Thanh Nhân, Trần Thị Ngọc Quỳnh, Đỗ Quang Thiên</i>	228
27. THEORETICAL DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE RISK ASSESSMENT MODEL FOR LARGE-SCALE INFRASTRUCTURE PROJECTS: A CASE STUDY OF THE MEKONG DELTA, VIETNAM	
<i>Minh-Huy Vo, Jyh-Bin Yang</i>	238
28. MỘT NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM BÊ TÔNG NHIỀU TRO BAY SỬ DỤNG VẬT LIỆU ĐỊA PHƯƠNG TỈNH VĨNH LONG TRONG XÂY DỰNG BỀN VỮNG	
<i>Huỳnh Thị Mỹ Dung, Huỳnh Văn Hiệp, Nguyễn Thanh Sang</i>	253
29. MÔ HÌNH LƯỚI MÔ PHÒNG TRUYỀN NHIỆT TRONG BÊ TÔNG	
<i>Nguyễn Lê Đạt, Phạm Đức Thọ, Đặng Trung Thành</i>	263

CƠ SỞ VÀ CÔNG NGHỆ CHUYỂN ĐỔI SỐ ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH - ĐỊA KỸ THUẬT

Nhữ Việt Hà^{1,*}

¹Trường Đại học Mở - Địa chất

*Tác giả liên hệ: Email: nhuvietha@humg.edu.vn

Tóm tắt

Bài báo này đánh giá tiềm năng chuyển đổi số trong Địa chất công trình - Địa kỹ thuật, tập trung vào thu thập, xử lý, mô hình hóa và phân tích dữ liệu. Nghiên cứu bao quát cơ sở và công nghệ chuyển đổi số với phương pháp nghiên cứu kết hợp các tiêu chuẩn quốc tế (IAEG, ISRM, ISSMGE, POSC) với công nghệ hiện đại: thu thập dữ liệu hố khoan tự động qua thiết bị di động và GPS, giải đoán thí nghiệm xuyên tĩnh bằng thuật toán số, xây dựng mô hình địa hình 3D bằng LIDAR, mô phỏng địa kỹ thuật FEM/DEM và phân tích không gian GIS. Kết quả cho thấy chuyển đổi số giúp đồng bộ hóa và chuẩn hóa dữ liệu từ nhiều nguồn, giảm phụ thuộc vào xử lý thủ công, tạo mô hình 2D/3D chi tiết, hỗ trợ mô phỏng các hiện tượng địa kỹ thuật và dự báo thiên tai trượt lở với độ chính xác cao. Nghiên cứu khẳng định chuyển đổi số không chỉ là công cụ thu thập dữ liệu mà còn là nền tảng để mô hình hóa, phân tích và ra quyết định kỹ thuật, nâng cao độ tin cậy và hiệu quả thực tiễn trong địa chất công trình - địa kỹ thuật.

Từ khóa: Chuyển đổi số, Địa chất công trình; Địa kỹ thuật; Mô hình số, GIS.

1. Đặt vấn đề

Trong lĩnh vực Địa chất công trình - Địa kỹ thuật, sự tích hợp của Công nghệ Thông tin (CNTT) và các công nghệ chuyển đổi số đã tạo ra những thay đổi sâu sắc, định hình cách các chuyên gia thu thập, xử lý, quản lý và phân tích thông tin địa chất. CNTT trong lĩnh vực này không chỉ là việc áp dụng máy tính, viễn thông hay hệ thống văn phòng, mà còn là việc tích hợp các thiết bị điện tử và công nghệ di động để thu thập, lưu trữ, xử lý, truyền tải và trực quan hóa dữ liệu một cách đồng bộ và có hệ thống.

Theo Loudon (2000), mối quan hệ giữa dữ liệu, thông tin và kiến thức là cơ sở để hiểu sự tác động của CNTT trong địa kỹ thuật. CNTT mang lại hai lợi ích chính: (i) khả năng tính toán mạnh mẽ, cho phép phân tích định lượng, thống kê và mô phỏng các hiện tượng địa kỹ thuật phức tạp; và (ii) quản lý dữ liệu hiệu quả, cho phép lưu trữ, truy xuất và tích hợp các bộ dữ liệu lớn từ nhiều nguồn khác nhau, bao gồm dữ liệu khảo sát hiện trường, lỗ khoan, GIS, cơ sở dữ liệu lớn và mô hình số 2D/3D (Burrough, McDonnell et al. 2015).

Sự phát triển của công nghệ số và khả năng tính toán từ thập niên 1960-1970 đã thúc đẩy quá trình số hóa các phương pháp truyền thống, đồng thời mở ra khả năng phát triển các phương pháp phân tích địa kỹ thuật mới. Trong những năm gần đây, các công nghệ như mô hình số địa hình 2D/3D, mô hình số địa kỹ thuật (FEM, DEM, FLAC, UDEC, PFC2D/3D), hệ thống GIS 2D/3D, và cơ sở dữ liệu lớn đã cho phép mô hình hóa môi trường địa chất công trình với độ chi tiết cao, khả năng dự báo rủi ro chính xác và trực quan hóa mạnh mẽ (Burrough, McDonnell et al. 2015, Nhu, Hoang et al. 2020).

Ứng dụng CNTT trong địa kỹ thuật không chỉ là xử lý dữ liệu, mà còn là chuyển đổi phương pháp tư duy kỹ thuật. “Cách mạng số” đã tạo ra môi trường mà trong đó các mô hình, phân tích và quyết định kỹ thuật có thể được thực hiện một cách nhanh chóng, chính xác và dựa trên dữ liệu thực tế. Tuy nhiên, để tận dụng tối đa tiềm năng CNTT, cần chuẩn hóa dữ liệu, đồng bộ hóa dữ liệu đa nguồn, và tích hợp các công nghệ tiên tiến nhằm tăng độ tin cậy và giá trị ứng dụng của mô hình.

