BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

NGUYỄN VIỆT TIỆP

NGHIÊN CỨU ĐẶC ĐIỂM TRƯỢT ĐẤT NÔNG VÀ ẢNH HƯỞNG TỚI ỔN ĐỊNH NỀN ĐƯỜNG KHU VỰC MIỀN NÚI TÂY BẮC

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Hà Nội – 2026

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI

NGUYỄN VIỆT TIỆP

NGHIÊN CỨU ĐẶC ĐIỂM TRƯỢT ĐẤT NÔNG VÀ ẢNH HƯỞNG TỚI ỔN ĐỊNH NỀN ĐƯỜNG KHU VỰC MIỀN NÚI TÂY BẮC

Ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình giao thông

Mã ngành: 9580205

LUẬN ÁN TIẾN SĨ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC
1. PGS. TS. Nguyễn Đức Mạnh
2. PGS. TS. Mai Sỹ Hùng

Hà Nội – 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Các số liệu, kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được công bố trong bất cứ công trình nào khác.

Nghiên cứu sinh

Nguyễn Việt Tiệp

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin trân trọng cảm ơn Ban lãnh đạo Nhà trường, khoa Công trình, phòng đào tạo Sau đại học cùng toàn thể các thầy, cô giáo thuộc Bộ môn Địa kỹ thuật và Không gian ngầm, Trường Đại học Giao thông vận tải đã luôn tận tình hỗ trợ và tạo mọi điều kiện thuận lợi trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án.

Xin trân trọng cảm ơn Ban lãnh đạo Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Ban lãnh đạo Khoa Xây dựng Công trình thủy, Ban lãnh đạo Nhóm chuyên môn Xây dựng Thủy lợi – Thủy điện, nơi tác giả đang công tác cùng toàn thể các thầy, cô giáo, đồng nghiệp, bạn bè đã tạo điều kiện giúp đỡ, chia sẻ công việc để có thể hoàn thành bản luận án này.

Nghiên cứu sinh xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới PGS.TS. Nguyễn Đức Mạnh và PGS.TS. Mai Sỹ Hùng đã tận tình hướng dẫn trong suốt quá trình nghiên cứu và động viên, tạo điều kiện giúp đỡ để nghiên cứu sinh hoàn thành luận án.

Trong quá trình thực hiện, tác giả cũng rất may mắn nhận được nhiều ý kiến góp ý quý giá từ các nhà khoa học, đồng nghiệp và bạn bè trong và ngoài đơn vị. Những đóng góp đó là nguồn tri thức thiết thực, giúp luận án trở nên hoàn thiện hơn.

Cuối cùng, nghiên cứu sinh bày tỏ lòng biết ơn tới gia đình và người thân đã luôn ở bên cạnh, chia sẻ và động viên tinh thần trong suốt nhiều năm thực hiện luận án.

Tác giả

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN ..... **ii**
LỜI CẢM ƠN ..... **iii**
MỤC LỤC ..... **iv**
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT ..... **vii**
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU ..... **ix**
DANH MỤC BẢNG ..... **x**
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ ..... **xi**
MỞ ĐẦU **1**
1. Tính cấp thiết của đề tài 1
2. Mục đích nghiên cứu 2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu 2
4. Nội dung nghiên cứu 3
5. Phương pháp nghiên cứu 3
6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài 5
7. Cấu trúc của luận án 5
CHƯƠNG 1 ..... **6**
TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU TRƯỢT ĐẤT NÔNG **6**
1.1. Trượt đất đá và phân loại **6**
1.1.1. Khái niệm và các yếu tố gây trượt đất đá 6
1.1.2. Phân loại trượt đất đá 8
1.2. Khái quát nghiên cứu trượt đất nông **12**
1.2.1. Nghiên cứu trượt đất nông trên thế giới 12
1.2.2. Nghiên cứu trượt đất nông ở Việt Nam 22
1.3. Một số vấn đề tồn tại trong nghiên cứu trượt đất nông trên đường giao thông vùng núi Việt Nam **24**
1.4. Tóm tắt chương 1 ..... **26**
CHƯƠNG 2 ..... **27**
CƠ SỞ LÝ THUYẾT NGHIÊN CỨU **27**
2.1. Phân vùng nguy cơ trượt đất đá bằng trí tuệ nhân tạo (AI) **27**
2.1.1. Cơ sở lý thuyết một số mô hình trí tuệ nhân tạo sử dụng trong nghiên cứu 27
2.1.2. Đánh giá hiệu suất của mô hình trí tuệ nhân tạo 35
2.2. Mô phỏng cường độ dòng nước tạm thời khi có vật liệu rời từ trượt đất nông **38**
2.2.1. Bản chất của dòng nước khi có vật liệu rời 38
2.2.2. Các mô hình mô phỏng cường độ dòng nước khi có vật liệu rời 38
2.2.3. Mô phỏng cường độ dòng nước khi có vật liệu rời bằng phần mềm RAMMS 40

2.3. Phân tích ổn định mái dốc bằng mô hình số 41
2.3.1. Cơ sở lý thuyết phân tích thấm bằng mô đun SEEP/W 42
2.3.2. Đường cong đặc trưng đất - nước (SWCC) 43
2.3.3. Lý thuyết cân bằng giới hạn và phương pháp phân tích ổn định mái dốc Bishop 45
2.4. Cơ sở lý luận phân tích ảnh hưởng trượt đất nông tới ổn định nền đường 46
2.4.1. Ảnh hưởng trượt đất nông tới chất lượng mặt đường 46
2.4.2. Ảnh hưởng trượt đất nông tới hệ thống thoát nước 48
2.5. Tóm tắt chương 2 49
CHƯƠNG 3..... 50
NGHIÊN CỨU TRƯỢT ĐẤT ĐÁ TRÊN CÁC TUYẾN ĐƯỜNG GIAO THÔNG KHU VỰC MIỀN NÚI TÂY BẮC VÀ ĐẶC ĐIỂM TRƯỢT ĐẤT NÔNG TUYẾN NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH 50
3.1. Trượt đất đá trên các tuyến đường giao thông khu vực MNTB 50
3.1.1. Đặc điểm tự nhiên khu vực MNTB 50
3.1.2. Điều tra hiện trạng trượt đất đá trên một số tuyến đường khu vực MNTB 51
3.2. Nghiên cứu phân vùng nguy cơ trượt đất đá dọc tuyến ĐT128 tỉnh Lai Châu bằng phương pháp trí tuệ nhân tạo 56
3.2.1. Điều kiện tự nhiên khu vực nghiên cứu 56
3.2.2. Cơ sở dữ liệu sử dụng phân vùng nguy cơ trượt đất đá dọc tuyến nghiên cứu điển hình 64
3.2.3. Phương pháp phân vùng nguy cơ trượt đất đá khu vực nghiên cứu 71
3.2.4. Kết quả phân vùng nguy cơ trượt đất đá khu vực nghiên cứu 73
3.3. Đặc điểm trượt đất nông đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ khu vực dọc tuyến ĐT128 82
3.3.1. Hiện trạng trượt đất nông đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ 82
3.3.2. Mối liên hệ lượng mưa với trượt đất nông 91
3.3.3. Đặc trưng trượt đất nông đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ 93
3.4. Tóm tắt chương 3 99
CHƯƠNG 4..... 101
TRƯỢT ĐẤT NÔNG VỚI ỔN ĐỊNH NỀN ĐƯỜNG ĐOẠN TUYẾN NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH 101
4.1. Hiện trạng tuyến ĐT128 đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ 101
4.1.1. Kết cấu mặt đường 101
4.1.2. Hệ thống thoát nước 102
4.1.3. Các giải pháp xử lý đã thực hiện 102
4.2. Phân tích trượt đất nông bằng mô phỏng số 103
4.2.1. Các bước thực hiện mô phỏng khi kết hợp SEEP/W và SLOPE/W 103
4.2.2. Số liệu cần thiết để tính toán 104

4.2.3. Kết quả tính toán 107
4.3. Ảnh hưởng trượt đất nông tới chất lượng mặt đường và hệ thống thoát nước 110
4.3.1. Ảnh hưởng trượt đất nông tới chất lượng mặt đường 110
4.3.2. Ảnh hưởng trượt đất nông tới hệ thống thoát nước 111
4.4. Mô phỏng số dòng chảy mặt trên khe cạn khi có vật liệu rời từ trượt đất nông... 113
4.4.1. Đặc điểm khe cạn trên tuyến nghiên cứu điển hình 113
4.4.2. Mưa lớn và trượt đất nông dọc lưu vực khe cạn nghiên cứu 115
4.4.3. Lịch sử mất ổn định nền đường tại km10+300 trên dòng chảy khe cạn..... 120
4.4.4. Phân tích ổn định nền đường trên dòng chảy khe cạn khi có vật liệu rời từ trượt đất nông bằng mô phỏng số 121
4.4.5. Trượt đất nông và dòng chảy tạm trên khe cạn khi mưa lớn với ổn định công trình cầu km10+300 129
4.5. Phân tích thiệt hại công trình điển hình liên quan đến dòng chảy tạm thời chứa vật liệu rời từ trượt đất nông phạm vi nghiên cứu 131
4.5.1. Thiệt hại đối với hạ tầng giao thông 131
4.5.2. Thiệt hại đối với người và các phương tiện tham gia giao thông 133
4.6. Đề xuất giải pháp giảm thiểu tác động trượt đất nông tới ổn định nền đường miền núi có địa hình chia cắt đặc trưng 134
4.6.1. Nhóm giải pháp phòng chống trượt đất nông 134
4.6.2. Nhóm giải pháp ngăn giữ vật liệu rời liên quan TĐN trên lưu vực khe cạn nhằm giảm động năng dòng chảy tạm 139
4.7. Tóm tắt chương 4 141
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ..... 142
1. Kết luận chính..... 142
2. Những đóng góp mới của luận án..... 142
3. Hạn chế của luận án..... 143
4. Kiến nghị..... 144
5. Hướng nghiên cứu tiếp theo 144
DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ..... 146
TÀI LIỆU THAM KHẢO..... 147
PHỤ LỤC 165

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

AHP	Analytical Hierarchy Process (Phương pháp phân tích thứ bậc)
AI	Artificial Intelligence (Trí tuệ nhân tạo)
ANN	Artificial Neural Network (Mạng nơ-ron nhân tạo)
AUC	Area Under Curve (Diện tích dưới đường cong)
BTCT	Bê tông cốt thép
CNN	Convolutional Neural Networks (Mạng nơ-ron tích chập)
DEM	Digital Elevation Model (Mô hình số độ cao)
DL	Deep learning (Mô hình học sâu)
DNN	Deep Neural Networks (Mạng nơ-ron sâu)
ĐT	Đường tỉnh
GIS	Geographic Information System (Hệ thống thông tin địa lý)
GRU	Gated Recurrent Unit (Đơn vị hồi quy có cổng)
GTMN	Giao thông miền núi
ICL	The International Consortium on Landslides (Hiệp hội Quốc tế về trượt đất đá)
IMERG	Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (Sản phẩm mưa tích hợp đa vệ tinh cho GPM)
LSTM	Long Short-Term Memory (Mạng bộ nhớ dài – ngắn)
MKN	Mất khi nung (95^0C)
ML	Machine learning (Mô hình máy học)
MNTB	Miền núi Tây Bắc
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (Chỉ số thực vật khác biệt chuẩn hóa)
NIED	National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (Viện Khoa học Trái Đất và phòng chống thiên tai, Nhật Bản)
QL	Quốc lộ
RAMMS	Rapid Mass Movements Simulation (Phần mềm mô phỏng chuyển động khối nhanh)
RMSE	Root Mean Square Error (Sai số căn bậc hai trung bình)

RNN	Recurrent Neural Networks (Mạng nơ-ron hồi quy)
ROC	Receiver Operating Characteristic (Đường cong ROC, ghi nhận đặc trưng hoạt động của bộ phân loại)
SEEP/W	Module phân tích thấm trong phần mềm GeoStudio
SLOPE/W	Module phân tích ổn định mái dốc trong phần mềm GeoStudio
SPI	Stream Power Index (Chỉ số sức mạnh dòng chảy)
SWCC	Soil-Water Characteristic Curve (Đường cong đặc trưng đất – nước)
TĐN	Trượt đất nông
TWI	Topographic Wetness Index (Chỉ số độ ẩm địa hình)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle (Thiết bị bay không người lái)
USGS	United States Geological Survey (Cục Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ)

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

Kí hiệu	Đơn vị	Giải thích ý nghĩa
c	kPa	Lực dính kết đơn vị của đất
c′	kPa	Lực dính hiệu dụng của đất
D_r	m	Chiều sâu mặt trượt của khối trượt
FS		Hệ số ổn định mái dốc
H	m	Chiều cao khối trượt
h	m	Chiều sâu dòng chảy vật liệu rời (RAMMS)
I_P	%	Chỉ số dẻo của đất
I_L	-	Độ sệt
K	m/s	Hệ số thấm
K_s	m/s	Hệ số thấm bão hòa của đất
L_r	m	Chiều dài khối trượt
m	%	Hàm lượng hạt sét
S_r	-	Độ bão hòa
S_e	-	Độ bão hòa hữu hiệu
u_a	kPa	Áp suất pha khí
u_w	kPa	Áp lực nước lỗ rỗng
V_r	m^3	Thể tích khối trượt
W	%	Độ ẩm của đất
W_L	%	Giới hạn chảy của đất
W_P	%	Giới hạn dẻo của đất
W_r	m	Chiều rộng khối trượt
α	độ	Góc dốc mái dốc
γ	kN/m^3	Trọng lượng đơn vị thể tích của đất
θ_r	-	Độ ẩm thể tích dư
θ_s	-	Độ ẩm thể tích bão hòa
μ	-	Hệ số ma sát đáy
ξ	m/s^2	Hệ số ma sát rối – nhớt
ρ	g/cm^3	Khối lượng riêng hỗn hợp nước – vật liệu rời
φ	độ	Góc ma sát trong
φ′	độ	Góc ma sát trong hiệu dụng của đất
ψ	kPa	Lực hút dính

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Phân loại trượt đất đá theo chiều sâu mặt trượt 10
Bảng 1.2. Phân loại trượt đất đá theo thể tích (m^3) 10
Bảng 1.3. Phân loại trượt đất đá theo phương thức dịch chuyển (Varnes, 1978) [178].... 11
Bảng 1.4. Phân loại trượt đất theo cơ chế dịch chuyển [178] 11
Bảng 1.5. Phân loại theo tốc độ dịch chuyển (Cruden và Varnes, 1996) [66] 12
Bảng 3.1. Tổng hợp hiện trạng trượt đất đá trên các tuyến đường khu vực MNTB 51
Bảng 3.2. Mật độ trượt và tỷ lệ TĐN một số tuyến giao thông tại Lai Châu..... 53
Bảng 3.3. Mật độ trượt và tỷ lệ TĐN một số tuyến giao thông tại Sơn La 53
Bảng 3.4. Mật độ trượt và tỷ lệ TĐN một số tuyến giao thông tại Lào Cai..... 53
Bảng 3.5. Lượng mưa trung bình năm (mm) giai đoạn 2010 – 2024 (Nguồn: Tổng hợp từ số liệu của Đài khí tượng Thủy văn tỉnh Lai Châu và IMERG – GPM)..... 61
Bảng 3.6. Lượng mưa trung bình tháng (mm) giai đoạn 2010 – 2024 (Nguồn: Tổng hợp từ số liệu của Đài khí tượng Thủy văn tỉnh Lai Châu và IMERG – GPM) 62
Bảng 3.7. Tổng hợp dữ liệu sử dụng phân vùng nguy cơ trượt đất đá tuyến ĐT128..... 66
Bảng 3.8. Hiệu suất dự báo của mô hình AI qua các giai đoạn đào tạo và xác thực 75
Bảng 3.9. Tỷ lệ và mật độ TĐN theo hệ tầng địa chất phạm vi nghiên cứu 83
Bảng 3.10. Thống kê điểm TĐN theo quy mô khối trượt và hệ tầng địa chất 85
Bảng 3.11. Thống kê điểm trượt theo kiểu trượt và quy mô khối trượt..... 86
Bảng 3.12. Thống kê điểm TĐN theo hình dạng khối trượt và hệ tầng địa chất. 87
Bảng 3.13. Thống kê điểm TĐN theo chiều cao và hệ tầng địa chất 88
Bảng 3.14. Thống kê điểm TĐN theo độ dốc địa hình và quy mô khối trượt..... 88
Bảng 3.15. Thống kê điểm trượt theo hình thái mặt trượt và hệ tầng địa chất..... 89
Bảng 3.16. Thành phần thạch học tại một số điểm lộ trong hệ tầng Bó Hiềng trên tuyến nghiên cứu điển hình 90
Bảng 3.17. Tổng hợp sự kiện TĐN giai đoạn 2019 - 2024 91
Bảng 4.1. Tổng hợp các chỉ tiêu cơ lý của đất dùng trong tính toán..... 105
Bảng 4.2. Tổng hợp kết quả tính toán 107
Bảng 4.3. Tổng hợp các trận mưa gây ra trượt km17+250 vài năm gần đây..... 116
Bảng 4.4. Thông số μ và ξ phù hợp nhất sử dụng tính toán trong mô hình RAMMS 126
Bảng 4.5. Kết quả phân tích độ nhạy vận tốc và áp lực dòng trượt tại vị trí cầu (Km10+300) theo cặp thông số μ, ξ (kịch bản H=10m) 126
Bảng 4.6. Tổng hợp kết quả tính toán mô phỏng số trên RAMMS 127
Bảng 4.7. Tổng hợp ngưỡng áp lực gây hư hỏng đường giao thông..... 128
Bảng 4.8. Tổng hợp thiệt hại tính toán cơ bản 133