Phân tích trên cho thấy CNTT và chuyển đổi số không chỉ là công cụ thu thập dữ liệu, mà còn là nền tảng để mô hình hóa, phân tích, tích hợp dữ liệu và ra quyết định kỹ thuật. Việc đồng bộ

hóa dữ liệu, tiêu chuẩn hóa định dạng và áp dụng các công nghệ tiên tiến là yếu tố then chốt để nâng cao chất lượng mô hình, độ tin cậy và hiệu quả thực tiễn trong các dự án địa kỹ thuật.

2. Cơ sở và công nghệ chuyển đổi số

Ứng dụng CNTT trong Địa chất công trình - Địa kỹ thuật đã tạo ra một bước ngoặt trong cách thu thập, quản lý, phân tích và mô hình hóa dữ liệu. Sự chuyển đổi số không chỉ là việc chuyển đổi dữ liệu từ dạng analog sang số, mà còn mở ra khả năng xử lý lượng lớn dữ liệu một cách nhanh chóng, đồng bộ hóa thông tin, cải thiện chất lượng phân tích và hỗ trợ ra quyết định kỹ thuật.

Khả năng xử lý dữ liệu khổng lồ và phân tích nhanh chóng là lợi thế chính của CNTT. Các dữ liệu từ khảo sát địa vật lý, viễn thám, thí nghiệm và quan sát hiện trường có thể được tổng hợp, phân tích thống kê, khử nhiễu và tích hợp vào các mô hình không gian trong vài giây - điều không thể thực hiện được trong thời kỳ tiền kỹ thuật số. CNTT cũng thay đổi cách các chuyên gia tư duy và nghiên cứu, từ việc dựa vào quan sát và kinh nghiệm sang việc mô hình hóa dữ liệu số, cho phép trực quan hóa 2D, 3D, thậm chí 4D (bao gồm yếu tố thời gian). Những tiến bộ này thúc đẩy phát triển các phương pháp số hóa tiên tiến, tăng cường các kỹ thuật khảo sát truyền thống, và mở ra khả năng phát triển các mô hình địa kỹ thuật phức tạp hơn.

2.1 Tiêu chuẩn hóa và đồng nhất dữ liệu

Một trong những thách thức lớn trong quá trình chuyển đổi số trong lĩnh vực Địa chất công trình - Địa kỹ thuật là việc đảm bảo tính đồng nhất và khả năng tương tác của dữ liệu. Dữ liệu địa chất thường đến từ nhiều nguồn khác nhau, có định dạng đa dạng và chứa thông tin phức tạp. Việc thiếu sự đồng nhất trong định dạng và cấu trúc dữ liệu không chỉ gây khó khăn trong việc chia sẻ và tích hợp dữ liệu mà còn ảnh hưởng đến chất lượng và hiệu quả của các phân tích và mô hình hóa địa chất công trình - địa kỹ thuật.

Công nghệ thông tin đóng vai trò quan trọng trong việc tiêu chuẩn hóa và đồng nhất dữ liệu địa kỹ thuật. Các tiêu chuẩn quốc tế như của Liên đoàn các Hiệp hội Địa kỹ thuật Quốc tế (FedIGS), bao gồm các tổ chức thành viên như ISSMGE, ISRM và IAEG, đã và đang phát triển các hướng dẫn và tiêu chuẩn để thống nhất định dạng dữ liệu, quy trình mô tả và phân loại thông tin địa kỹ thuật. Việc áp dụng các tiêu chuẩn này giúp tăng cường khả năng tương tác và tích hợp dữ liệu giữa các hệ thống và phần mềm khác nhau, đồng thời nâng cao khả năng chia sẻ và tái sử dụng dữ liệu trong cộng đồng khoa học và kỹ thuật. Tuy nhiên, việc xử lý và quản lý dữ liệu địa kỹ thuật trong môi trường số đòi hỏi phải áp dụng các quy tắc nghiêm ngặt về tính đồng nhất của các định dạng dữ liệu và lựa chọn các tham số thích hợp để mô tả. Điều này đặc biệt quan trọng khi sử dụng cơ sở dữ liệu lớn và các công cụ phân tích số, vì sự không đồng nhất trong dữ liệu có thể dẫn đến sai sót trong phân tích và quyết định kỹ thuật.

Một xu hướng đáng chú ý là việc các chuyên gia, ngay cả trong cùng một tổ chức, thường làm việc độc lập với các công nghệ, chọn công cụ và cấu trúc dữ liệu riêng biệt để lưu trữ và xử lý thông tin. Nếu không có nỗ lực tiêu chuẩn hóa, điều này có thể dẫn đến việc người dùng phải dành nhiều thời gian hơn cho việc chuyển đổi và đồng bộ hóa dữ liệu thay vì tập trung vào giải quyết các vấn đề địa kỹ thuật. Việc chia sẻ dữ liệu giữa các tổ chức sẽ làm tăng thêm độ phức tạp trong việc tích hợp và sử dụng dữ liệu. Để giải quyết vấn đề này, các hiệp hội quốc tế như ISSMGE, ISRM và IAEG đã và đang tích cực tham gia vào việc phát triển và thúc đẩy việc áp dụng các tiêu chuẩn dữ liệu chung trong cộng đồng địa kỹ thuật. Việc thực hiện các tiêu chuẩn này không chỉ giúp liên kết tốt hơn với các phần mềm chuyên dụng mà còn tạo điều kiện thuận lợi cho việc chia sẻ và tái sử dụng dữ liệu trong các dự án và nghiên cứu khác nhau. Một ví dụ điển hình là sáng kiến của Tập đoàn Phần mềm Mở Kỹ thuật Dầu khí (POSC), nơi các công ty dầu mỏ đã hợp tác để phát triển các tiêu chuẩn và môi trường hệ thống mở. Điều này giúp giải phóng các công ty khỏi lo lắng về việc tích hợp hệ thống máy tính của họ và cho phép họ tập trung vào các lĩnh vực có giá trị gia tăng (Chalon, Karcher et al. 1993). Trong bối cảnh chuyển đổi số hiện nay, CNTT không chỉ là công cụ hỗ trợ mà còn là nền tảng cơ sở cho việc thu thập, xử lý và phân tích dữ liệu địa kỹ

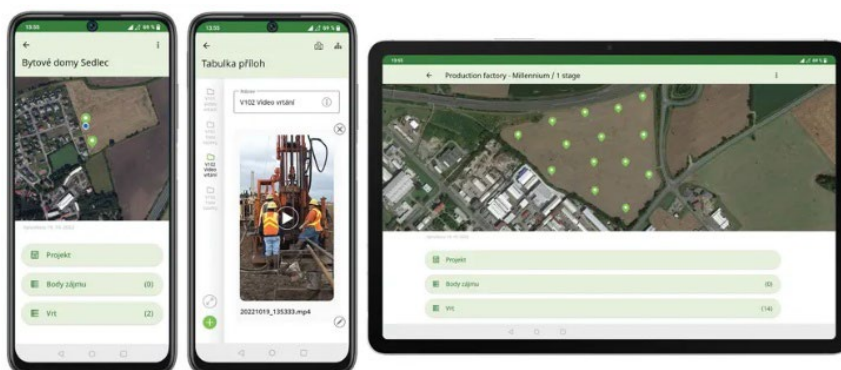
thuật. Việc tiêu chuẩn hóa và đồng nhất dữ liệu không chỉ giúp cải thiện hiệu quả công việc mà còn tạo ra cơ hội mới cho việc phát triển các mô hình và phương pháp phân tích tiên tiến, ứng dụng trong thiết kế và thi công công trình địa kỹ thuật.

2.2 Công nghệ chuyển đổi số thu thập dữ liệu hố khoan hiện trường

Trong quá trình khảo sát hiện trường, việc thu thập dữ liệu hố khoan đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá điều kiện địa chất và hỗ trợ thiết kế công trình. Truyền thống, dữ liệu này thường được ghi chép thủ công vào sổ sách, dẫn đến khả năng sai sót và khó khăn trong việc chia sẻ và phân tích. Tuy nhiên, sự phát triển của CNTT đã mang lại những cải tiến đáng kể trong việc thu thập và xử lý dữ liệu hố khoan. Việc tiêu chuẩn hóa dữ liệu hố khoan là bước đầu tiên trong quá trình chuyển đổi số. Các tiêu chuẩn như NEN 5104 và CUR GEF-BORE 2002 đã được phát triển để mô tả chi tiết các thông số địa kỹ thuật của hố khoan, bao gồm độ sâu, phân loại đất, phương pháp lấy mẫu, dữ liệu ô nhiễm và điều kiện thực hiện. Việc áp dụng các tiêu chuẩn này giúp đảm bảo tính nhất quán và khả năng tương tác của dữ liệu giữa các hệ thống và tổ chức khác nhau.

Việc sử dụng thiết bị di động và máy tính xách tay kết hợp với hệ thống định vị toàn cầu (GPS) cho phép thu thập tọa độ tự động và đồng bộ hóa dữ liệu với hệ thống trung tâm. Phương pháp này không chỉ cải thiện độ chính xác và toàn vẹn của dữ liệu mà còn giảm thiểu thất thoát thông tin và loại bỏ nhu cầu nhập liệu thủ công. Các phần mềm như QuickLog PDA và PLog đã được phát triển để hỗ trợ quá trình này, cung cấp giao diện dễ sử dụng và khả năng tích hợp với các hệ thống cơ sở dữ liệu và phần mềm phân tích khác. Việc sử dụng cơ sở dữ liệu quan hệ (RDBMS) cho phép lưu trữ dữ liệu hố khoan theo cấu trúc cha/con, giúp dễ dàng tích hợp dữ liệu mới và hỗ trợ phân tích, mô phỏng và lập kế hoạch kỹ thuật. Các hệ thống như gINT và Aldoa cung cấp khả năng tạo và quản lý các bản ghi hố khoan, bao gồm thông tin về mẫu đất, điều kiện nước ngầm, phương pháp thí nghiệm và các thông số kỹ thuật khác. Việc áp dụng mô hình hóa dữ liệu giúp cải thiện khả năng phân tích và dự báo, hỗ trợ ra quyết định trong thiết kế và thi công công trình.

Việc tích hợp dữ liệu hố khoan vào hệ thống GIS cho phép trực quan hóa và phân tích dữ liệu không gian, hỗ trợ đánh giá tổng thể về điều kiện địa chất và môi trường. Các phần mềm như ArcGIS và QGIS cung cấp công cụ để tích hợp và phân tích dữ liệu hố khoan, hỗ trợ việc lập bản đồ địa kỹ thuật và đánh giá rủi ro. Việc tích hợp này không chỉ cải thiện hiệu quả công việc mà còn tạo ra cơ hội mới cho việc phát triển các mô hình và phương pháp phân tích tiên tiến. Mặc dù công nghệ chuyển đổi số đã mang lại nhiều lợi ích, nhưng vẫn còn một số thách thức cần được giải quyết. Việc thiếu đồng nhất trong định dạng và cấu trúc dữ liệu giữa các tổ chức và hệ thống khác nhau có thể gây khó khăn trong việc chia sẻ và tích hợp dữ liệu. Hơn nữa, việc đào tạo nhân lực và đầu tư vào cơ sở hạ tầng công nghệ là cần thiết để đảm bảo việc áp dụng hiệu quả các công nghệ mới. Tuy nhiên, với sự phát triển không ngừng của CNTT và sự hợp tác giữa các tổ chức, triển vọng của công nghệ chuyển đổi số trong lĩnh vực Địa chất công trình - Địa kỹ thuật là rất hứa hẹn.



Hình 14. Ứng dụng di động thu thập dữ liệu hố khoan hiện trường

2.3 Công nghệ chuyển đổi số phân tích dữ liệu xuyên tĩnh hiện trường

Thí nghiệm xuyên tĩnh hiện trường (CPT) là phương pháp quan trọng để đánh giá đặc tính cơ lý của các lớp đất mềm theo chiều sâu. Dữ liệu thu được từ CPT bao gồm lực cản đầu mũi, lực ma sát bên, và đôi khi các thông số điện trở hoặc dẫn nhiệt, cung cấp thông tin chi tiết về tính chất cơ lý đất theo từng lớp (Robertson 2016, Wang, Zhang et al. 2025). Trước đây, việc giải thích dữ liệu CPT phụ thuộc phần lớn vào kinh nghiệm của kỹ sư và phân tích thủ công, dễ dẫn đến sai số và không đồng nhất giữa các chuyên gia. Sự phát triển của công nghệ thông tin và thuật toán số đã cho phép tự động hóa quá trình giải thích dữ liệu, tích hợp trực tiếp với dữ liệu lỗ khoan và các đơn vị địa kỹ thuật đã xác định trước, từ đó nâng cao độ chính xác trong việc xác định ranh giới giữa các lớp đất (Coerts 1996).