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 0.1. Sơ đồ khung phương pháp nghiên cứu của luận án 4
Hình 1.1. Mô hình quá trình phát sinh phá hoại mái dốc do mưa trong điều kiện đất không bão hòa. 18
Hình 2.1. Cấu trúc mạng của thuật toán CNN 28
Hình 2.2. Cấu trúc mạng thuật toán DNN 30
Hình 2.3. Cấu trúc mạng của thuật toán RNN 32
Hình 2.4. Cấu trúc mạng của thuật toán LSTM 33
Hình 2.5. Lực tác dụng lên một thỏi đất 46
Hình 3.1. Mật độ trượt một số tuyến khu vực MNTB 54
Hình 3.2. Tỷ lệ các loại hình trượt đất một số tuyến khu vực MNTB 54
Hình 3.3. Biểu đồ lượng mưa trung bình năm giai đoạn 2010-2024 62
Hình 3.4. Biểu đồ lượng mưa trung bình tháng giai đoạn 2010-2024 63
Hình 3.5. Vị trí khu vực nghiên cứu điển hình và các điểm trượt 65
Hình 3.6. Sơ đồ nguyên lý lập bản đồ nguy cơ trượt đất đá phạm vi nghiên cứu 72
Hình 3.7. Vị trí các điểm trượt và không trượt đất đá 73
Hình 3.8. Phân tích AUC của các mô hình sử dụng nghiên cứu 76
Hình 3.9. Biểu đồ giá trị SHAP trung bình 77
Hình 3.10. Biểu đồ tổng hợp SHAP 78
Hình 3.11. Phân vùng nguy cơ trượt đất đá dọc tuyến ĐT128 80
Hình 3.12. Phân tích phân bố các lớp nhạy cảm và mật độ trượt đất đá 81
Hình 3.13. Tỷ lệ các loại hình trượt đất đá trên tuyến đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ 82
Hình 3.14. Vị trí hiện trạng các điểm TĐN trên nền bản đồ Google Earth 83
Hình 3.15. Vị trí các điểm TĐN trên bản đồ địa chất 1:50.000 83
Hình 3.16. Tỷ lệ TĐN theo hệ tầng địa chất phạm vi nghiên cứu 84
Hình 3.17. Mật độ TĐN theo hệ tầng địa chất phạm vi nghiên cứu 84
Hình 3.18. Tỷ lệ các kiểu trượt 86
Hình 3.19. Tỷ lệ các hình dạng khối TĐN 87
Hình 3.20. Tỷ lệ các hình thái mặt trượt phạm vi nghiên cứu điển hình 89
Hình 3.21. Lượng mưa ngày trong các sự kiện trượt đất đá giai đoạn 2019-2024 (Nguồn: Tổng hợp từ số liệu của Đài khí tượng Thủy văn tỉnh Lai Châu) 92

Hình 3.22. Thành phần khoáng vật đặc trưng đất phạm vi nghiên cứu 94
Hình 3.23. Thành phần hóa học đặc trưng đất phạm vi nghiên cứu 96
Hình 3.24. Đường cong thành phần hạt tổng hợp từ 32 mẫu đất tầng phủ dọc tuyến ĐT128 (Phụ lục 5) 97
Hình 3.25. Tương quan giữa hàm lượng hạt sét m và chỉ số dẻo Ip 98
Hình 3.26. Tương quan giữa hàm lượng hạt sét m và giới hạn chảy W_L 99
Hình 4.1. Mặt cắt ngang điển hình ĐT128 (Nguồn Sở GTVT cũ, tỉnh Lai Châu) 101
Hình 4.2. Hệ thống thoát nước trên ĐT128 (chụp 3/2024) 102
Hình 4.3. Trình tự các bước mô phỏng khi kết hợp SEEP/W và SLOPE/W 103
Hình 4.4. Mặt cắt ngang điển hình dùng trong phân tích 105
Hình 4.5. Đường cong SWCC (a) và Hàm thấm (b) của lớp 1 mặt cắt ĐT128-22 105
Hình 4.6. Đường cong SWCC (a) và Hàm thấm (b) của lớp 1 mặt cắt ĐT128-37 106
Hình 4.7. Đường cong SWCC (a) và hàm thấm (b) của lớp 1 mặt cắt ĐT128-60 106
Hình 4.8. Số liệu mưa theo dữ liệu vệ tinh GPM thời điểm trượt đất 107
Hình 4.9. Hệ số ổn định ở điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa, mặt cắt ĐT128-37 108
Hình 4.10. Hệ số ổn định ở điều kiện sau chuỗi mưa, mặt cắt ĐT128-37 108
Hình 4.11. Ảnh hưởng TĐN tới chất lượng mặt đường (chụp 3/2024) 111
Hình 4.12. Ảnh hưởng TĐN tới hệ thống thoát nước (chụp 3/2024) 112
Hình 4.13. Địa hình phần tuyến nghiên cứu điển hình (ảnh UAV 1/2024) 114
Hình 4.14. Địa hình phần khe cạn và vị trí một số điểm TĐN tạo vật liệu rời phạm vi nghiên cứu (ảnh UAV 11/2024) 114
Hình 4.15. Cắt dọc lòng khe cạn cắt ngang tuyến ĐT128 tại 4 vị trí 115
Hình 4.16. Lượng mưa cộng dồn liên quan sự kiện trượt đất ngày 28/8/2019 117
Hình 4.17. Lượng mưa cộng dồn liên quan sự kiện trượt đất ngày 17/8/2020 118
Hình 4.18. Lượng mưa cộng dồn liên quan sự kiện trượt đất ngày 05/05/2021 118
Hình 4.19. Lượng mưa cộng dồn liên quan sự kiện trượt đất ngày 08/08/2023 119
Hình 4.20. Hiện trạng vị trí cống km10+300 (nguồn Google Earth, 12/2017) 121
Hình 4.21. Trình tự các bước mô phỏng trong mô hình RAMMS 122
Hình 4.22. Hiện trạng vùng phát sinh trượt giai đoạn 2018 - 2023 124
Hình 4.23. Hiện trạng các vị trí khe cạn cắt qua ĐT128 (UAV chụp 1/2024) 129
Hình 4.24. Dấu hiệu mất ổn định khối đất đá ta luy âm sau mố M1 (chụp 1/2024) 130
Hình 4.25. Phá hủy lòng khe dưới cầu do dòng chảy chứa vật liệu rời từ TĐN 130
Hình 4.26. Phá hủy lòng khe và vật liệu lắng đọng dưới cầu (chụp 1/2024) 131

Hình 4.27. Xói và dịch chuyển khối đất đá làm lộ bệ móng tường chắn trước mố M1 và nứt ngang cọc nhồi trụ T1 (chụp 11/2024) 131
Hình 4.28. Giải pháp kết hợp đinh đất với khung BTCT và trồng cỏ cao tốc Bắc Giang – Lạng Sơn km45+100 - km108+500 137
Hình 4.29. Giải pháp đinh đất kết hợp lưới thép cường độ cao và lưới chống xói mòn 3D polime tổng hợp độ bền cao (nguồn Internet) 139
Hình 4.30. Ngăn giữ vật liệu bằng tường rọ đá có cửa thoát nước khe cạn ĐT128..... 140
Hình 4.31. Ngăn giữ vật liệu bằng lưới thép cường độ cao 140

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Dưới tác động "kích hoạt" của mưa lớn hay mưa kéo dài, lớp đất phủ phong hóa bão hòa, làm tăng áp lực nước lỗ rỗng và giảm ứng suất có hiệu đồng thời với gia tăng trọng lượng khối đất đá trên sườn dốc, giảm ma sát các hạt hay sức chống cắt và có thể mất cân bằng khối đất trên sườn, hình thành và phát triển sụt trượt đất đá trên các mái dốc. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, hiện tượng mưa lớn và mưa cực đoan đang có xu hướng gia tăng cả về cường độ và tần suất, làm cho sụt trượt đất đá trở thành một trong những loại hình tai biến địa chất nguy hiểm và phổ biến tại các khu vực miền núi những năm gần đây ở Việt Nam. Trong đó, sụt trượt đất đá xuất hiện rất phổ biến dọc các tuyến đường giao thông hiện hữu miền núi, làm gián đoạn giao thông, tăng chi phí duy tu, bảo trì, đã và nhiều nguy cơ gây mất an toàn cho người cũng như phương tiện tham gia giao thông [17].

Khu vực MNTB nước ta có địa hình chia cắt mạnh, độ dốc lớn, điều kiện cấu trúc địa chất đa dạng và phức tạp, lớp phủ phong hóa biến đổi mạnh và với mạng lưới khe cạn hay suối phát triển dày đặc. Phần lớn các tuyến GTMN được xây dựng bám sườn núi tự nhiên, phổ biến nền đào hoặc nền đào – đắp hỗn hợp, với chiều cao taluy lớn và bề rộng nền mặt đường hẹp, đặc biệt còn có mặt rất nhiều khe cạn cắt ngang đường tạo dòng chảy tạm thời trực tiếp hoặc gián tiếp phá hủy nền mặt đường gây chia cắt giao thông khi mưa lớn.

Thực tế điều tra và nghiên cứu trên các tuyến đường GTMN đang khai thác ở nước ta cho thấy, sụt trượt đất đá sau khi xảy ra để lại mặt trượt trên ta luy nền đào rất đa dạng, nhưng hầu hết trong tầng phủ phong hóa với mặt trượt thường sâu khoảng (3-5) m – trượt đất nông. TĐN không chỉ xảy ra với tần suất cao, quy mô đa dạng, dễ tái diễn tại vị trí ta luy dương nền đào sát lề đường, mà còn thường "tạo" nguồn vật liệu hạt rời kích thước khác nhau cuốn trôi theo dòng chảy dọc các khe cạn, trực tiếp lấp đầy mặt đường và gây hư hỏng hoặc phá hủy nền đường. Thực trạng này thường xuyên diễn ra vào mỗi mùa mưa tại hàng loạt các QL hay ĐT như QL4D, QL4H, QL4E, QL6, QL15, QL34, QL279, QL32, QL37, QL4, ĐT152, ĐT158, ĐT128, ….

Có thể nói, độ bền khối đất đá hay sụt trượt mái dốc là một trong những hướng nghiên cứu lớn của lĩnh vực địa kỹ thuật xây dựng hay xây dựng hạ tầng giao thông. Riêng ở nước ta, từ những năm 70-80 của thế kỷ trước đến nay, có hàng loạt các nghiên cứu về sụt trượt đất đá nói chung, trong đó có cả những nghiên cứu sụt trượt dọc các tuyến giao thông như

Trần Tân Văn và nnk (2006) [28], Nguyễn Đức Lý và Nguyễn Thanh (2010) [16], Nguyễn Đức Mạnh và Nguyễn Hải Hà (2021) [18], Đỗ Minh Đức (2020) [5],.... Tuy nhiên, các nghiên cứu chuyên sâu về TĐN và ảnh hưởng trực tiếp cũng như gián tiếp tới ổn định nền đường GTMN còn chưa được khai thác nhiều và thiếu tính hệ thống.

Xuất phát từ những vấn đề thực tiễn nêu trên, đề tài *"Nghiên cứu đặc điểm trượt đất nông và ảnh hưởng tới ổn định nền đường khu vực miền núi Tây Bắc"* là cần thiết, có ý nghĩa khoa học và giá trị thực tiễn cao.

2. Mục đích nghiên cứu

Mục đích chính của luận án là làm rõ đặc điểm, cơ chế TĐN và đánh giá ảnh hưởng trực tiếp cũng như gián tiếp của loại hình tai biến này tới ổn định nền đường giao thông khu vực MNTB. Trên cơ sở đó đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm giảm thiểu nguy cơ hư hỏng hay phá hủy nền đường trong điều kiện mưa lớn.

Để đạt được mục đích chung trên, luận án tập trung thực hiện các mục tiêu cụ thể sau:

- Phân vùng nguy cơ trượt đất đá trên tuyến GTMN điển hình bằng phương pháp trí tuệ nhân tạo, làm cơ sở xác định đoạn tuyến nghiên cứu chi tiết về TĐN.

- Phân tích đặc điểm về hình thái và quy mô TĐN đoạn tuyến nghiên cứu điển hình.

- Phân tích mức độ tác động của TĐN với sự thay đổi động năng dòng chảy mặt trên lòng khe cạn khi mưa tới ổn định nền đường và các công trình trên tuyến giao thông nghiên cứu điển hình.

- Đề xuất các giải pháp kỹ thuật nhằm giảm thiểu thiệt hại do TĐN trực tiếp hoặc gián tiếp gây ra với nền đường giao thông MNTB.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu:

TĐN theo hệ phân loại phổ biến hiện nay trên thế giới phần taluy nền đường đào các tuyến đường khu vực MNTB.

3.2. Phạm vi nghiên cứu:

- Phạm vi không gian: Khu vực MNTB Việt Nam (theo Atlat Địa lý 2024 Việt Nam gồm Hòa Bình cũ, Sơn La, Điện Biên, Lai Châu, Lào Cai và Yên Bái cũ), tập trung vào các tuyến QL và ĐT hiện hữu.

- Phạm vi nghiên cứu điển hình: Tuyến ĐT128, tỉnh Lai Châu, trong đó nghiên cứu chi tiết đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ có chiều dài 20 km.

4. Nội dung nghiên cứu

Để đạt được các mục tiêu trên, nội dung nghiên cứu chính của luận án gồm:

- Khảo sát, phân tích đặc trưng trượt đất đá trên một số tuyến đường giao thông ở MNTB.

- Thiết lập bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá dọc tuyến ĐT128 lựa chọn nghiên cứu điển hình.

- Phân tích đặc điểm, cơ chế TĐN đoạn tuyến nghiên cứu chi tiết.

- Phân tích ảnh hưởng trực tiếp và gián tiếp TĐN tới ổn định nền đường đoạn tuyến nghiên cứu điển hình và đề xuất các giải pháp kỹ thuật giảm thiểu.

Trên cơ sở mục đích, đối tượng và nội dung nghiên cứu, khung phương pháp nghiên cứu của luận án được xây dựng như Hình 0.1.

5. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp tổng hợp, thống kê: Thu thập, xử lý và phân tích tài liệu về địa chất, trượt đất và các yếu tố liên quan từ các nguồn khác nhau.

- Phương pháp điều tra, khảo sát, địa chất: Tiến hành khảo sát thực địa dọc các tuyến giao thông tại một số khu vực nhằm nhận diện, mô tả, thu thập các thông tin về hiện trạng đất đá và sụt trượt đất đá.

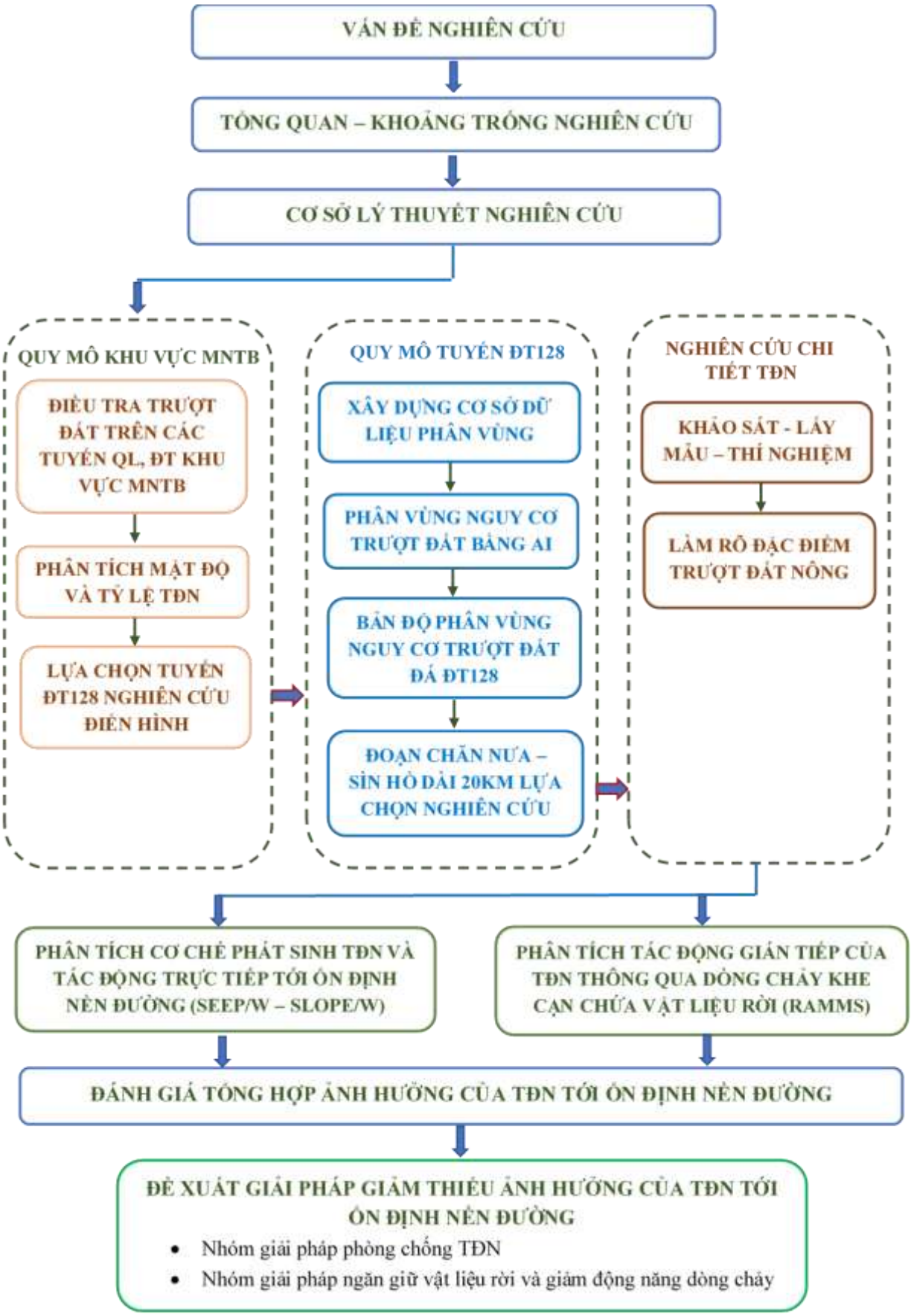
- Phương pháp GIS và viễn thám: Xử lý ảnh viễn thám, lập bản đồ thành phần và bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá bằng công cụ GIS.

- Phương pháp trí tuệ nhân tạo: Xây dựng các mô hình học sâu để dự báo nguy cơ trượt, đồng thời sử dụng các chỉ số thống kê đánh giá độ chính xác mô hình.

- Phương pháp thực nghiệm: Thí nghiệm một số chỉ tiêu cơ lý, thành phần hóa học, thành phần khoáng vật một số mẫu đất thu thập từ hiện trường phục vụ phân tích đặc điểm, cơ chế TĐN.

- Phương pháp mô phỏng: Sử dụng phần mềm Geostudio với hai mô-đun SEEP/W và SLOPE/W tính toán ổn định mái dốc. Sử dụng phần mềm RAMMS để mô phỏng dòng chảy khi có vật liệu rời từ TĐN trên lòng khe cạn tới ổn định nền đường trường hợp mưa lớn trong điều kiện địa hình phức tạp tuyến nghiên cứu điển hình.

- Phương pháp chuyên gia: Tiếp thu các ý kiến góp ý thông qua Hội thảo mở rộng dự thảo luận án, báo cáo tiểu luận tổng quan và các Chuyên đề nghiên cứu.



Hình 0.1. Sơ đồ khung phương pháp nghiên cứu của luận án

Các phương pháp nghiên cứu nêu trên được sử dụng theo hai cấp độ không gian và mục tiêu khác nhau. Ở quy mô tuyến, phương pháp điều tra, thống kê kết hợp GIS, viễn thám và trí tuệ nhân tạo được sử dụng để đánh giá sự phân bố không gian của nguy cơ trượt đất đá. Ở quy mô nghiên cứu chi tiết, các phương pháp khảo sát địa chất, đo đạc hiện trường, lấy mẫu, thí nghiệm và mô phỏng số được sử dụng để xác định đặc điểm, phân tích cơ chế TĐN và đánh giá ảnh hưởng của TĐN tới ổn định nền đường.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

a) Ý nghĩa khoa học

- Luận án đã bổ sung cơ sở dữ liệu tổng quát về TĐN và cách tiếp cận phân vùng nguy cơ trượt đất bằng trí tuệ nhân tạo trên hệ thống đường giao thông hiện hữu MNTB.

- Luận án làm rõ đặc điểm, cơ chế TĐN nền đường đào ở MNTB, bổ sung cơ sở khoa học cho việc đánh giá mối quan hệ giữa TĐN, mưa lớn và ổn định nền đường giao thông tại các khu vực có địa hình khe cạn cắt ngang đường.

b) Giá trị thực tiễn

- Cung cấp tài liệu có căn cứ khoa học hỗ trợ công tác quản lý, bảo trì và phục vụ nâng cấp cải tạo các tuyến đường MNTB có điều kiện địa hình và địa chất tương tự.

- Các giải pháp kỹ thuật được đề xuất có thể tham khảo và mở rộng áp dụng thực tế cho các tuyến đường có yếu tố tương tự trong mạng lưới giao thông hiện hữu MNTB, góp phần giảm thiểu thiệt hại về người và tài sản.

7. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần Mở đầu, Kết luận và Kiến nghị, nội dung của luận án được trình bày trong bốn chương:

Chương 1: Tổng quan nghiên cứu trượt đất nông

Chương 2: Cơ sở lý thuyết nghiên cứu

Chương 3: Nghiên cứu trượt đất đá trên các tuyến đường giao thông khu vực miền núi Tây Bắc và đặc điểm trượt đất nông tuyến nghiên cứu điển hình

Chương 4: Trượt đất nông với ổn định nền đường đoạn tuyến nghiên cứu điển hình

CHƯƠNG 1
TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU TRƯỢT ĐẤT NÔNG

Chương 1 trình bày khái quát các nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến trượt đất đá nói chung và TĐN trên các tuyến đường GTMN nói riêng. Qua việc phân tích, so sánh và tổng hợp các kết quả nghiên cứu đã công bố, làm rõ những thành tựu đã đạt được, chỉ ra các hạn chế và khoảng trống nghiên cứu còn tồn tại, từ đó định hướng và làm rõ sự cần thiết của các nội dung nghiên cứu được triển khai trong các chương tiếp theo của luận án.

1.1. Trượt đất đá và phân loại

1.1.1. Khái niệm và các yếu tố gây trượt đất đá

1.1.1.1. Khái niệm

Trượt đất đá ở đây bao gồm các kiểu mất ổn định khác nhau của khối đất hay đá trên các mái dốc tự nhiên và nhân tạo. Được các nhà nghiên cứu Varnes (1978) [178], Varnes (1984) [179], Crozier và Glade (1986) [63], Cruden (1991) [65], Cruden và Varnes (1996) [66], Soeters và Van Westen (1996) [162], Crozier và Glade (2005) [64] xác định là sự dịch chuyển khối vật liệu đất, đá hoặc hỗn hợp của chúng từ đỉnh hay sườn dốc xuống chân dốc dưới tác động của trọng lực chính nó, theo một hay nhiều mặt yếu hình dạng khác nhau đã tồn tại trong khối vật liệu. Về bản chất, chúng xảy ra khi có sự mất cân bằng về lực/ mô men giữ với lực/mô men gây trượt, để hướng tới trạng thái cân bằng mới.

1.1.1.2. Yếu tố gây trượt đất đá

Theo Lê Đức An (2008) [1], các yếu tố gây trượt đất đá được phân thành 2 nhóm: nhóm các yếu tố tác động thường xuyên, gồm địa chất, địa hình – địa mạo, khí hậu, thảm thực vật và nhân sinh (dạng tác động lâu dài như sử dụng đất, phá/trồng rừng, xây dựng công trình); và nhóm các yếu tố tác động tức thời, gồm động đất, khí hậu (mưa lớn bất thường hay cực đoan) và nhân sinh (gây nổ lớn, xả lũ…). Nhóm các yếu tố tác động thường xuyên đóng vai trò là cơ sở hay điều kiện nền của mất ổn định mái dốc, trong khi nhóm các yếu tố tác động tức thời có vai trò "kích hoạt" hay thúc đẩy quá trình trượt đất đá xảy ra. Năm nhóm yếu tố nêu trên được phân tích cụ thể như sau.

* Yếu tố địa chất

Đặc điểm vật liệu cấu tạo mái dốc có vai trò quyết định sức kháng cắt của chúng. Khi sức kháng cắt của vật liệu lớn và cấu trúc khối tương đối nguyên vẹn, các tác nhân gây mất ổn định như nước thấm trong đất, tải trọng bổ sung, xói mòn hay mất đối tải chân dốc hoặc

chấn động chưa đủ lớn để kích hoạt trượt đất đá; ngược lại, sự suy giảm các chỉ tiêu cơ học và tính liên tục của khối đất đá làm tăng nguy cơ mất ổn định mái dốc [63].

Độ ổn định của mái dốc tự nhiên thường có mối quan hệ chặt chẽ với đặc điểm thạch học của các thành tạo địa chất. Theo Sidle và Ochiai (2006) [161], một số kiểu thạch học như trầm tích núi lửa, đá phiến, trầm tích hoàng thổ, cát kết, cát kết biến chất, cát – bột – sét kết và đá granit bị phong hóa có mức độ nhạy cảm cao đối với trượt đất đá, đặc biệt trong điều kiện chịu tác động của phong hóa và thấm nước ở điều kiện địa hình bất lợi.

Quá trình phong hóa làm biến đổi các thuộc tính cơ học và khoáng vật học của đất đá, từ đó gây suy giảm cường độ kháng cắt và ảnh hưởng đến ổn định của mái dốc. Mức độ ổn định của khối đất đá còn chịu ảnh hưởng đáng kể từ các hoạt động kiến tạo trong quá khứ, đặc biệt là tân kiến tạo. Các quá trình dập vỡ, đứt gãy, tách giãn và biến dạng cấu trúc làm phá vỡ tính liên tục của khối vật liệu, tạo điều kiện phát triển hệ thống khe nứt, qua đó làm suy giảm khả năng chịu lực và tăng tính nhạy cảm trượt đất đá [161].

* Yếu tố địa hình - địa mạo

Độ dốc sườn có liên quan đến các sự kiện trượt đất đá, chúng được xem là một trong những yếu tố điều kiện gây trượt chính. Khi góc dốc càng lớn thì mức độ mất ổn định sườn càng cao [161].

Độ phân cắt sâu của địa hình là biên độ dao động về độ cao của bề mặt đất, nghĩa là độ chênh cao tương đối giữa đỉnh các địa hình dương với đáy của các địa hình âm gần nhất. Khi độ phân cắt sâu càng lớn thì thế năng địa hình càng cao và ngược lại, làm tăng nguy cơ dịch chuyển và sụt trượt đất đá [161].

Hệ thống sông suối, hay các khe cạn sâu phản ánh mức độ phân cắt địa hình do hoạt động của dòng chảy thường xuyên hay tạm thời. Chúng cũng phản ánh phần nào đặc điểm kiến tạo của khu vực, khi nhiều hệ sông suối được hình thành từ các hệ thống đứt gãy vốn có. Mật độ sông suối thể hiện mức độ phân cắt ngang của địa hình, là thông số xác định gián tiếp nguy cơ xảy ra trượt đất đá [161].

* Yếu tố khí hậu – thủy văn

Cường độ và lượng mưa ảnh hưởng lớn đến trượt đất đá, thường trực tiếp "kích hoạt" trượt. Khí hậu nhiệt đới với nhiệt độ cao, độ ẩm lớn liên quan tới mức độ phong hóa đất đá, làm suy giảm sức chống cắt của đất đá cũng như ảnh hưởng đến bề dày tầng phủ của mái dốc. Dưới tác dụng của các dòng chảy mặt hay dòng thấm gần mặt, bề mặt mái dốc bị

bào mòn, xói và sụt trượt. Nước thấm sâu vào khối đất đá làm gia tăng áp lực nước lỗ rỗng, khi đó ứng suất có hiệu giảm, ma sát các hạt đất giảm, tức sức chống cắt giảm, trong khi trọng lượng khối đất lại tăng, làm tăng khả năng mất cân bằng khối và phát sinh trượt đất đá. Nhiều nghiên cứu của các tác giả xem một trong bốn thuộc tính liên quan đến lượng mưa là những yếu tố gây nên trượt: tổng lượng mưa; cường độ mưa trong một thời gian ngắn; lượng mưa rơi trong đợt mưa bão; và thời gian mưa [161]. Trong số các yếu tố tác động tức thời, mưa được xem là tác nhân kích hoạt phổ biến và có vai trò quyết định nhất đối với TĐN.

* Thảm thực vật

Thảm thực vật đủ dày giúp rễ cây hấp thụ bớt nước lỗ rỗng (giảm u) và gia tăng lực dính kết đơn vị của khối đất (tăng c), qua đó làm tăng ổn định mái dốc. Thực vật được xem như một nhân tố chính ảnh hưởng đến hiện tượng trượt đất, thể hiên qua hai cơ chế [161]: độ che phủ thúc đẩy sự bốc hơi nước, giảm độ ẩm trong khối đất, giảm lượng nước thấm xuống đất và giảm tốc độ dòng chảy mặt, từ đó hạn chế xói mòn bề mặt; đồng thời hệ rễ thực vật hút nước từ đất làm giảm độ ẩm và gia tăng lực dính kết đơn vị của khối đất. Rễ những cây lớn, rễ sâu giúp lớp vỏ phong hóa bám chặt vào lớp nền ổn định hơn hoặc liên kết các bề mặt yếu dọc theo sườn của các khối trượt tiềm năng.

* Yếu tố nhân sinh

Hiện tượng trượt đất đá có thể là kết quả trực tiếp hoặc gián tiếp liên quan đến các hoạt động của con người, bao gồm [161]: hoạt động đào sườn đồi núi làm đường hay xây dựng công trình..., làm tăng độ dốc sườn, tăng khả năng mất cân bằng khối đất đá trên mái dốc; các hoạt động làm tăng tải trọng trên sườn dốc (xây dựng công trình) hoặc gây đọng nước trên đỉnh hay sườn dốc, làm tăng khả năng mất ổn định sườn; chặt phá rừng làm giảm lớp che phủ thực vật; và các hoạt động khai thác mỏ quy mô lớn, xây dựng công trình làm thay đổi chế độ thủy văn khu vực, cũng trực tiếp hoặc gián tiếp gây trượt đất đá.

1.1.2. Phân loại trượt đất đá

Hiện tượng trượt đất đá rất phức tạp và đa dạng về cấu trúc, quy mô, điều kiện phát sinh. Hiện nay phân loại trượt đất đá rất đa dạng, được đề xuất theo nhiều tiêu chí khác nhau, phù hợp với mục tiêu và đặc điểm của khu vực cần nghiên cứu, cách tiếp cận phổ biến hơn là lựa chọn linh hoạt dựa trên tính tương đồng về điều kiện địa hình, địa chất. Trong phạm vi luận án này, trượt đất đá được phân loại theo một số cách sau:

1.1.2.1. Theo độ sâu mặt trượt

Khi xem xét độ sâu mặt trượt, các hệ thống phân loại được áp dụng không hoàn toàn thống nhất giữa các quốc gia. Mỗi quốc gia hoặc trường phái nghiên cứu có thể đưa ra ngưỡng phân loại độ sâu mặt trượt khác nhau và không đồng nhất, phản ánh sự đa dạng về điều kiện địa chất, địa mạo đặc trưng, cũng như mục tiêu quản lý và trọng tâm nghiên cứu tại từng khu vực cụ thể.

Tại Hoa Kỳ, theo Burns và Madin (2009) [53], trượt đất được phân loại như sau: TĐN khi độ sâu mặt trượt < 4,5 m và trượt sâu khi độ sâu mặt trượt > 4,5 m.

Ở hướng tiếp cận của Nhật Bản và Đài Loan, theo NIED và cơ quan Khảo sát Địa chất Trung ương Đài Loan, trượt đất sâu được xác định khi độ sâu mặt trượt lớn hơn 10 m, trong khi TĐN có độ sâu nhỏ hơn 10 m [160].