Các nghiên cứu ban đầu tại Hà Lan đã thử nghiệm giải thích tự động dữ liệu CPT nhưng chỉ dựa trên lực cản từ hình nón, và cho thấy kết quả không hoàn toàn chính xác. Nhiều lớp đất không biểu hiện rõ ràng trong thực địa, đòi hỏi kỹ sư phải xác định sự chuyển tiếp dần giữa các lớp đất khác nhau. Coerts (1996) đã mở rộng phương pháp bằng cách kết hợp thông tin từ các lỗ khoan và đơn vị địa kỹ thuật đã xác định trước, cho phép xác định ranh giới lớp đất ở các vị trí giữa lỗ khoan một cách đáng tin cậy hơn. Hiện nay, với các công cụ phân tích số và học máy, dữ liệu CPT có thể được xử lý tự động theo nhiều bước: (1) Tiền xử lý và chuẩn hóa dữ liệu từ nhiều nguồn khác nhau; (2) Nhận dạng lớp đất bằng các thuật toán phân cụm và hồi quy; và (3) Kết hợp với mô hình 2D/3D để tái tạo liên tục ranh giới giữa các lớp đất theo không gian, phục vụ phân tích ổn định và mô phỏng kỹ thuật công trình.

2.4 Công nghệ chuyển đổi số xây dựng mô hình số địa hình 3D

Việc xây dựng mô hình số 3D của bề mặt địa hình và công trình đóng vai trò quan trọng trong phân tích ổn định, đánh giá rủi ro và lập kế hoạch thi công. Các công nghệ số hiện đại như LIDAR và chụp ảnh lập thể (photogrammetry) cho phép tái hiện bề mặt tự nhiên và các công trình với độ chi tiết cao, đo lường chính xác hình dạng, vị trí và hướng các yếu tố địa chất như khe nứt, mòm đá, lớp đất lộ thiên, hoặc các công trình nhân tạo (Slob, Hack et al. 2002). Độ phân giải dữ liệu có thể đạt từ centimet đến milimet, cung cấp nền tảng chính xác cho phân tích gián đoạn địa chất và mô hình hóa số.

Với sự phát triển của công nghệ LIDAR và khả năng tính toán mạnh mẽ của máy tính, các dữ liệu địa hình 3D có thể được thu thập tự động, đồng bộ và phân tích chi tiết. LIDAR đo khoảng cách đến bề mặt bằng thời gian bay (Time-of-Flight) của tia laser phản xạ, kết hợp với thông tin hướng và vị trí của máy quét, cho phép xác định chính xác tọa độ 3D của từng điểm trên bề mặt. Khi quét các mòm đá hoặc khe đào, dữ liệu thu được tạo ra đám mây điểm 3D với độ phân giải cao, từ đó trích xuất hình dạng, diện tích và hướng các bề mặt gián đoạn (Slob, Hack et al. 2002).

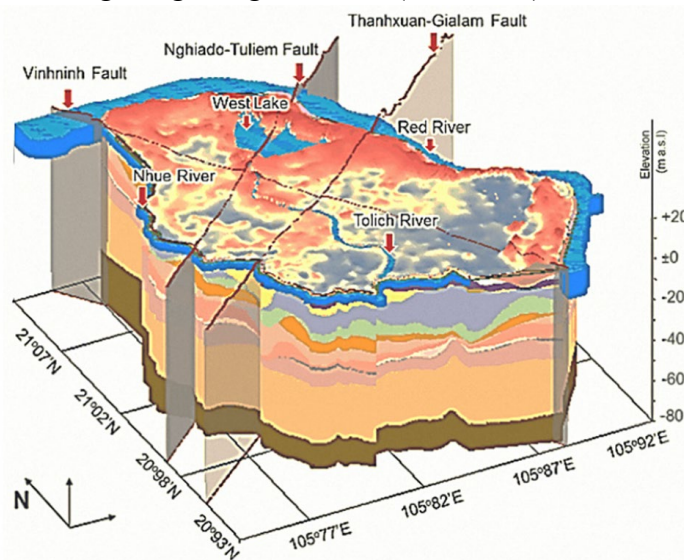
Trong quy trình xử lý dữ liệu, bề mặt 3D được biểu diễn bằng mạng lưới tam giác (triangular mesh). Hướng và diện tích của từng tam giác được tính toán dựa trên quy tắc hình học, sau đó biểu diễn trong đám mây điểm để xác định mật độ và phân bố hướng các tập hợp gián đoạn. Các biểu đồ mật độ cho phép nhận dạng các tập hợp khe nứt, mặt phẳng gián đoạn và vết nứt một cách trực quan và thống kê, cung cấp cơ sở cho mô hình số địa kỹ thuật và phân tích ổn định công trình.

2.5 Mô hình số điều kiện Địa chất công trình

Trong lĩnh vực Địa chất công trình - Địa kỹ thuật, mô hình số kỹ thuật đóng vai trò trung tâm trong việc tích hợp dữ liệu khảo sát, thông số địa kỹ thuật, và đặc điểm môi trường đất - đá, từ đó hỗ trợ trực quan hóa, mô phỏng và ra quyết định kỹ thuật. Sự phát triển của mô hình 4D mở rộng khả năng này bằng cách đưa vào yếu tố thời gian, cho phép đánh giá tiến trình đào đất, lún nền, biến dạng hoặc các quá trình thay đổi địa chất theo thời gian. Những ứng dụng tiên phong trong ngành khai thác mỏ nhiều thập kỷ trước đã trở thành chuẩn mực cho các dự án xây dựng dân dụng quy mô lớn. Tất cả thông tin liên quan đến mô hình không gian và đặc tính địa chất công trình - địa kỹ thuật của các lớp đất dưới và xung quanh công trình như đường hầm, hồ đào móng sâu, và

nền móng cầu đường, đều có thể được tích hợp vào mô hình số 2D/3D (Benz and Nordal 2010).