Tại Trung Quốc, hệ thống phân loại do Wang và nnk (2019) [186] đề xuất coi độ sâu mặt trượt là một tham số phân loại chính, với ba cấp độ:

- TĐN khi độ sâu < 5 m, phát triển trong lớp đất tơi xốp hoặc phong hóa mạnh;
- Trượt sâu trung bình khi độ sâu từ (5-15) m, liên quan đến hỗn hợp đất và đá nứt nẻ;
- Trượt sâu khi độ sâu > 15 m, gắn với cấu trúc địa chất quy mô lớn và nền đá gốc.

Bên cạnh các ngưỡng phân loại theo "quy ước quốc gia", nhiều nghiên cứu theo hướng trượt do mưa trong lớp đất phủ thường mô tả TĐN là những khối trượt có độ sâu nhỏ hơn khoảng 2 m, điển hình trong các mái dốc đất phủ chịu tác động mạnh của mưa lớn, có các tác giả Perry (1989) [141]; Kayyal và Wright (1991) [108]; Dai và nnk (2003) [69]; Gabet và Mudd (2006) [80], Dahal và nnk (2009) [67], Phillips và nnk (2021) [143].

Trong nghiên cứu thực nghiệm – mô phỏng tại Rize (Thổ Nhĩ Kỳ), Durmaz và nnk (2023) [75] cho biết trượt do mưa được xem là TĐN theo như đề xuất của Cruden và Varnes (1996) [66] với mặt trượt < 5 m, do đó chiều dày lớp đất trong mô hình được giới hạn đến 5 m nhằm phù hợp với đặc trưng hình thái và chiều sâu phá hoại quan sát được.

Ngoài các hệ thống phân loại nêu trên, một số hệ thống phân loại kinh điển vẫn được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu địa kỹ thuật, điển hình như của Xavarensky (1934) [190] và ICL (2024) [97] (Bảng 1.1).

Từ các hệ thống phân loại nêu trên có thể thấy, sự khác biệt về ngưỡng chiều sâu mặt trượt giữa các quốc gia hay quan điểm là khá rõ rệt. Nghĩa là, tiêu chí phân loại theo độ sâu mặt trượt không mang tính tuyệt đối, phụ thuộc vào kinh nghiệm địa phương, điều kiện

địa chất hay địa hình đặc trưng và mục đích nghiên cứu hoặc quản lý rủi ro. Tuy nhiên, điểm chung vẫn dễ nhận thấy, TĐN thường được hiểu là các hiện tượng trượt xảy ra trong lớp đất phủ bề mặt với chiều sâu chỉ vài mét.

Bảng 1.1. Phân loại trượt đất đá theo chiều sâu mặt trượt

Loại hình trượt	ICL (2024)	Xavarensky (1934)
Trượt bề mặt	< 1,5 m	< 1 m
Trượt nông	(1,5 – 5) m	(1 – 5) m
Trượt sâu	(5 – 20) m	(5 – 20) m
Trượt rất sâu	> 20 m	> 20 m

Căn cứ vào điều kiện địa chất, địa hình khu vực nghiên cứu và mức độ ảnh hưởng thực tế của khối trượt đối với các đối tượng chịu tác động là tuyến giao thông hiện hữu, trong nghiên cứu này phân loại theo độ sâu mặt trượt của Xavarensky (1934) [190] được lựa chọn làm cơ sở lý luận chính cho việc phân tích và đánh giá.

1.1.2.2. Theo quy mô khối trượt

Trên thế giới có nhiều phân loại trượt theo quy mô với sự khác biệt lớn về thể tích. Theo Cruden và Varnes (1996) [66] quy mô khối trượt nhỏ khi thể tích nhỏ hơn vài nghìn m^3, quy mô khối trượt vừa khi thể tích lớn hơn vài nghìn m^3, còn quy mô rất lớn khi thể tích hàng triệu m^3. Các tác giả như Fell (1994) [77], Lomtadze (1977) [123] và ICL (2024) [97] đã phân loại quy mô khối trượt mở rộng và chi tiết hơn Cruden và Varnes (1996) (Bảng 1.2).

Bảng 1.2. Phân loại trượt đất đá theo thể tích (m^3)

Cấp	ICL (2024)	Fell (1994)	Lomtadze (1977)	Mô tả
7	$> 10^8$	5×10^6	>200.000	Đặc biệt lớn
6	$10^7 – 10^8$	$10^6 – 5\times10^6$		Rất lớn
5	$10^6 – 10^7$	25×10^4 - 10^6	1.000-200.000	Lớn
4	$10^5 – 10^6$	$5\times10^4 – 25\times10^4$		Trung bình – Lớn
3	$10^4 – 10^5$	$5\times10^3 – 5\times10^4$	200-1.000	Trung bình
2	10^3 - 10^4	500 – 5.000	10-200	Nhỏ
1	$< 10^2$	< 500	< 10	Rất nhỏ

Jaboyedoff và nnk (2020) [101] đã đưa ra khuyến nghị công thức xác định thể tích khối trượt đất đá như sau:

$$V = \frac{\pi}{6} D_r W_r L_r \quad (1.1)$$

trong đó: D_r - chiều sâu lớn nhất tính từ bề mặt đến độ sâu mặt trượt; W_r - chiều rộng lớn nhất của khối trượt; L_r - chiều dài khối trượt.

1.1.2.3. Theo vật liệu và phương thức dịch chuyển

Hệ thống phân loại trượt đất đá sử dụng rộng rãi hiện nay là hệ thống do Varnes (1978) [178] đề xuất (Bảng 1.3), dựa trên thành phần vật liệu (đất, đá hoặc hỗn hợp) và phương thức dịch chuyển (trượt, chảy, lật, sụp đổ...). Hệ thống này giúp làm rõ mối quan hệ giữa đặc điểm vật liệu của sườn dốc và cơ chế dịch chuyển của khối trượt. Nhờ đó, việc nhận dạng, phân tích và đánh giá nguy cơ trượt trở nên cụ thể và có cơ sở hơn.

Bảng 1.3. Phân loại trượt đất đá theo phương thức dịch chuyển (Varnes, 1978) [178]

Kiểu dịch chuyển			**Kiểu vật liệu**		
			Đá gốc	Đất xây dựng	
				Hạt thô là chủ yếu	Hạt mịn là chủ yếu
Rơi			Đá rơi	Rơi mảnh vụn	Rơi đất
Đổ (lật)			Đá đổ	Đổ mảnh vụn	Đổ đất
Trượt	Xoay	Vài đơn vị	Trượt xoay đá	Trượt xoay mảnh vụn	Trượt xoay đất
	Tịnh tiến		Trượt khối đá	Trượt khối mảnh vụn	Trượt khối đất
		Nhiều đơn vị	Trượt đá	Trượt mảnh vụn	Trượt đất
Lan truyền ngang			Lan truyền ngang đá	Lan truyền ngang mảnh vụn	Lan truyền ngang đất
Chảy dòng			Dòng chảy đá	Dòng mảnh vụn	Dòng đất
Phức hợp			Kết hợp 2 hoặc nhiều loại chuyển động chính		

1.1.2.4. Theo cơ chế dịch chuyển

Theo cơ chế dịch chuyển, có các phân loại của Ban nghiên cứu Cầu đường Mỹ (1958) và Varnes (1978) [178]. Theo Varnes (1978), các hình thức phá hủy mái dốc diễn ra theo cơ chế dịch chuyển đất đá và đặc điểm thành phần của nó (Bảng 1.4).

Bảng 1.4. Phân loại trượt đất theo cơ chế dịch chuyển [178]

Cơ chế dịch chuyển	**Dạng đất đá**			
	Cứng			**Không cứng**
Đá đổ	Đá đổ cứng		Đá đổ không cứng	
Trượt	Xoay	Phẳng	Phẳng	Quay
Một số ít tảng lăn	Trượt xoay	Cắt khối tầng		Trượt khối tảng
Khối đất đá với nhiều phần tách biệt cùng dịch chuyển		Trượt đá cứng	Trượt phủ	Trượt nén trồi
Chảy	Toàn bộ đất đá không được gắn kết			

1.1.2.5. Theo tốc độ dịch chuyển

Dựa vào tốc độ dịch chuyển, phân loại trượt đất đá do Cruden và Varnes (1996) [66]

phân chia thành 7 cấp độ. Các kiểu trượt từ cực chậm đến cực nhanh (Bảng 1.5).

Bảng 1.5. Phân loại theo tốc độ dịch chuyển (Cruden và Varnes, 1996) [66]

Cấp độ	Mô tả	Tốc độ dịch chuyển
7	Cực nhanh	≥ 5 m/s
6	Rất nhanh	≥ 3 m/phút
5	Nhanh	≥ 1,8 m/h
4	Trung bình	≥ 13 m/tháng
3	Chậm	≥ 1,6 m/năm
2	Rất chậm	≥ 16 mm/năm
1	Cực chậm	< 16 mm/năm

1.1.2.6. Theo hình thái mặt trượt

Phân loại hình thái mặt trượt dựa theo hình dạng bề mặt trượt và đặc điểm địa hình tại vị trí xảy ra trượt đất đá, gồm:

- Mặt trượt phẳng, mặt trượt có dạng đường thẳng hướng xuống chân dốc, xuất hiện chủ yếu trong lớp đất đá không đồng nhất, thường trùng với mặt lớp của đá gốc.

- Mặt trượt cong, khi bề mặt trượt có dạng hình cong, phổ biến trong các trường hợp trượt cung tròn hay gần cung tròn. Thường gặp ở mái dốc có cấu tạo địa chất đất đồng nhất hay tương đối đồng nhất, chủ yếu trong vỏ phong hóa dày.

- Mặt trượt bậc thang, khi mặt trượt có dạng gãy khúc, tạo thành các bậc thang do vật liệu trượt không đồng nhất. Xảy ra trong các địa tầng có lớp đá cứng và mềm xen kẽ.

- Mặt trượt hình nêm, xuất hiện khi hai bề mặt yếu hay 2 khe nứt giao nhau tạo thành góc nghiêng.

- Mặt trượt hỗn hợp, thuộc dạng này bao gồm cả mặt trượt cung tròn hay gần cung tròn với mặt trượt phẳng. Dạng cung tròn thường xuất hiện ở đỉnh của khối trượt và dạng phẳng thường là phần chân của khối trượt.

1.2. Khái quát nghiên cứu trượt đất nông

1.2.1. Nghiên cứu trượt đất nông trên thế giới

TĐN là một trong những loại hình mất ổn định mái dốc phổ biến và phân bố rộng rãi nhất. Hiện tượng này là kết quả quá trình dịch chuyển xuống chân dốc của khối vật liệu đất hay đất lẫn đá, có chiều sâu mặt trượt không lớn (< 5 m), hình thái bề mặt sau khi trượt gần phẳng và hoặc cong lõm. Khối trượt thường là hỗn hợp của vật liệu tàn tích phong hóa, sườn tích, hay lũ tích trên sườn dốc, hoặc trượt vật liệu đất đá trên một nền địa chất cứng

hơn [96]. Hiện tượng trượt đất đá nói chung, TĐN nói riêng được rất nhiều tác giả trên thế giới quan tâm nghiên cứu. Dưới tác động biến đổi khí hậu và diễn biến thời tiết cực đoan như những năm gần đây, hiện tượng TĐN trở thành một trong những dạng tai biến địa chất khó lường, trực tiếp hoặc gián tiếp gây thiệt hại lớn về người và tài sản, đặc biệt tại các hệ thống đường GTMN.

Các nghiên cứu về TĐN trên thế giới hiện nay được triển khai theo nhiều hướng tiếp cận khác nhau, tùy thuộc vào mục tiêu và quy mô nghiên cứu. Ở quy mô khu vực, lưu vực hoặc hành lang tuyến, các nghiên cứu thường tập trung đánh giá sự phân bố không gian và phân vùng mức độ nhạy cảm/nguy cơ trượt đất trên cơ sở các yếu tố điều kiện như địa hình, địa chất, thảm phủ, thủy văn và mưa. Ở quy mô mái dốc hoặc điểm trượt, các nghiên cứu tập trung làm rõ đặc điểm hình thái, vật liệu, điều kiện địa chất – địa kỹ thuật và cơ chế phát sinh TĐN, đặc biệt dưới tác động của mưa và quá trình thấm. Ngoài ra, một số nghiên cứu còn hướng tới dự báo quy mô trượt và phân tích vai trò của các yếu tố ảnh hưởng. Các hướng nghiên cứu này có mục tiêu và phương pháp khác nhau nhưng bổ trợ cho nhau trong nhận diện, phân tích và đánh giá TĐN.

1.2.1.1. Phân vùng nguy cơ trượt đất đá

Trên thế giới, công tác dự báo và lập bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá được tiến hành từ lâu, với các phương pháp và kỹ thuật khác nhau, đã mang lại hiệu quả tích cực. Chẳng hạn dự báo hay nhận diện trượt đất đá thông qua các yếu tố đặc trưng địa chất, địa hình, lượng mưa, áp lực nước lỗ rỗng và ứng suất có hiệu [54, 123]. Hay việc phân vùng nguy cơ và lập bản đồ nguy cơ trượt đất theo phương pháp địa chất, phương pháp chuyên gia, thống kê đơn biến, chồng bản đồ, giải đoán ảnh hàng không, hay phương pháp phân tích thứ bậc trọng số (AHP) …, điển hình có Varnes (1984) [179]; Crozier (1986) [63]; Soeters và Van Westen (1996) [162]; Cruden và Varnes (1996) [66].

Theo Varnes (1984) [179], nguy cơ hay có thể gọi “độ nhạy cảm trượt đất” là khả năng xảy ra sụt trượt đất đá tại một khu vực cụ thể dựa trên các điều kiện địa chất và địa hình tại đó. Khác với "Hiểm họa", "Nguy cơ" ở đây chưa bao gồm yếu tố thời gian (khi nào trượt) hay quy mô trượt (trượt lớn hay nhỏ).

Phân vùng nguy cơ trượt đất là quá trình phân chia bề mặt đất thành các khu vực riêng biệt, tạo ra bản đồ hoặc sơ đồ định lượng hay định tính với các mức độ (cấp độ) khả năng xảy ra trượt đất đá khác nhau từ "nguy cơ rất thấp" đến "nguy cơ rất cao", được đề xuất bởi Soeters và Westen (1996) [162].

Trong phân vùng nguy cơ trượt đất đá, trước khi các phương pháp trí tuệ nhân tạo phát triển, các phương pháp truyền thống đã được sử dụng rộng rãi, bao gồm các tiếp cận định tính, bán định lượng và phương pháp định lượng. Các phương pháp này đóng vai trò nền tảng, góp phần hình thành cơ sở lý thuyết và thực tiễn cho nghiên cứu trượt đất đá, đặc biệt trong bối cảnh dữ liệu và điều kiện nghiên cứu còn hạn chế.

a) Phương pháp định tính:

Phương pháp định tính dựa trên kinh nghiệm và nhận định của chuyên gia, kết hợp với phân tích địa chất – địa mạo – địa hình để phân chia các khu vực có mức độ nguy cơ trượt đất khác nhau [116]. Các yếu tố như độ dốc, thành phần thạch học, cấu trúc địa chất, thảm thực vật và hiện trạng sử dụng đất được đánh giá theo các thang phân loại định tính và tổng hợp thông qua chồng lớp bản đồ trong GIS hoặc thậm chí bản đồ số truyền thống.

Ưu điểm nổi bật của phương pháp này là tính linh hoạt và khả năng áp dụng trong điều kiện thiếu dữ liệu, đặc biệt phù hợp với các khu vực miền núi, vùng xa. Tuy nhiên, hạn chế lớn nhất là tính chủ quan cao, khó kiểm chứng và khó lặp lại kết quả giữa các nghiên cứu khác nhau [145, 152].

b) Phương pháp bán định lượng: Có thể chia thành 2 phương pháp

* Phương pháp chồng lớp có trọng số:

Phương pháp chồng lớp có trọng số là một trong những cách tiếp cận phổ biến nhất trong giai đoạn đầu của nghiên cứu phân vùng trượt đất đá. Các yếu tố điều kiện trượt đất đá được chuẩn hóa theo cùng thang giá trị, sau đó gán trọng số phản ánh mức độ quan trọng tương đối của từng yếu tố và chồng lớp để tính toán chỉ số nguy cơ tổng hợp. Mặc dù dễ thực hiện và trực quan, phương pháp này vẫn phụ thuộc đáng kể vào việc lựa chọn trọng số, dựa trên kinh nghiệm chuyên gia, do đó tiềm ẩn sai lệch chủ quan [48].