Khả năng xuất dữ liệu thành cấu hình lớp và thông số địa kỹ thuật phục vụ trực tiếp cho mô hình địa cơ, tính toán ổn định nền, phân tích lún, và lập kế hoạch thi công. Điều này làm tăng hiệu quả, giảm sai sót và cung cấp cơ sở dữ liệu nhất quán để phối hợp giữa các nhóm kỹ sư, nhà thầu và cơ quan quản lý. Tuy nhiên, việc áp dụng mô hình số cũng đặt ra câu hỏi về độ khả dụng và độ tin cậy của mô hình. Không giống như mô hình “vẽ tay” truyền thống, mô hình kỹ thuật số có thể kiểm định, đánh giá sai số và xác định phạm vi tin cậy dựa trên nguồn gốc dữ liệu, tiêu chuẩn thu thập, và phương pháp liên kết dữ liệu. Các yếu tố then chốt ảnh hưởng đến độ tin cậy của mô hình bao gồm: (1) Chất lượng dữ liệu đầu vào: dữ liệu khảo sát, lỗ khoan, CPT, và thông số cơ lý; (2) Tiêu chuẩn hóa và đồng nhất dữ liệu: đảm bảo khả năng tích hợp, so sánh và phân tích; (3) Phương pháp mô hình hóa: thuật toán 2D/3D, tích hợp GIS và phân tích thống kê; và (4) Trình độ và kinh nghiệm của chuyên gia địa kỹ thuật: trong việc kiểm định và hiệu chỉnh mô hình. Những thách thức này đòi hỏi sự chú ý liên tục và hợp tác giữa các chuyên gia Địa chất công trình - Địa kỹ thuật, kỹ sư phần mềm, và nhà quản lý dự án để đảm bảo rằng mô hình số không chỉ trực quan mà còn đáng tin cậy và có thể ứng dụng trong thực tiễn (Nhu 2021).



Hình 15. Mô hình địa kỹ thuật 3D độ phân giải cao của thành phố Hà Nội (Nhu 2021)

2.6 Mô hình số địa kỹ thuật

Sự phát triển vượt bậc của sức mạnh tính toán hiện đại đã mở rộng khả năng xây dựng các mô hình số địa kỹ thuật phức tạp, bao gồm các phương pháp phân tử hữu hạn (FEM), phân tử riêng biệt (DEM), FLAC, UDEC, PFC2D/3D. Các công cụ này cho phép mô phỏng các hiện tượng địa kỹ thuật không đều, liên tục và không liên tục, từ biến dạng nền đất đến sự dịch chuyển, rạn nứt và sụt lún trong môi trường đất - đá (Potyondy and Cundall 2004, Itasca 2011).

Trong thập kỷ qua, sự gia tăng tốc độ xử lý và khả năng quản lý khối lượng dữ liệu lớn đã giúp chuyển đổi các phương pháp phân tích địa kỹ thuật từ lý thuyết sang ứng dụng thực tế. Các phương pháp FEM, DEM, phân tử dòng hạt (PFC) hiện cho phép mô hình hóa 3D và 4D, trong đó thời gian được tích hợp như một yếu tố quan trọng để mô phỏng tiến trình đào đất, tải trọng lũy tiến và biến dạng phụ thuộc thời gian (Rengers, Hack et al. 2002, Benz and Nordal 2010).

Các gói phần mềm nổi bật như FLAC và UDEC được phát triển bởi ITASCA, ban đầu từ các ứng dụng trong ngành hàng không, nay trở thành chuẩn mực trong phân tích địa kỹ thuật. FLAC cho phép mô phỏng liên tục phi tuyến của đất và đá, trong khi UDEC hỗ trợ phân tích không liên tục các khối địa chất. Các chương trình PFC2D và PFC3D mô hình hóa các khối đá dưới dạng các cụm hạt rời rạc, đặc biệt phù hợp với các tình huống khối đá tách rời, rơi và lăn trong khai thác mỏ hoặc sụt trượt dốc (Rengers, Hack et al. 2002, Potyondy and Cundall 2004, Benz and Nordal 2010).

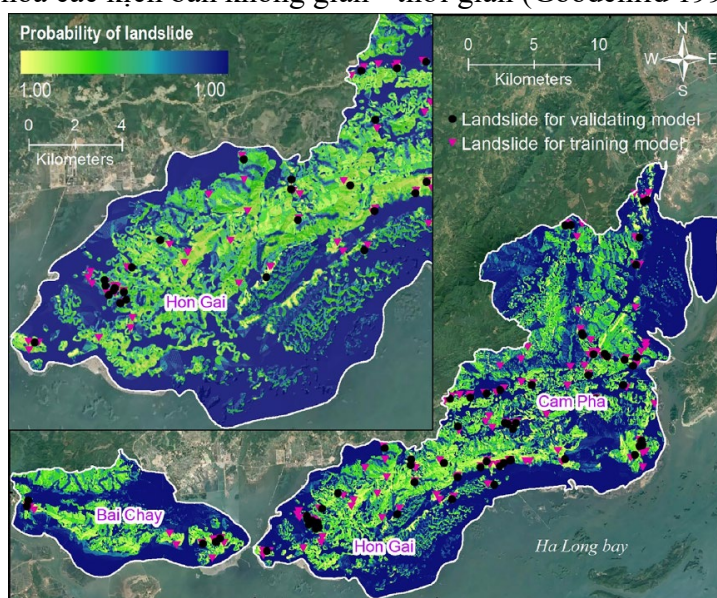
Tuy nhiên, nút thắt hiện nay không còn nằm ở khả năng tính toán, mà ở chất lượng dữ liệu đầu vào. Việc mô hình hóa chi tiết môi trường địa chất phụ thuộc vào độ phân giải và độ tin cậy của dữ liệu khảo sát thực địa, lỗ khoan, CPT, thí nghiệm xuyên tĩnh và quan sát bề mặt (Phoon and Tang 2019). Việc xác định chính xác biến đổi không gian của các đặc tính cơ lý đất - đá vẫn là một thách thức lớn, dẫn đến một nghịch lý trong ứng dụng CNTT hiện đại: "càng biết nhiều, chúng ta càng nhận ra những gì chưa hiểu rõ".