* Phương pháp phân tích thứ bậc AHP:

Phương pháp phân tích thứ bậc AHP được phát triển bởi Thomas và Benson (1970) [172] nhằm giảm bớt tính chủ quan thông qua việc so sánh cặp giữa các yếu tố và kiểm tra mức độ nhất quán của ma trận so sánh.

Mặc dù có cơ sở toán học rõ ràng, AHP vẫn không tránh khỏi sự phụ thuộc vào đánh giá chủ quan của người nghiên cứu và khó mô tả các mối quan hệ phi tuyến phức tạp giữa các yếu tố [148].

c) Phương pháp định lượng:

Khác với các phương pháp định tính mang tính chủ quan, các phương pháp định lượng đánh giá nguy cơ trượt đất đá một cách khách quan hơn. Vì vậy, phương pháp định lượng được sử dụng nhiều trong thời gian gần đây. Về cơ bản, phương pháp này có thể chia thành hai nhóm chính: phương pháp tiền định và phương pháp dựa trên thống kê.

- Phương pháp tiền định dựa trên tính toán và phân tích ổn định hoặc mất ổn định mái dốc thông qua các mô hình cơ học đất – đá. Ưu điểm của phương pháp này là phản ánh trực tiếp cơ chế vật lý của hiện tượng trượt đất đá và có độ tin cậy cao. Tuy nhiên, lại đòi hỏi số lượng lớn các tham số chi tiết về địa hình, địa chất và thủy văn, do đó thường phù hợp với các khu vực nghiên cứu có quy mô nhỏ [36, 145, 152].

- Phương pháp dựa trên thống kê khai thác mối quan hệ giữa sự phân bố không gian của các yếu tố điều kiện và các điểm trượt đất đã xảy ra trong quá khứ để dự báo nguy cơ xảy ra trượt đất trong tương lai [95]. Do khả năng xử lý dữ liệu trên phạm vi rộng, nên nhóm phương pháp này phù hợp cho các nghiên cứu phân vùng nguy cơ ở quy mô khu vực hoặc lưu vực dạng tuyến kéo dài [145, 194]. Theo hướng tiếp cận thống kê, theo xu thế phát triển của công nghệ các phương pháp định lượng tiếp tục được chia thành:

* Phương pháp thống kê truyền thống:

Phương pháp thống kê truyền thống được sử dụng phổ biến trong đánh giá nguy cơ trượt đất và thường được chia thành thống kê hai biến và thống kê đa biến.

- Thống kê hai biến xem xét mỗi yếu tố điều kiện trượt đất được phân tích độc lập thông qua mối quan hệ với hiện trạng trượt đất nhằm xác định trọng số cho từng lớp phân loại dựa trên mật độ trượt đất [148, 168]. Phương pháp này dễ triển khai và cho phép đánh giá trực tiếp mức độ đóng góp của từng yếu tố vào nguy cơ trượt đất [106, 148]). Hạn chế cơ bản khi thống kê hai biến là không xét đến sự tương tác giữa các yếu tố và kết quả phân vùng phụ thuộc nhiều vào cách phân lớp [155]. Phương pháp thống kê hai biến thường được sử dụng bao gồm: tỷ lệ tần suất [155], chỉ số thống kê [155, 175], trọng số bằng chứng [155, 175] và chỉ số entropy [144, 194]. Nhờ sự hỗ trợ của công nghệ GIS, các phương pháp này được thực hiện khá đơn giản, tuy nhiên độ chính xác chỉ đạt mức chấp nhận được khi so sánh với các phương pháp thống kê phức tạp hơn [155, 175].

- Khác với thống kê hai biến, thống kê đa biến phân tích đồng thời toàn bộ các yếu tố điều kiện và kích hoạt kết hợp hiện trạng trượt đất nhằm xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ [155]). Các phương pháp tiêu biểu được áp dụng rộng rãi như: hồi quy logistic (LR) [41, 155], mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) [147]), bình phương tối thiểu từng phần và phân tích

phân biệt [155]. Các nghiên cứu cho thấy LR và ANN là hai phương pháp được sử dụng phổ biến nhất trong đánh giá nguy cơ trượt đất [145, 155]. Về mặt toán học, các phương pháp thống kê đa biến có cấu trúc phức tạp hơn nhưng cho phép mô tả tốt hơn mối quan hệ giữa nhiều yếu tố ảnh hưởng và hiện tượng trượt đất đá, từ đó mang lại độ chính xác cao hơn.

* Phương pháp trí tuệ nhân tạo (AI)

Phương pháp AI là lĩnh vực nghiên cứu và phát triển hệ thống máy tính có khả năng mô phỏng các quá trình tư duy và ra quyết định của con người. Những năm gần đây, AI đã trở thành công cụ quan trọng trong phân tích dữ liệu lớn và mô hình hóa các hiện tượng tự nhiên phức tạp, trong đó có bài toán dự báo, phân vùng nguy cơ trượt đất đá.

Trong AI, máy học (ML) là một nhánh chủ yếu được ứng dụng trong các bài toán dự báo. ML tập trung vào xây dựng các mô hình dự đoán hoặc phân loại thông qua việc học các quy luật tiềm ẩn trong dữ liệu, thay vì chỉ mô tả hoặc giải thích mối quan hệ giữa các biến như các phương pháp thống kê truyền thống. Về cơ bản, các thuật toán máy học được chia thành học có giám sát và học không giám sát. Trong học có giám sát, mô hình được huấn luyện dựa trên các cặp dữ liệu (đầu vào, đầu ra) đã biết và chia thành hai dạng chính: phân loại và hồi quy [91]. Đối với bài toán dự đoán nguy cơ trượt đất đá, trong đó biến đầu ra thường được biểu diễn dưới dạng nhị phân (xảy ra trượt hoặc không xảy ra trượt), các thuật toán phân loại thuộc nhóm học có giám sát được áp dụng phổ biến [152].

ML đặc biệt hiệu quả trong phân tích dữ liệu không gian quy mô lớn và trong các trường hợp mà hiểu biết lý thuyết về cơ chế vật lý của hiện tượng còn hạn chế. Ưu điểm nổi bật của các phương pháp này là khả năng xử lý các mối quan hệ phi tuyến và tương tác phức tạp giữa nhiều yếu tố, cũng như khả năng làm việc với nhiều dạng dữ liệu khác nhau [36]. Tuy nhiên, máy học cũng tồn tại một số hạn chế, đó là sự phụ thuộc vào chất lượng và số lượng dữ liệu huấn luyện, yêu cầu cao về tài nguyên tính toán và nguy cơ xảy ra hiện tượng quá khớp (overfitting) [91]. Nhờ sự phát triển của công nghệ viễn thám, GIS và năng lực tính toán, cơ sở dữ liệu phong phú, độ chính xác các mô hình máy học trong dự đoán nguy cơ trượt đất ngày càng được nâng cao và thường vượt trội so với các phương pháp thống kê truyền thống [39, 104]. Do đó, việc ứng dụng ML trong xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đang trở thành xu hướng chủ đạo trong các nghiên cứu hiện nay [119, 145, 152].

Theo nghiên cứu của Liu và nnk (2023) [118], các phương pháp máy học trong dự đoán nguy cơ trượt đất có thể chia thành ba nhóm chính: (1) mô hình đơn; (2) mô hình lai/kết hợp; và (3) mô hình học sâu (Deep Learning – DL).

- Mô hình đơn sử dụng một thuật toán máy học riêng lẻ như LR [110]), SVM [50].

- Mô hình lai/kết hợp tích hợp nhiều mô hình đơn thông qua các kỹ thuật tổ hợp như Bagging trong Random Forest (RF) [70] hoặc Boosting trong XGBoost [70], nhằm nâng cao độ chính xác và độ ổn định của kết quả dự báo. Ngoài ra, một số hướng tiếp cận khác như kết hợp mô hình thống kê với mô hình vật lý [187] hoặc kết hợp mô hình máy học với các thuật toán tối ưu hóa cũng đã được đề xuất [51].

- Học sâu (DL) là nhóm mô hình phát triển từ mạng nơ-ron nhân tạo cho phép xây dựng nhiều tầng biểu diễn dữ liệu, từ đó mô tả các mối quan hệ phi tuyến phức tạp đạt độ chính xác cao trong các bài toán phân loại và hồi quy [71]. Trong nghiên cứu trượt đất, các mô hình học sâu tiêu biểu bao gồm CNN [196] và RNN [184]. Mặc dù các mô hình học sâu thường cho kết quả dự báo tốt hơn so với các mô hình máy học truyền thống [119], nhưng hiệu quả của chúng phụ thuộc nhiều vào quy mô và chất lượng dữ liệu huấn luyện. Do đó, trong các khu vực có dữ liệu hạn chế, các mô hình máy học truyền thống hoặc mô hình lai vẫn được xem là lựa chọn phù hợp và ổn định hơn [119].

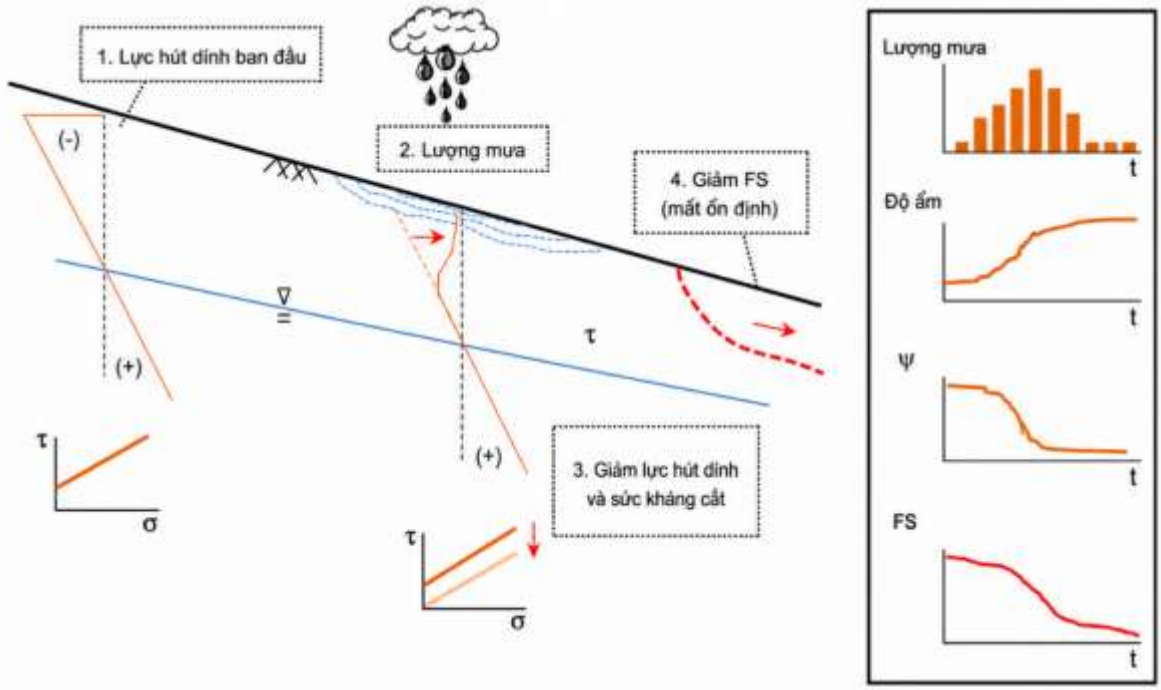
Nhiều nghiên cứu gần đây đã tập trung xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất nói chung, TĐN nói riêng bằng các phương pháp hiện đại, từ mô hình thống kê bán định lượng đến trí tuệ nhân tạo. Chẳng hạn, Nhu và nnk, (2020) [136] đã sử dụng năm mô hình máy học khác nhau Logistic Model Tree (LMT), Logistic Regression (LR), Naïve Bayes Tree (NBT), Artificial Neural Network (ANN) và Support Vector Machine (SVM) xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ TĐN khu vực thành phố Bijar, tỉnh Kurdistan, Iran. Theo đó, cả năm mô hình máy học đều chứng minh được hiệu quả tốt trong đánh giá tính nhạy cảm và phân vùng nguy cơ TĐN. Theo đó, mô hình LMT (AUC = 0,932) cho hiệu suất dự báo cao nhất, tiếp theo là LR (AUC = 0,930), NBT (AUC = 0,864), ANN (AUC = 0,860) và SVM (AUC = 0,834). Nghiên cứu này khuyến nghị áp dụng LMT để lập bản đồ phân vùng nguy cơ TĐN ở các vùng bán khô hạn tương tự khu vực nghiên cứu điển hình. Tương tự, Nontapot (2025) [139] đã thực hiện nghiên cứu đối sánh các phương pháp bán định lượng – phân tích thứ bậc theo trọng số yếu tố ảnh hưởng trượt (AHP), thống kê, mô hình lai và mô hình vật lý, qua đó nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kết hợp đa phương pháp để nâng cao độ chính xác của bản đồ phân vùng nguy cơ trượt.

Những năm gần đây, các mô hình học sâu cũng được tích hợp trong phân vùng nguy cơ trượt đất đá. Điển hình có Dahal và nnk (2024) [68] đã phát triển một khung mô hình số các động lực không gian-thời gian sử dụng một mô hình tổ hợp gồm nhiều mạng nơ-ron

được huấn luyện độc lập và sau đó kết hợp kết quả của chúng để tạo ra một dự đoán cuối cùng ổn định và chính xác hơn. Ứng dụng tại Nepal cho thấy, mô hình đạt độ chính xác cao cả về không gian (AUC = 0,93) lẫn mật độ trượt dự báo (Pearson r ≈ 0,93). Đây là bước tiến mới, vượt khỏi cách tiếp cận nghiên cứu truyền thống khi mà chỉ xét không gian, hướng tới phân vùng nguy cơ trượt đất toàn diện có xét đến yếu tố thời gian, mật độ diện tích trượt đất đá theo từng đơn vị bản đồ.

1.2.1.2. Cơ chế TĐN

Theo mô hình của Ahmadi-adli và nnk (2017) (Hình 1.1) [33], TĐN do mưa trong đất không bão hòa xảy ra do quá trình sau: lực hút dính ban đầu trong đất góp phần làm tăng cường độ chống cắt và duy trì ổn định mái dốc; khi mưa thấm vào đất, mặt ướt di chuyển dần xuống sâu làm lực hút dính suy giảm, đồng thời áp lực nước lỗ rỗng gia tăng, trọng lượng đơn vị thể tích của đất tăng lên và ma sát trong giữa các hạt giảm, khiến cường độ chống cắt của khối đất suy giảm; hệ quả là hệ số an toàn của mái dốc giảm dần đến khi FS < 1 thì phát sinh phá hoại. Mặt trượt có thể hình thành tại ranh giới giữa lớp đất bão hòa và đá gốc [144], hoặc tại mặt yếu (mặt gián đoạn) hay bất lợi liên tục trong đất được tạo ra do sự lan truyền của mặt thấm ướt trong các trận mưa lớn [146].



Hình 1.1. Mô hình quá trình phát sinh phá hoại mái dốc do mưa trong điều kiện đất không bão hòa.

Các nghiên cứu trên thế giới nhấn mạnh vai trò của mưa lớn và thấm nước trong khởi phát TĐN. Li và nnk (2022) [115] đã phát triển phương pháp phân tích xác suất khi kết

hợp mô hình thấm Green–Ampt với mô hình ổn định mái dốc vô hạn, đồng thời có xét phân bố ngẫu nhiên của các tham số cơ lý đặc trưng sức chống cắt của đất (c, φ). Nghiên cứu điển hình cho tuyến đường qua miền núi Tứ Xuyên – Tây Tạng (Trung Quốc), mô hình này tính toán được xác suất phá hoại mái dốc trong thời gian mưa và cho kết quả dự báo hiện trường phù hợp thực tế, vượt trội phương pháp phân tích truyền thống.

Để làm sáng tỏ cơ chế phát sinh TĐN, phương pháp mô hình vật lý thí nghiệm được sử dụng rộng rãi và chứng minh được hiệu quả trong việc xác định điều kiện biên khởi phát trượt. Trên nghiên cứu này, mô hình máng nghiêng thường được sử dụng để mô phỏng hiện trường với khả năng kiểm soát tốt các thông số địa kỹ thuật như điều kiện biên, cường độ và thời gian mưa, cũng như khả năng quan trắc trực tiếp các đại lượng cơ học như áp lực nước lỗ rỗng, biến dạng và tốc độ dịch chuyển khối trượt.

Phân tích mối quan hệ giữa sự gia tăng áp lực nước lỗ rỗng và giới hạn ổn định mái dốc được thực hiện theo các giai đoạn của quá trình thấm và bão hòa trong điều kiện giả định mưa lớn. Thiết bị máng trượt cho phép tái hiện các đặc trưng thực tế của mái dốc nông như chiều dày tầng phủ mỏng, tốc độ thấm nhanh, và hiện tượng giảm sức kháng cắt theo thời gian. Một số nghiên cứu có thể kể đến như: Wang và Sassa (2003) [183] với nghiên cứu về ảnh hưởng của áp lực nước lỗ rỗng đến điều kiện trượt khởi phát; Wu và nnk (2015) [188] với phân tích sự biến đổi các đại lượng động lực học trong suốt quá trình trượt đất và Hakro & Harahap (2015) [88] với mô hình mô phỏng ảnh hưởng của lượng mưa đến quá trình tiến triển mất ổn định của mái dốc. Những kết quả thực nghiệm này là cơ sở quan trọng để hiệu chỉnh và tăng độ tin cậy cho các mô hình số trong nghiên cứu TĐN.

1.2.1.3. Dự báo quy mô trượt đất nông

Một hướng nghiên cứu cũng được quan tâm và chú ý nghiên cứu gần đây là dự báo quy mô trượt (thể tích khối trượt) bằng mô hình dữ liệu. Tuganishuri và nnk (2025) [173] đã sử dụng bộ dữ liệu TĐN ở Hàn Quốc để huấn luyện và so sánh hàng loạt thuật toán (Hồi quy tuyến tính thường, Random Forest, SVM, XGBoost, GLM, KNN, …). Kết quả mô hình XGBoost dự báo thể tích trượt chính xác nhất ($R^2 \approx 0,88$), tiếp đến là Random Forest ($R^2 \approx 0,84$) còn các mô hình khác hiệu suất dự báo thấp hơn. Nghiên cứu này cung cấp công cụ định lượng quy mô khối TĐN do mưa một cách hệ thống, hỗ trợ hiểu rõ hơn mối quan hệ giữa lượng mưa, điều kiện địa hình và khối lượng đất trượt.

1.2.1.4. Các yếu tố ảnh hưởng đến trượt đất nông

Độ dốc địa hình từ lâu được khẳng định là yếu tố ảnh hưởng lớn đến TĐN, TĐN xảy ra thường xuyên hơn trên các sườn có độ dốc lớn do tác động của trọng lực khối đất đá.

Nghiên cứu tại Ethiopia của Mersha Meten (2020) [129] cho thấy, khi độ dốc vượt quá ~12^0, xác suất trượt tăng vọt theo hàm tỷ suất (FR), phù hợp với nhận định chung rằng độ dốc cao làm gia tăng đáng kể nguy cơ trượt.

Yếu tố địa chất (loại đất đá, thành phần thạch học) có vai trò đặc thù, các địa tầng phong hóa mạnh, đất bở rời, sức chống cắt nhỏ dễ phát sinh TĐN hơn so với nền đá cứng. Asada Minagawa (2023) [40] khi xây dựng mô hình GLM và Random Forest dự báo trượt do mưa đã xác định địa chất là một trong những biến giải thích chính (chỉ sau lượng mưa) cho hiện tượng TĐN tại khu vực nghiên cứu.

Một yếu tố được quan tâm đặc biệt gần đây là thảm thực vật khi nghiên cứu TĐN của nhiều nhà nghiên cứu. Thảm thực vật được hiểu là lớp phủ thực vật đủ dày, chúng có hai tác dụng quan trọng: tăng cường độ bền của đất nhờ hệ thống rễ gia tăng lực giữ và giảm xói mòn; cản bớt nước mưa trực tiếp và điều hòa dòng chảy bề mặt, giúp giảm tốc độ thấm để giảm gia tăng áp lực nước lỗ rỗng và góp phần tăng bay hơi giảm ẩm tầng phủ. Asada Minagawa (2023) [40] phân tích dữ liệu trượt ở Aso (Nhật Bản) đã định lượng và xác định được xác suất xảy ra TĐN trên đất trống hoặc đồng cỏ cao gần gấp 3 lần so với rừng lá kim/lá rộng, và thậm chí cao gấp gần gấp (9–10) lần so với rừng thứ sinh nhiều tầng tán. Ngược lại, vùng rừng kín hầu như ít bị trượt hơn hẳn. Murgia và nnk (2024) [132] đã mô phỏng kịch bản thay đổi thảm phủ rừng trong 70 năm qua ở Ý và nhận thấy độ phủ thực vật hiện tại giúp tăng ổn định sườn dốc lên gấp 3 – 4 lần so với trạng thái trơ trụi. Nghiên cứu này cũng chỉ ra rằng, xác suất trượt tính toán ở kịch bản không có thảm phủ cao gấp nhiều lần so với khi có rừng che phủ, ngay cả dưới những trận mưa lớn tương ứng chu kỳ (30-50) năm. Các nghiên cứu trên cũng đã nhấn mạnh vai trò phòng chống trượt của rừng - thảm thực vật dày đặc có thể giảm rõ rệt tính dễ bị tổn thương trước TĐN.

Ngoài ra, một số yếu tố khác như độ dài sườn dốc, hình dạng địa hình (độ lồi lõm), mật độ mưa cực đoan cũng được ghi nhận là ảnh hưởng đáng kể. Chẳng hạn, mô hình của Asada Minagawa (2023) [40] chỉ ra góc dốc, địa hình lồi lõm và lượng mưa giờ cao nhất có tương quan dương mạnh với xác suất trượt, trong khi những nơi địa hình thấp trũng (chỉ số TWI cao) hoặc ở cao độ lớn lại ít xảy ra trượt hơn (do đất mỏng, ít giữ nước).

Khi nghiên cứu ảnh hưởng của mưa đến quá trình phát sinh TĐN có nhiều nghiên cứu trên thế giới tiếp cận theo ba hướng chính: thống kê ngưỡng mưa tới hạn, mô hình hóa số, và quan trắc hiện trường. Hướng nghiên cứu xây dựng ngưỡng mưa tới hạn (ngưỡng I–D) từ số liệu thống kê các trận mưa đã gây trượt trong thực tế, tiêu biểu là các công trình

của Caine (1980) [54], Guzzetti và nnk (2007, 2008) [86, 87], Van Westen và nnk (2007) [177], Rossi và nnk (2010) [153], Lu và Godt (2013) [125], Vennari và nnk (2014) [180], ... Gần đây, Millán-Arancibia và Lavado-Casimiro (2023) [130] thiết lập ngưỡng mưa khu vực cho 11 vùng của Peru từ dữ liệu mưa dạng lưới, cho thấy ngưỡng theo cường độ mưa ngày trung bình–thời gian mưa cho kết quả phân biệt tốt nhất; Villaca và nnk (2024) [181] áp dụng mô hình học máy Random Forest để xây dựng ngưỡng mưa gây trượt đất nông ở Bồ Đào Nha có xét đến các yếu tố nền (hướng dốc, góc dốc, hàm lượng sét); Ariyakumara và Uchida (2026) [38] tổng hợp và so sánh 89 ngưỡng I–D và E–D đã công bố trên thế giới, kết luận rằng chất lượng và số lượng dữ liệu quyết định độ tin cậy của ngưỡng nhiều hơn là điều kiện địa chất hay khí hậu đặc thù từng khu vực. Các nghiên cứu theo hướng này thống nhất ở điểm: khả năng xảy ra trượt phụ thuộc vào tổ hợp cường độ và thời gian mưa, và chỉ khi tổ hợp này vượt ngưỡng I–D thì trượt đất mới phát sinh.

Song song đó, một hướng nghiên cứu khác đánh giá ảnh hưởng của mưa thông qua mô hình hóa số, kết hợp bài toán thấm và ổn định mái dốc, như các công trình của Alonso và nnk (1990) [34], Iverson và nnk (1997) [99], Crosta và Frattini (2003) [62], Rahimi và nnk (2011) [151], Lu và nnk (2012) [124], Eichenberger và nnk (2013) [76]. Li và nnk (2024) [113] phát triển mô hình thấm Green–Ampt cải tiến có xét đến hiệu ứng trễ do lực cản không khí và thấm ngang, cho thấy khi xét đồng thời hai hiệu ứng này, thời điểm mất ổn định mái dốc được dự báo sớm hơn và sát với thực nghiệm hơn; Wang và nnk (2024) [185] phân tích cơ chế biến dạng trượt đất Piansongshu tại hồ chứa Tam Hiệp (Trung Quốc), chỉ ra mưa liên tục hình thành đới bão hòa tạm thời ngày càng sâu, làm hệ số ổn định tiếp tục giảm ngay cả sau khi mưa ngừng; Zhong và nnk (2026) [201] đề xuất phương pháp ghép nối FVM–DEM mô phỏng toàn bộ quá trình phá hoại của trượt đất do mưa trong đất tàn tích granit, cho thấy thời gian đến phá hoại giảm từ 5,0 giờ (mưa 10 mm/ngày) xuống 1,6 giờ (mưa 100 mm/ngày). Các kết quả này cho thấy mức độ ảnh hưởng của mưa đến ổn định mái dốc phụ thuộc nhiều vào điều kiện biên, điều kiện ban đầu và đặc trưng thấm–cơ học của đất không bão hòa.

Ngoài ra, ảnh hưởng thực tế của mưa đến còn được nghiên cứu thông qua các thí nghiệm hiện trường quy mô lớn. Schilirò và nnk (2023) [156] sử dụng bộ dữ liệu quan trắc hai năm tại lưu vực Monterosso (Ý), cho thấy độ ẩm ban đầu và hiện tượng trễ trong đặc trưng thấm của đất không bão hòa ảnh hưởng đáng kể đến điều kiện ổn định mái dốc; Hofmann và nnk (2025) [94] triển khai mạng cảm biến chi phí thấp kết hợp quan trắc

suction tại vùng núi cao, ghi nhận dấu hiệu bất ổn định sớm hơn 10 ngày trước khi trượt xảy ra; Liu và nnk (2025) [118] qua thí nghiệm mô hình vật lý trên mái dốc đất hoàng thổ tại Gaolan (Trung Quốc), phát hiện quá trình phá hoại diễn ra qua ba giai đoạn (xói mòn chân dốc, mở rộng khe nứt, xói rãnh) do các chu kỳ bão hòa lặp lại làm suy giảm dần cường độ chống cắt của đất.

Nhìn chung, ba hướng nghiên cứu trên bổ sung cho nhau: ngưỡng thống kê phục vụ cảnh báo sớm ở quy mô khu vực, mô hình số làm rõ cơ chế vật lý và độ nhạy với điều kiện biên/đất nền, còn quan trắc hiện trường cung cấp dữ liệu kiểm chứng trực tiếp. Xu hướng gần đây cho thấy sự tích hợp thêm các công cụ mới - học máy, mô hình ghép nối đa tỷ lệ và hệ thống cảm biến chi phí thấp - nhằm nâng cao độ chính xác trong dự báo và cảnh báo sớm TĐN do mưa.

1.2.2. Nghiên cứu trượt đất nông ở Việt Nam

Tại Việt Nam, trượt đất đá được quan tâm nghiên cứu từ khá sớm, được thực hiện bởi nhiều chuyên gia thuộc nhiều lĩnh vực chuyên môn khác nhau như Địa chất, Địa kỹ thuật, khí tượng thủy văn, xây dựng, nông nghiệp … Những nghiên cứu điển hình này có thể kể tới: Vũ Cao Minh (1996) [19], Vũ Cao Minh (2000) [20], Lê Thị Nghinh (2004) [23], Trần Trọng Huệ (2004) [9], Nguyễn Trọng Yêm (2006) [32], Trần Tân Văn (2006) [28], Lê Thị Thu Hiền và nnk (2010) [8], Phạm Văn Hùng (2010) [11], Lê Quốc Hùng (2014) [10], Mai Thanh Tân (2015) [25], Đỗ Minh Đức (2020) [5], Đỗ Minh Đức (2022) [6], Huỳnh Thanh Bình (2023) [2], Đào Minh Đức (2023) [7], Nguyễn Đức Đảm (2025) [4], ….

Những năm gần đây, một số nhóm nghiên cứu trong nước đã ứng dụng các phương pháp hay cách tiếp cận tiên tiến theo xu hướng quốc tế với những hiệu chỉnh phù hợp điều kiện tự nhiên Việt Nam khi nghiên cứu trượt đất. Bui và nnk (2023) [52] xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ trượt cho tỉnh Sơn La bằng cách phát triển năm mô hình máy học lai tiên tiến (Bagging MLP, Dagging MLP, Decorate MLP, Rotation forest MLP, Random subspace MLP) với bộ phân loại nền là Mạng nơ-ron nhiều lớp (MLP). Nghiên cứu sử dụng 16 lớp yếu tố đầu vào địa môi trường (địa hình, địa chất, mưa, ...) và so sánh độ chính xác dự báo của các mô hình. Kết quả nghiên cứu được xác thực bằng tập dữ liệu độc lập và bước đầu khẳng định việc kết hợp nhiều mô hình máy học có thể tăng cường năng lực dự báo trượt tại các tỉnh miền núi Việt Nam. Trước đó, Bui và nnk (2019) [51] cũng đã áp dụng thành công phương pháp máy học lai ghép giữa phân loại Máy vectơ hỗ trợ bình phương tối thiểu (LSSVC) và Thuật toán Dơi (BA), gọi là BA-LSSVC, để dự báo không

gian trượt đất tại khu vực tỉnh Lạng Sơn. Kết quả nghiên cứu cho thấy tiềm năng của các kỹ thuật tối ưu thông minh trong phân vùng nguy cơ trượt đất ở nước ta.

Nguyễn Đức Đảm (2025) [4], sử dụng nguồn dữ liệu gồm 14 yếu tố ảnh hưởng và các mô hình AI xây dựng bản đồ phần vùng nguy cơ trượt khu vực dự kiến xây dựng tuyến giao thông mới Tuyên Quang – Hà Giang. Kết quả nghiên cứu cho thấy vai trò các yếu tố như lượng mưa trận lớn nhất, lượng mưa trung bình năm, chỉ số thực vật, đặc biệt có xét tới ảnh hưởng tỷ lệ bản đồ địa chất.

Các nghiên cứu trước đây, bằng các phương pháp truyền thống đã xem xét các yếu tố trượt đất đá có tác giả Phạm Văn Hùng (2010) [11], song, gần đây một số nghiên cứu mới đã tập trung làm rõ vai trò của những yếu tố này đối với TĐN bằng phương pháp thống kê đa biến bậc cao – phương pháp trí tuệ nhân tạo. Nguyen và nnk (2024) [133] đã nghiên cứu vai trò đô thị hóa tác động tới rủi ro trượt đất ở khu vực thành phố Đà Lạt cũ, và chỉ ra rằng nơi có tốc độ đô thị hóa nhanh đi cùng nguy cơ trượt đất tăng. Nghiên cứu này đã sử dụng bốn mô hình máy học (XGBoost, LightGBM, KNN, Bagging) để đánh giá sự thay đổi lớp phủ đất tác động tới phân bố trượt.

Để nghiên cứu cơ chế xảy ra TĐN dưới tác động của mưa lớn, Huỳnh Thanh Bình (2023) [2] đã thực hiện thí nghiệm mô hình máng trượt trong điều kiện mưa tập trung với cường độ lớn hơn 100 mm/h kéo dài trong nhiều ngày liên tiếp. Kết quả thí nghiệm cho thấy cơ chế TĐN chịu chi phối chặt chẽ bởi quan hệ giữa lượng mưa, sự hình thành mực nước ngầm và sự biến đổi áp lực nước lỗ rỗng trong mái dốc.

Trước hết, sự hình thành và phát triển của áp lực nước lỗ rỗng dương trong các mái dốc phụ thuộc đáng kể vào cường độ mưa, thời gian mưa, đặc tính thủy lực của đất và độ dốc mái dốc. Đối với mái dốc có độ dốc lớn, nước mưa chủ yếu chảy tràn bề mặt, lượng thấm xuống không sâu, do đó khó hình thành mực nước ngầm đáng kể trong thời gian ngắn. Ngược lại, với mái dốc có độ dốc nhỏ, quá trình thấm diễn ra mạnh hơn và sâu hơn, tạo điều kiện tích tụ nước trong khối đất và hình thành mực nước ngầm bên trong mái dốc. Điều này làm gia tăng nguy cơ mất ổn định khi mưa kéo dài.

Khi mưa mới bắt đầu, nước mưa chủ yếu làm ẩm và bão hòa lớp đất mặt, dẫn đến sự xuất hiện của các điểm TĐN cục bộ. Khi thời gian mưa kéo dài và lượng mưa tích lũy tăng lên, nước thấm sâu vào trong mái dốc, gặp các tầng đất có khả năng giữ nước và hình thành mực nước ngầm dâng cao. Sự gia tăng mực nước ngầm làm tăng áp lực nước lỗ rỗng, giảm sức kháng cắt của đất gây trượt.