Hậu quả của nghịch lý này là các kỹ sư địa kỹ thuật thường áp dụng thiết kế thận trọng hơn, đặc biệt trong các dự án lớn hoặc phức tạp, nhằm giảm thiểu rủi ro liên quan đến những bất định trong dữ liệu đầu vào. Mô hình số trở thành công cụ hỗ trợ ra quyết định, không chỉ để mô phỏng hiện tượng địa kỹ thuật, mà còn để đánh giá độ tin cậy, các rủi ro tiềm ẩn và các phương án thiết kế thay thế (Phoon and Tang 2019).

2.7 Mô hình địa không gian và hệ thống tin địa lý GIS

Hệ thống thông tin địa lý (GIS) 2D/3D đã trở thành công cụ cơ bản và thiết yếu trong việc quản lý, phân tích và trực quan hóa dữ liệu địa lý cho Địa chất công trình - Địa kỹ thuật. GIS không chỉ cho phép lưu trữ và truy xuất dữ liệu, mà còn hỗ trợ tích hợp các bộ dữ liệu đa nguồn, thực hiện xếp chồng lớp, phân tích không gian phức tạp và xây dựng các mô hình địa không gian phục vụ ra quyết định (Burrough, McDonnell et al. 2015, Longley, Goodchild et al. 2015).

Các kỹ thuật GIS hiện đại cho phép tích hợp dữ liệu từ lỗ khoan, CPT, khảo sát bề mặt, LiDAR, ảnh lập thể, và các hệ thống quan trắc trực tuyến vào một cơ sở dữ liệu chung, từ đó tạo ra thông tin mới và mô hình hóa các kịch bản không gian - thời gian (Goodchild 1992).



Hình 16. Bản đồ dự báo nguy cơ trượt lở đất đá sử dụng mô hình GIS kết hợp học máy khu vực Hạ Long (Nhu, Hoang et al. 2020)

Việc tích hợp GIS với mô hình học máy cho phép xây dựng bản đồ phân bố nguy cơ sạt lở khu vực, giúp xác định các khu vực nhạy cảm và đưa ra biện pháp phòng chống thiên tai hiệu quả. Dữ liệu GIS cung cấp khung không gian để lưu trữ, chuẩn hóa và tương tác với các yếu tố ảnh hưởng, trong khi học sâu khai thác khả năng nhận dạng các mối quan hệ phi tuyến và phức tạp giữa các yếu tố này, từ đó nâng cao độ tin cậy của dự báo. Một nghiên cứu tại khu vực Hạ Long, Việt Nam, sử dụng mạng nơ-ron sâu (DNN) trong Keras kết hợp với các thuật toán tối ưu hóa (SGD, RMSprop, Adam) và hai hàm mất mát để mô hình hóa nguy cơ trượt lở trên cơ sở 10 yếu tố ảnh hưởng (độ dốc, hướng sườn, độ cong địa hình, chỉ số ẩm ướt địa hình, sử dụng đất, khoảng cách tới đường và sông, loại đất, khoảng cách tới đứt gãy, và đặc điểm đá) cho thấy độ chính xác dự báo vượt trội (Nhu, Hoang et al. 2020). Ngoài ra, GIS còn hỗ trợ phân tích độ nhạy (sensitivity analysis) và định lượng độ không chắc chắn, kết hợp các phương pháp thống kê như bootstrap để đánh giá các tham số địa

kỹ thuật khó xác định (Efron 1994). Nhờ đó, các mô hình GIS không chỉ là công cụ lưu trữ và hiển thị mà còn trở thành nền tảng cho quy trình ra quyết định kỹ thuật dựa trên dữ liệu trong các dự án địa chất công trình, đặc biệt ở những vùng dễ xảy ra trượt lở và thiên tai.

2.8 Cơ sở dữ liệu lớn Địa chất công trình - Địa kỹ thuật

Trong bối cảnh chuyển đổi số, các tổ chức khảo sát địa chất quốc gia đã phát triển các hệ thống cơ sở dữ liệu lớn (Big Data) để lưu trữ, quản lý và phân tích toàn bộ thông tin về Địa chất công trình - Địa kỹ thuật trên phạm vi quốc gia. Một ví dụ điển hình là hệ thống DINO do TNO-NITG (Viện Khoa học Địa chất ứng dụng Hà Lan - Cơ quan Khảo sát Địa chất Hà Lan) triển khai. Hệ thống này tích hợp dữ liệu từ nhiều nguồn khác nhau, bao gồm dữ liệu hiện trường, dữ liệu lỗ khoan, CPT, mô hình số địa hình 3D, thông tin giám sát trực tuyến và dữ liệu nghiên cứu khoa học. Hệ thống DINO áp dụng các quy trình kiểm soát chất lượng dữ liệu nghiêm ngặt, đảm bảo tính chính xác, đầy đủ và đồng nhất của dữ liệu trước khi được lưu trữ và phân phối. Nhờ vậy, dữ liệu có thể được truy xuất và phân tích một cách thống nhất, đồng thời hỗ trợ chia sẻ thông tin với các tổ chức nghiên cứu, nhà quản lý và các phần mềm kỹ thuật chuyên dụng (Culshaw 2003, Benz and Nordal 2010).

Một thách thức lớn của các cơ quan khảo sát quốc gia là tích hợp và tổ chức khả năng truy cập toàn bộ dữ liệu Địa chất công trình - Địa kỹ thuật trên lãnh thổ. Vai trò của các tổ chức này đã chuyển từ việc xuất bản bản đồ địa chất truyền thống sang cung cấp truy cập số hóa đến dữ liệu địa chất công trình, cho phép người dùng bên ngoài khai thác dữ liệu theo các chuẩn định dạng và giao diện kỹ thuật số. Việc này đồng nghĩa với việc tất cả dữ liệu mới được thu thập đều nhập trực tiếp dưới dạng số hóa, đồng thời các quy trình truy cập và chia sẻ dữ liệu được chuẩn hóa để tối ưu hóa khả năng tích hợp và phân tích (Benz and Nordal 2010, Wang, Zhang et al. 2025). Hệ thống DINO được thiết kế theo các nguyên tắc cơ bản: (1) Tích hợp dữ liệu đa nguồn: Dữ liệu do TNO-NITG thu thập trực tiếp hoặc nhận từ các bên thứ ba đều được nhập vào cơ sở dữ liệu, đảm bảo chuẩn hóa định dạng và tiêu chuẩn hóa mô tả dữ liệu; (2) Kiểm soát chất lượng dữ liệu: Quy trình kiểm soát chất lượng nghiêm ngặt áp dụng cho tất cả dữ liệu mới nhập, cho phép lựa chọn dữ liệu phù hợp cho phân tích, mô hình hóa và giải thích kỹ thuật; và (3) Tích hợp kết quả phân tích: Kết quả từ các phân tích, mô hình số địa kỹ thuật hoặc GIS có thể được nhập lại vào DINO, tạo thành chu trình dữ liệu khép kín, giúp tăng tính liên kết giữa quan sát thực địa, phân tích kỹ thuật và mô hình dự báo.

Ngoài các chức năng truyền thống, cơ sở dữ liệu lớn địa chất công trình hiện nay còn là nền tảng cho các ứng dụng dự báo thiên tai và mô hình rủi ro trượt lở. Dữ liệu tích hợp từ nhiều lớp địa chất, đặc tính cơ lý, sử dụng đất, độ dốc và các thông số môi trường được khai thác bằng các thuật toán học máy hoặc mạng nơ-ron sâu để tạo bản đồ nhạy cảm trượt lở theo khu vực, cung cấp thông tin cho quản lý rủi ro và lập kế hoạch phòng chống thiên tai (Nhu, Hoang et al. 2020). Việc triển khai cơ sở dữ liệu lớn trong lĩnh vực Địa chất công trình - Địa kỹ thuật không chỉ cải thiện khả năng truy xuất và chia sẻ dữ liệu, mà còn tạo nền tảng cho chuyển đổi số toàn diện, từ thu thập dữ liệu hiện trường, xử lý và mô hình hóa, đến dự báo, trực quan hóa và ra quyết định kỹ thuật dựa trên dữ liệu.

3. Kết luận

Kết quả từ việc áp dụng các tiêu chuẩn quốc tế (IAEG, ISRM, ISSMGE) và các sáng kiến như POSC cho thấy việc đồng nhất dữ liệu tạo điều kiện thuận lợi cho việc tích hợp các bộ dữ liệu đa nguồn. Các định dạng dữ liệu chuẩn hóa giúp tăng khả năng tương tác giữa phần mềm, giảm thiểu lỗi dữ liệu và tối ưu hóa thời gian xử lý. Thực tế triển khai cho thấy, khi các kỹ sư sử dụng dữ liệu từ nhiều lỗ khoan và các khảo sát hiện trường, khả năng đồng bộ dữ liệu tăng đáng kể, giảm nguy cơ mất thông tin trong quá trình chuyển đổi số.

Ứng dụng thiết bị di động và GPS cho phép thu thập tọa độ tự động và lưu trữ dữ liệu trực tiếp vào cơ sở dữ liệu RDBMS. Việc số hóa dữ liệu lỗ khoan theo chuẩn GEF-BORE và NEN 5104 cho thấy độ chính xác cao hơn so với phương pháp nhập liệu thủ công. Đồng thời, dữ liệu số được

đồng bộ hàng ngày với hệ thống trung tâm, đảm bảo tính toàn vẹn và sẵn sàng tích hợp vào GIS, phục vụ phân tích và mô phỏng địa kỹ thuật.

Thuật toán số cho phép giải thích dữ liệu CPT kết hợp với thông tin lỗ khoan giúp xác định ranh giới lớp đất một cách tự động và chính xác hơn, giảm sự phụ thuộc vào kinh nghiệm cá nhân. Mô hình số 3D và 4D tích hợp thông tin khảo sát, địa hình, và thông số cơ lý đất đá cho phép mô phỏng biến dạng nền theo thời gian, hỗ trợ thiết kế kỹ thuật dựa trên dữ liệu thực.

Tích hợp GIS 2D/3D với các bộ dữ liệu địa chất công trình - địa kỹ thuật cho phép trực quan hóa, xếp chồng lớp và phân tích không gian phức tạp. Dữ liệu GIS cung cấp khung không gian để lưu trữ, chuẩn hóa và tương tác với các yếu tố ảnh hưởng, trong khi học sâu khai thác khả năng nhận dạng các mối quan hệ phi tuyến và phức tạp giữa các yếu tố này, từ đó nâng cao độ tin cậy của dự báo. Đặc biệt, việc tích hợp GIS với các mô hình học máy đã chứng minh khả năng dự báo rủi ro thiên tai chính xác vượt trội so với các phương pháp truyền thống.

Hệ thống DINO của TNO-NITG chứng minh khả năng quản lý, lưu trữ và chia sẻ toàn bộ dữ liệu quốc gia về Địa chất công trình - Địa kỹ thuật, đồng thời hỗ trợ tích hợp dữ liệu từ các phân tích số, mô hình 2D/3D và GIS. Chu trình dữ liệu khép kín giúp nâng cao độ tin cậy của thông tin và rút ngắn thời gian đưa dữ liệu vào ra quyết định kỹ thuật.

4. Thảo luận

Các kết quả trên cho thấy công nghệ số không chỉ là công cụ thu thập dữ liệu, mà còn là nền tảng cho mô hình hóa, phân tích và ra quyết định kỹ thuật. Việc tiêu chuẩn hóa dữ liệu và áp dụng RDBMS cùng GIS giúp các tổ chức khảo sát nâng cao khả năng tương tác dữ liệu, giảm thiểu sai sót, và tăng cường phân tích đa chiều.