Thí nghiệm cũng làm rõ quá trình phát triển TĐN thông qua sự biến đổi của áp lực nước lỗ rỗng, được chia thành năm giai đoạn đặc trưng [2]:

- Giai đoạn 1 (Đất khô): áp lực nước lỗ rỗng mang giá trị âm do đất hút nước trong đầu đo và tạo ra áp lực chân không trong đầu đo.

- Giai đoạn 2 (Bão hòa cục bộ): Đất dưới đầu đo bão hòa, áp lực nước lỗ rỗng tăng rất nhanh từ giá trị âm lên giá trị 0.

- Giai đoạn 3 (Hình thành mực nước ngầm): Mực nước ngầm tiếp tục dâng cao làm áp lực nước lỗ rỗng tăng dần từ 0 đến một giá trị nhất định thì hiện tượng trượt xảy ra.

- Giai đoạn 4 (Gia tăng đột ngột áp lực nước lỗ rỗng): Sau khi trượt, áp lực nước lỗ rỗng tăng nhanh trong khoảng thời gian ngắn. Sự gia tăng này không phải là do mưa gây ra mà là do khi xảy ra trượt, quá trình tái sắp xếp các hạt trong đất, đặc biệt là sự nghiền nhỏ các hạt ở mặt trượt gây ra hiện tượng hóa lỏng cục bộ tại mặt trượt.

- Giai đoạn 5 (Ổn định sau trượt): Khi khối đất dừng chuyển động, áp lực nước lỗ rỗng giảm dần theo quá trình thoát nước và tái phân bố ứng suất trong khối đất.

1.3. Một số vấn đề tồn tại trong nghiên cứu trượt đất nông trên đường giao thông vùng núi Việt Nam

Với 3/4 diện tích lãnh thổ là đồi núi, nên hệ thống giao thông đường bộ qua miền núi nước ta rất phổ biến với dạng nền đường đào, đào kết hợp đắp và đắp cao. Tác động xây dựng đường và các yếu tố tự nhiên bất lợi vốn có, trực tiếp và gián tiếp phát sinh trượt đất mạnh mẽ, đặc biệt khi có nhiều diễn biến cực đoan thời tiết như những năm gần đây. Hệ thống đường GTMN hiện nay hầu hết chưa có hệ thống công trình gia cố phòng chống đồng bộ và hoàn chỉnh, nên khả năng chống chịu sụt trượt thấp và cơ bản vẫn "chấp nhận" "sống chung với trượt". Những năm qua, dù đã được đầu tư lớn qua các chương trình nghiên cứu hay dự án cấp quốc gia, tiêu biểu như "Điều tra, đánh giá và phân vùng cảnh báo nguy cơ trượt lở đất đá các vùng miền núi Việt Nam" nhằm ứng phó giảm thiểu thiệt hại liên quan tai biến trượt đất đá, song vẫn còn một khoảng trống lớn cần tiếp tục nghiên cứu trong thời gian tới. Chẳng hạn, thực tế chỉ riêng mùa mưa năm 2025, theo số liệu từ Cục Đường bộ Việt Nam ghi nhận hàng chục ngàn điểm sụt trượt lớn nhỏ trên hệ thống đường bộ cả nước, nhiều tuyến đường bị chia cắt giao thông, thậm chí làm tê liệt hệ thống giao thông và gây thiệt hại lớn về người và tài sản. Trong ngắn hạn, để giải quyết triệt để giảm thiểu sụt trượt trên hệ thống các tuyến GTMN là thách thức không nhỏ.

Có thể nói, ngoài một số công trình nghiên cứu chung về trượt đất đá liên quan đường giao thông, chẳng hạn một số nghiên cứu khá quy mô và hoàn chỉnh của Đỗ Minh Đức (2022) [6] dọc một số tuyến giao thông ở Quảng Nam, Nguyễn Đức Lý và Nguyễn Thanh (2010) [16] dọc một số tuyến đường miền núi tỉnh Quảng Bình, Chu Văn Ngợi và Nguyễn Thị Thu Hà (2008) [22] tuyến đường 4D, Huỳnh Thanh Bình (2023) [2] tuyến đường Hồ Chí Minh đoạn Đắc KRông – Thạnh Mỹ, Hang và nnk (2020) [89, 90] đoạn QL6 tỉnh Hòa Bình, Luu và nnk (2023) [127], Bui và nnk (2013) [50] tuyến QL32,..., hay một số nghiên cứu đơn lẻ trượt khối lớn và giải pháp xử lý trên đường giao thông của Đào Minh Đức (2023) [7], Nguyễn Đức Mạnh và nnk (2018) [17], Nguyen và nnk (2019) [134] …. thì TĐN - dạng trượt phổ biến, dễ tái diễn và có thể quy mô không lớn nhưng ảnh hưởng trực tiếp hoặc gián tiếp đến ổn định nền đường không hề nhỏ lại ít được khai thác một cách có hệ thống trong bối cảnh tác động kép của địa hình miền núi và mưa lớn cực đoan. Do đó, nghiên cứu chuyên sâu về TĐN gắn với ổn định nền đường là cần thiết nhằm bổ sung cơ sở khoa học cho công tác thiết kế, quản lý, bảo trì và bảo vệ các tuyến đường GTMN để khai thác an toàn hiệu quả.

Một số vấn đề chưa được làm rõ, thiếu tính hệ thống và chưa được quan tâm nghiên cứu nhiều về TĐN trên hệ thống đường giao thông hiện hữu miền núi nước ta gồm:

- Tính đặc thù về đặc điểm TĐN – địa hình – địa chất – ổn định nền đường theo các khu vực cụ thể mỗi vùng (Đông Bắc, Tây Bắc, Bắc Trung Bộ, Trung Bộ, Nam Trung Bộ, hay Tây Nguyên) thuộc phần địa hình đồi núi nước ta.

- Chưa xem xét định lượng TĐN ảnh hưởng trực tiếp hay gián tiếp tới ổn định nền đường hay công trình trên tuyến, đặc biệt các khu vực địa hình phân cắt mạnh bởi các khe cạn có dòng chảy tạm thời khi mưa lớn.

- Các giải pháp phòng tránh, phòng chống hay giảm thiểu tác động trực tiếp hoặc gián tiếp từ nguồn vật liệu TĐN tới ổn định công trình trên tuyến hay nền đường đào, đào – đắp, hay đắp chưa được xem xét tổng thể khi kết hợp các yếu tố địa hình – địa chất – thủy văn – với hoạt động kinh tế kỹ thuật và điều kiện kinh tế đầu tư mỗi vùng miền.

- Thiếu cơ sở dữ liệu để bổ sung và xây dựng cơ sở dữ liệu lớn về TĐN trên hệ thống hàng vạn kilomet đường GTMN nước ta, làm cơ sở xây dựng kế hoạch ứng phó, thích ứng và giảm thiểu thiệt về người cũng như tài sản do TĐN gây ra, đặc biệt trước những biến đổi khí hậu bất thường như hiện nay và thời gian tới.

- Thiếu các nghiên cứu đồng bộ, có tính hệ thống, kết hợp phân vùng nguy cơ trượt

đất đá bằng công cụ hiện đại làm cơ sở sàng lọc không gian với nghiên cứu chuyên sâu đặc điểm, cơ chế TĐN trên hệ thống đường GTMN, đặc biệt tại các tuyến có địa hình, địa chất phức tạp, trải dài, nơi việc lựa chọn đoạn tuyến nghiên cứu chi tiết theo kinh nghiệm chủ quan tiềm ẩn rủi ro bỏ sót khu vực nguy cơ cao.

1.4. Tóm tắt chương 1

Trong nghiên cứu trượt đất đá, ngoài các phân loại theo cơ chế trượt, loại vật liệu trượt và phương thức dịch chuyển, qui mô trượt, hình thái mặt trượt, tốc độ dịch chuyển trượt, thì theo chiều sâu mặt trượt cũng được nhiều tác giả tại nhiều nước trên thế giới quan tâm và đề cập trong các công bố. Theo đó, từ 1934 (Xavarensky), đến gần đây 2024 Hội trượt đất quốc tế (ICL), khi chiều sâu mặt trượt < 5 m (1,0 m hay 1,5 m đến 5,0 m) được xếp loại trượt nông (TĐN).

Chương này cũng đã khái quát có hệ thống các nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến trượt đất đá và TĐN, trong đó có đề cập đến phân vùng nguy cơ trượt đất đá, cơ chế TĐN, các yếu tố ảnh hưởng tới TĐN, đã làm rõ thêm những thành tựu nghiên cứu đạt được cũng như các hướng tiếp cận chủ yếu hiện nay trên thế giới cũng như tại Việt Nam.

Trượt đất nông là loại hình mất ổn định mái dốc được thế giới quan tâm nhiều thông qua các nghiên cứu chuyên sâu và chuyên đề, nhưng đây vẫn là khoảng trống lớn chưa được quan tâm nghiên cứu, đặc biệt trên các tuyến GTMN và khi chúng có tác động trực tiếp hay gián tiếp tới ổn định nền đường hiện hữu.

Trên cơ sở đó, luận án kế thừa và kết hợp hai hướng tiếp cận đã tổng quan ở trên theo một trình tự logic: sử dụng phương pháp phân vùng nguy cơ trượt đất đá bằng trí tuệ nhân tạo như bước sàng lọc không gian ở quy mô tuyến, làm cơ sở khách quan lựa chọn đoạn tuyến nghiên cứu chi tiết; từ đó triển khai hai nhiệm vụ nghiên cứu chính cùa luận án: phân tích đặc điểm, cơ chế TĐN và đánh giả ảnh hưởng của TĐN tới ổn định nền đường giao thông ở các nội dung nghiên cứu trong các chương tiếp theo.

CHƯƠNG 2
CƠ SỞ LÝ THUYẾT NGHIÊN CỨU

Chương 2 trình bày tóm tắt một số lý thuyết cơ bản được sử dụng nghiên cứu trong luận án. Tập trung tổng hợp một số phương pháp phân vùng nguy cơ trượt đất đá, phân tích ổn định trượt bằng mô hình số, lý thuyết mô hình hóa dòng chảy tạm thời có/ không có vật liệu rời phát sinh từ TĐN trên đường vận chuyển làm cơ sở phân tích ảnh hưởng trực tiếp và gián tiếp của TĐN tới ổn định nền đường giao thông trong điều kiện địa hình đặc trưng.

2.1. Phân vùng nguy cơ trượt đất đá bằng trí tuệ nhân tạo (AI)

Như đã trình bày ở mục 1.4, phân vùng nguy cơ trượt đất đá bằng AI được luận án sử dụng như bước sàng lọc không gian, làm cơ sở lựa chọn đoạn tuyến nghiên cứu chi tiết cho các nội dung ở chương sau. Phân vùng nguy cơ trượt đất bằng AI là phương pháp sử dụng các thuật toán máy học (như ANN, SVM, RF, Deep Learning …) để tự động thiết lập mối quan hệ phi tuyến giữa các yếu tố gây trượt (độ dốc, địa chất, thủy văn...) và các vị trí đã xảy ra trượt trong quá khứ. Khác với các phương pháp truyền thống (AHP hay thống kê), các mô hình AI có khả năng tự học và tối ưu các tham số của mô hình từ dữ liệu, hạn chế sự phụ thuộc vào việc xác định trọng số chủ quan và cho phép mô tả tốt hơn các quan hệ phi tuyến giữa các yếu tố điều kiện và sự xuất hiện trượt đất [111]. Cơ sở lý thuyết của các mô hình AI sử dụng trong bước sàng lọc này được trình bày dưới đây.

2.1.1. Cơ sở lý thuyết một số mô hình trí tuệ nhân tạo sử dụng trong nghiên cứu

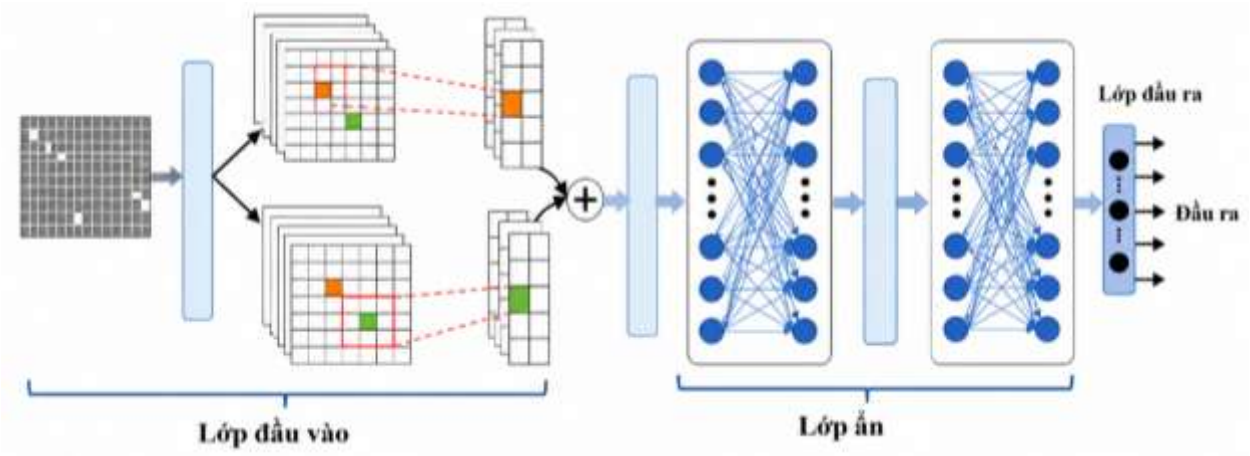
2.1.1.1. Mô hình mạng nơ-ron tích chập (CNN)

a) Cơ sở lý thuyết thuật toán:

CNN là một dạng kiến trúc học sâu hiện đại, được ứng dụng hiệu quả trong lĩnh vực phân tích dữ liệu không gian địa lý, đặc biệt trong các nghiên cứu mô hình hóa địa hình, phân vùng nguy cơ trượt đất đá. Mô hình CNN khai thác cơ chế học phân cấp thông qua các lớp tích chập, cho phép tự động trích xuất và học các đặc trưng không gian từ dữ liệu ảnh đầu vào như ảnh viễn thám hoặc mô hình số địa hình (DEM) (Hình 2.1).

Các lớp gộp trong CNN giúp giảm kích thước dữ liệu, đồng thời duy trì các đặc trưng quan trọng, từ đó nâng cao hiệu quả tính toán và khả năng tổng quát hóa mô hình. Kiến trúc CNN thông thường bao gồm chuỗi các lớp tích chập, lớp gộp, lớp liên kết đầy đủ và các hàm kích hoạt phi tuyến như ReLU, tạo điều kiện thuận lợi cho việc học các biểu diễn đặc trưng ở nhiều cấp độ khác nhau. Theo LeCun và nnk (1998) [109], khả năng học tự

động các mẫu phức tạp từ các thành phần đơn giản hơn giúp CNN đặc biệt phù hợp với các bài toán địa kỹ thuật có tính phi tuyến cao và nhiều yếu tố không xác định.



Hình 2.1. Cấu trúc mạng của thuật toán CNN

Về mặt toán học, giá trị đầu ra tại vị trí không gian (i, j) của kênh thứ k trong một lớp tích chập hai chiều được xác định theo biểu thức:

$$y_{i,j}^{(k)} = \sigma\left(\sum_{c=1}^{C}\sum_{m=0}^{K_h-1}\sum_{n=0}^{K_\omega-1} x_{i+m,j+n}^{(c)}\,\omega_{m,n}^{(k,c)} + b^{(k)}\right) \qquad (2.1)$$

trong đó: $x^{(c)}$ là giá trị đầu vào tại kênh thứ c, $\omega^{(k,c)}$ là trọng số của bộ lọc thứ k tương ứng với kênh c; $b^{(k)}$ là hệ số lệch; K_h và K_ω lần lượt là chiều cao và chiều rộng của bộ lọc; còn σ(·) là hàm kích hoạt phi tuyến, thường được lựa chọn là hàm ReLU. Trong trường hợp xét đến bước trượt và đệm biên, biểu thức trên có thể được mở rộng bằng cách điều chỉnh chỉ số không gian của dữ liệu đầu vào, song bản chất của phép tích chập vẫn không thay đổi.

Phép tích chập cho phép mô hình học các mẫu không gian cục bộ thông qua việc trượt các bộ lọc nhỏ trên toàn bộ miền dữ liệu, từ đó tạo ra các bản đồ đặc trưng phản ánh những cấu trúc quan trọng liên quan đến bài toán nghiên cứu. Trong các lớp tích chập đầu tiên, mô hình thường học được các đặc trưng cơ bản, chẳng hạn như sự biến thiên cục bộ của địa hình hoặc ranh giới giữa các đơn vị địa chất. Khi số tầng tăng lên, các đặc trưng này được kết hợp và trừu tượng hóa dần, cho phép mô hình nhận diện những mẫu phức tạp hơn phản ánh sự tương tác giữa nhiều yếu tố điều kiện trượt đất đá.

b) Ưu điểm và nhược điểm:

**) Ưu điểm:*

- Tự động trích xuất đặc trưng không gian theo cơ chế phân cấp, không đòi hỏi xác định trước quy tắc hay trọng số chủ quan như các phương pháp truyền thống (AHP, thống kê) [111].