Mô hình số 2D/3D và các mô hình địa kỹ thuật như FEM, DEM, FLAC hay PFC2D/3D cho phép mô phỏng các quá trình biến dạng phức tạp theo không gian và thời gian, nhưng vẫn phụ thuộc mạnh vào chất lượng dữ liệu đầu vào. Việc áp dụng công nghệ số giúp giảm bất định từ giải thích thủ công, nhưng đồng thời đặt ra yêu cầu cao về khả năng đồng bộ và chi tiết dữ liệu khảo sát.

Kết quả mô hình học sâu GIS cho thấy tiềm năng lớn của GIS không chỉ trong trực quan hóa mà còn trong dự báo thiên tai, đặc biệt là trượt lở. Sự kết hợp dữ liệu địa hình, đặc tính đất đá, sử dụng đất, và các yếu tố môi trường tạo ra các bản đồ nhạy cảm trượt lở đáng tin cậy, hỗ trợ quản lý rủi ro và lập kế hoạch phòng chống thiên tai tại cấp khu vực và quốc gia.

Mặc dù sức mạnh tính toán ngày càng cao, các hạn chế chính không còn nằm ở phần cứng mà tập trung vào chất lượng và độ chi tiết dữ liệu đầu vào. Cần tiếp tục đầu tư vào thu thập dữ liệu số hóa chất lượng cao, áp dụng chuẩn hóa quốc tế, và tích hợp các công cụ GIS và mô hình học máy để tối ưu hóa khả năng dự báo. Ngoài ra, việc mở rộng chia sẻ dữ liệu giữa các tổ chức và sử dụng dữ liệu lớn sẽ là nền tảng quan trọng cho chuyển đổi số toàn diện trong Địa chất công trình - Địa kỹ thuật.

Tài liệu tham khảo

- Benz, T. and S. Nordal (2010). Numerical methods in geotechnical engineering, CRC Press London.
- Burrough, P. A., R. A. McDonnell and C. D. Lloyd (2015). Principles of geographical information systems, Oxford University Press, USA.
- Chalon, P., B. Karcher and C. Allen (1993). An Innovative Data Modeling Methodology Applied to Petroleum Engineering Problems. SPE Petroleum Computer Conference, SPE.
- Coerts, A. (1996). Analysis of static cone penetration test data for subsurface modelling: A methodology, Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap Utrecht.
- Culshaw, M. (2003). Bridging the gap between geoscience providers and the user community. New Paradigms in Subsurface Prediction: Characterization of the Shallow Subsurface Implications for Urban Infrastructure and Environmental Assessment, Springer: 7-26.
- Efron, B. (1994). An introduction to the bootstrap, Chapman and Hall/CRC.

- Goodchild, M. F. (1992). "Geographical information science." *International journal of geographical information systems* 6(1): 31-45.
- Itasca, C. (2011). "FLAC: fast Lagrangian analysis of continua." User Manual, Itasca Consulting Group.
- Longley, P. A., M. F. Goodchild, D. J. Maguire and D. W. Rhind (2015). *Geographic information science and systems*, John Wiley & Sons.
- Loudon, T. V. (2000). *Geoscience after IT: a view of the present and future impact of information technology on geoscience*, Elsevier.
- Nhu, V.-H. (2021). Building a High-Resolution 3D Geotechnical Model of Hanoi City (Vietnam) for Geohazard Assessment and Sustainable Development. *Proceedings of the International Conference on Innovations for Sustainable and Responsible Mining*, Cham, Springer International Publishing.
- Nhu, V.-H., N.-D. Hoang, H. Nguyen, P. T. T. Ngo, T. Thanh Bui, P. V. Hoa, P. Samui and D. Tien Bui (2020). "Effectiveness assessment of Keras based deep learning with different robust optimization algorithms for shallow landslide susceptibility mapping at tropical area." *CATENA* 188(2020): 13.
- Phoon, K.-K. and C. Tang (2019). "Characterisation of geotechnical model uncertainty." *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 13(2): 101-130.
- Potyondy, D. O. and P. A. Cundall (2004). "A bonded-particle model for rock." *International journal of rock mechanics and mining sciences* 41(8): 1329-1364.
- Rengers, N., R. Hack, M. Huisman, S. Slob and W. Ziegler (2002). "Information Technology applied to engineering geology." *Engineering Geology for Developing Countries*.
- Robertson, P. K. (2016). "Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system—an update." *Canadian Geotechnical Journal* 53(12): 1910-1927.
- Slob, S., R. Hack and A. K. Turner (2002). An approach to automate discontinuity measurements of rock faces using laser scanning techniques. *ISRM EUROCK*, ISRM.
- Wang, L., X. Zhang, Y. Hong, T. Xiao, Z. Cao, S. Li and S. Wu (2025). "Efficient 3D geological modeling for offshore wind farm with sparse CPTU and borehole data." *Canadian Geotechnical Journal* 62: 1-23.

Foundations and Technologies of Digital Transformation in Geotechnical and Engineering Geology

Nhu Viet Ha^{1,*}

¹*Hanoi University of Mining and Geology*

**Corresponding author: Email: nhuvietha@humg.edu.vn*

Abstract

This paper evaluated the potential of digital transformation in Geotechnical and Engineering Geology, focusing on the collection, processing, modeling, and analysis of data. The study covers the foundations and technologies of digital transformation, employing a methodology that integrates international standards (IAEG, ISRM, ISSMGE, POSC) with modern technologies: automatic borehole data collection via mobile devices and GPS, interpretation of static penetration tests using numerical algorithms, 3D terrain modeling with LIDAR, geotechnical simulations with FEM/DEM, and GIS-based spatial analysis. The results show that digital transformation facilitates the synchronization and standardization of data from multiple sources, reduces dependence on manual processing, enables detailed 2D/3D modeling, and supports the simulation of geotechnical phenomena and high-accuracy landslide hazard prediction. The study confirms that digital transformation is not merely a data collection tool but also a foundation for modeling, analysis, and engineering decision-making, enhancing reliability and practical effectiveness in geotechnical and engineering geology.

Keywords: Digital transformation; Engineering geology; Geotechnics; Digital modeling; GIS.