- Cơ chế chia sẻ trọng số giữa các vị trí không gian giúp giảm đáng kể số lượng tham số so với mạng kết nối đầy đủ có cùng kích thước đầu vào, đồng thời tạo tính bất biến cục bộ với phép tịnh tiến [109].

- Khai thác trực tiếp quan hệ tương quan không gian giữa một vị trí và các vị trí lân cận thông qua bộ lọc trượt trên hai trục (i, j), phù hợp với bản chất phân bố không gian liên tục của các yếu tố địa hình, địa chất gây trượt.

- Lớp gộp giúp giảm chiều dữ liệu, giảm nhiễu cục bộ và tăng hiệu quả tính toán mà vẫn duy trì các đặc trưng quan trọng.

**) Nhược điểm:*

- Đòi hỏi khối lượng dữ liệu huấn luyện (số điểm trượt đã ghi nhận) tương đối lớn để mô hình học ổn định, tránh quá khớp (overfitting).

- Yêu cầu dữ liệu đầu vào ở dạng lưới đều (raster), đã được đồng bộ hệ quy chiếu và độ phân giải không gian giữa các lớp bản đồ thành phần.

- Khả năng diễn giải cơ chế bên trong mô hình còn hạn chế (đặc trưng "hộp đen"), gây khó khăn khi cần lý giải vật lý cho một dự báo cụ thể.

- Chi phí tính toán và bộ nhớ cao hơn các mô hình học máy truyền thống, đặc biệt khi độ phân giải không gian hoặc số kênh dữ liệu lớn.

c) Điều kiện ứng dụng và loại dữ liệu phù hợp:

Về bản chất toán học, CNN được thiết kế để xử lý dữ liệu có cấu trúc mảng không gian hai chiều (2D) nhiều kênh, đúng dạng của một tổ hợp các lớp bản đồ raster GIS (độ dốc, hướng dốc, địa chất, thạch học, thảm phủ, mật độ sông suối, khoảng cách đứt gãy…), trong đó mỗi lớp bản đồ đóng vai trò một kênh dữ liệu, tương tự cấu trúc một ảnh nhiều kênh phổ có kích thước H×W×C.

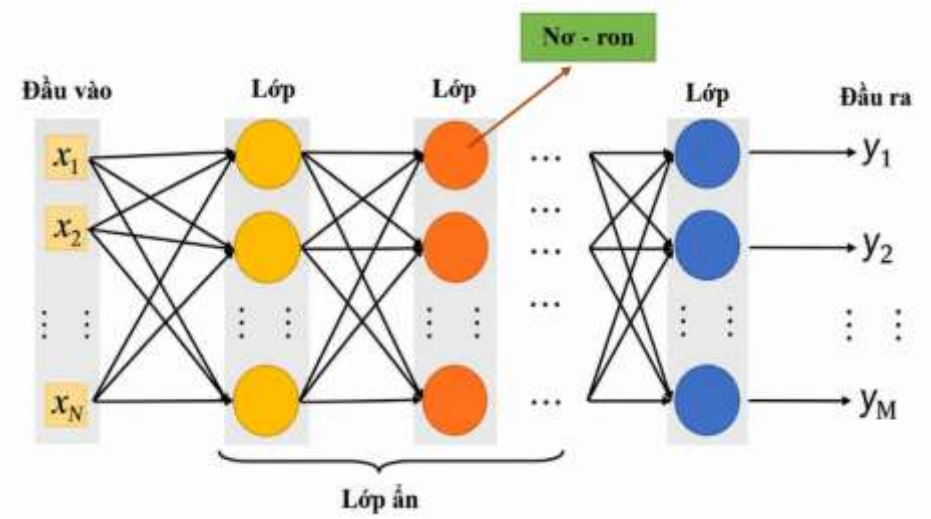
Phép tích chập ngầm định giả thiết về tính dừng không gian, quy luật quan hệ cục bộ giữa các yếu tố lặp lại tương đối ổn định trên toàn miền không gian nghiên cứu. Phù hợp với bản chất vật lý của quá trình mất ổn định sườn dốc, trong đó điều kiện gây trượt tại một vị trí luôn chịu chi phối bởi hình thái và địa chất của khu vực lân cận, chứ không chỉ bởi giá trị tại đúng vị trí đó.

Điều kiện áp dụng: các lớp bản đồ yếu tố ảnh hưởng cần được chuẩn hóa về cùng hệ quy chiếu, cùng độ phân giải không gian (đồng bộ lưới) và có đủ số lượng điểm trượt lịch sử để xây dựng tập mẫu huấn luyện đại diện.

2.1.1.2. Mô hình mạng nơ-ron sâu (DNN)

a) Cơ sở lý thuyết thuật toán:

DNN là một mô hình mạng nơ-ron nhân tạo có cấu trúc nhiều lớp ẩn nằm giữa lớp đầu vào và đầu ra, cho phép học các mối quan hệ phi tuyến phức tạp trong dữ liệu. Khác với các mạng nơ-ron truyền thống, DNN khai thác chiều sâu kiến trúc để thực hiện các phép biến đổi tuần tự thông qua từng lớp, từ đó xây dựng các biểu diễn đặc trưng có tính phân cấp cao [128]. Mỗi lớp trong DNN bao gồm một tập hợp các nơ-ron được kết nối đầy đủ, với trọng số và độ lệch được cập nhật liên tục qua thuật toán lan truyền ngược, nhằm tối thiểu hóa sai số dự báo và nâng cao độ chính xác của mô hình (Hình 2.2).



Hình 2.2. Cấu trúc mạng thuật toán DNN

Khác với CNN, DNN không khai thác trực tiếp cấu trúc không gian cục bộ của dữ liệu, mà tập trung vào việc mô hình hóa mối quan hệ phi tuyến toàn cục giữa các yếu tố đầu vào và đầu ra. Về bản chất, DNN tìm kiếm một hàm ánh xạ phi tuyến giữa tập hợp các yếu tố điều kiện trượt đất và xác suất xảy ra trượt đất, thông qua việc chồng nhiều phép biến đổi tuyến tính và phi tuyến.

Về mặt toán học, tại mỗi lớp ẩn *l*, đầu ra của mạng được xác định theo biểu thức:

$$h^{(l)} = \sigma\left(W^{(l)}h^{(l-1)} + b^{(l)}\right) \quad (2.2)$$

trong đó: $h^{(l-1)}$ là vectơ đầu vào của lớp trước; $W^{(l)}$ là ma trận trọng số; $b^{(l)}$ là vectơ độ lệch và $\sigma(\cdot)$ là hàm kích hoạt phi tuyến, thường được lựa chọn là ReLU hoặc các biến thể của nó. Lớp đầu ra của DNN thường bao gồm một nơ-ron duy nhất với hàm kích hoạt sigmoid, cho ra giá trị xác suất nằm trong khoảng từ 0 đến 1, phản ánh mức độ tương đồng thống kê giữa điều kiện tại vị trí đang xét với các khu vực đã từng xảy ra trượt đất trong tập dữ liệu huấn luyện.

b) Ưu điểm và nhược điểm:

**) Ưu điểm:*

- Kiến trúc đơn giản, số lượng siêu tham số ít hơn CNN/RNN, thời gian huấn luyện nhanh và dễ triển khai.

- Có khả năng xấp xỉ các hàm phi tuyến phức tạp trong không gian đặc trưng nhiều chiều mà không cần giả định trước dạng quan hệ giữa các yếu tố đầu vào, vượt trội hơn các mô hình thống kê tuyến tính truyền thống.

- Phù hợp tốt với dữ liệu đã được trích xuất đặc trưng dưới dạng bảng, không đòi hỏi cấu trúc không gian hay thời gian tường minh.

**) Nhược điểm:*

- Không khai thác trực tiếp mối quan hệ không gian giữa các vị trí lân cận, mỗi vectơ đầu vào được xem là một thực thể độc lập, do đó bỏ sót thông tin ngữ cảnh địa hình xung quanh vị trí đang xét.

- Không khai thác được thứ tự hay tính phụ thuộc theo thời gian của dữ liệu.

- Cấu trúc kết nối đầy đủ giữa các lớp tạo ra số lượng tham số lớn, dễ dẫn đến quá khớp khi tập dữ liệu huấn luyện có quy mô hạn chế.

- Hiệu quả dự báo phụ thuộc mạnh vào chất lượng của bước lựa chọn và trích xuất đặc trưng đầu vào.

c) Điều kiện ứng dụng và loại dữ liệu phù hợp:

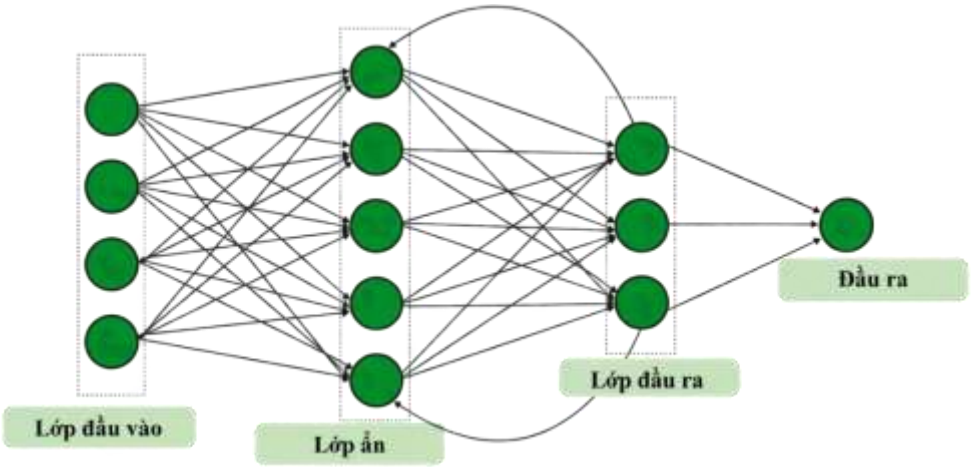
DNN phù hợp với dữ liệu được biểu diễn dưới dạng vectơ đặc trưng độc lập tại từng điểm/pixel, trong trường hợp chưa cần thiết hoặc chưa có điều kiện khai thác ngữ cảnh không gian xung quanh hay chuỗi thời gian của các yếu tố đầu vào. Trong nghiên cứu phân vùng nguy cơ trượt đất đá, DNN thường được xem là mô hình học sâu nền tảng, đóng vai trò cầu nối và là cơ sở so sánh quan trọng để đánh giá hiệu quả gia tăng của việc khai thác thông tin không gian trong các mô hình CNN.

2.1.1.3. Mô hình mạng nơ-ron hồi quy (RNN)

a) Cơ sở lý thuyết thuật toán:

RNN là một lớp mô hình mạng nơ-ron nhân tạo được thiết kế đặc biệt để xử lý dữ liệu tuần tự, trong đó thông tin hiện tại có quan hệ mật thiết với các trạng thái trước đó theo trình tự thời gian. Khác với các mạng truyền thẳng truyền thống, RNN được đặc trưng bởi các kết nối hồi tiếp tạo thành chu trình có hướng, cho phép duy trì "trạng thái bộ nhớ" và

truyền thông tin từ các bước thời gian trước về sau [140] (Hình 2.3).



Hình 2.3. Cấu trúc mạng của thuật toán RNN

Trong mô hình RNN, dữ liệu đầu vào không được xem là các mẫu độc lập, mà được biểu diễn dưới dạng chuỗi có thứ tự, trong đó trạng thái của hệ thống tại thời điểm hiện tại chịu ảnh hưởng trực tiếp từ các trạng thái trong quá khứ. Tại mỗi thời điểm t, trạng thái ẩn của RNN được xác định như sau:

$$h_t = \sigma\left(W_x x_t + W_h h_{t-1} + b\right) \quad (2.3)$$

trong đó, x_t là vectơ đầu vào tại thời điểm t; h_{t-1} là trạng thái ẩn của mạng tại thời điểm trước đó; W_x và W_h lần lượt là các ma trận trọng số liên kết đầu vào và trạng thái hồi quy; b là vectơ độ lệch; còn $\sigma(\cdot)$ là hàm kích hoạt phi tuyến. Nhờ cơ chế hồi quy này, RNN có khả năng ghi nhớ và tích lũy thông tin từ các bước thời gian trước, qua đó mô hình hóa được ảnh hưởng trễ của các yếu tố kích hoạt trượt đất.

Quá trình huấn luyện mô hình RNN được thực hiện thông qua cơ chế lan truyền ngược theo thời gian, trong đó sai số tại các thời điểm sau được lan truyền ngược lại để cập nhật trọng số của mạng. Về mặt lý thuyết, RNN truyền thống thường gặp khó khăn trong việc học các phụ thuộc dài hạn do hiện tượng mất hoặc bùng nổ gradien.

b) Ưu điểm và nhược điểm:

**) Ưu điểm:*

- Mô hình hóa được động lực và tính phụ thuộc theo thời gian của các yếu tố kích hoạt trượt đất, ví dụ tác động tổng hợp của chuỗi mưa trong quá khứ lên trạng thái ổn định của mái dốc tại thời điểm hiện tại.

- Phù hợp với các bài toán mà yếu tố thời gian đóng vai trò quan trọng, như phân tích chuỗi mưa, diễn biến độ ẩm đất hoặc các quá trình tích lũy – suy giảm theo thời gian.

**) Nhược điểm:*

- Gặp khó khăn khi học các phụ thuộc dài hạn do hiện tượng tiêu biến/bùng nổ đạo hàm trong quá trình lan truyền ngược theo thời gian.

- Không khai thác trực tiếp cấu trúc không gian hai chiều của dữ liệu, chỉ mô hình hóa quan hệ theo một trục duy nhất (trục thời gian).

- Khó song song hóa quá trình tính toán do tính chất tuần tự bắt buộc giữa các bước thời gian, dẫn đến chi phí huấn luyện cao với chuỗi dài.

c) Điều kiện ứng dụng và loại dữ liệu phù hợp:

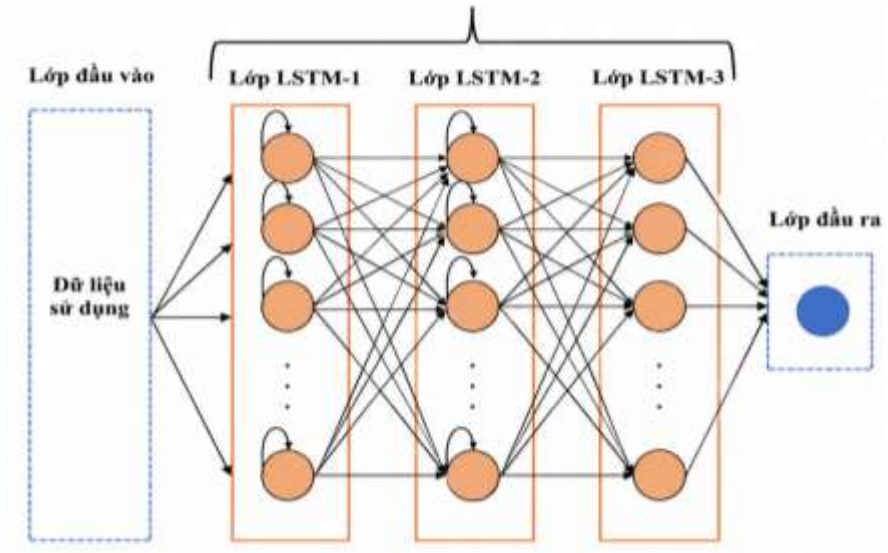
RNN phù hợp với dữ liệu chuỗi thời gian một chiều (1D), chẳng hạn chuỗi lượng mưa theo ngày/giờ, chuỗi mực nước ngầm hoặc độ ẩm đất quan trắc liên tục theo thời gian tại một vị trí, không phải dữ liệu không gian dạng lưới (raster) nhiều chiều.

Việc áp dụng đòi hỏi chuỗi dữ liệu đủ dài, đồng nhất về bước thời gian và có tính liên tục. Do đó, trong bài toán phân vùng nguy cơ trượt đất đá dạng không gian tĩnh, RNN thường phù hợp khi được sử dụng độc lập cho các bài toán dự báo theo thời gian (ví dụ cảnh báo sớm theo mưa), hoặc được kết hợp với CNN nhằm đồng thời khai thác cả thông tin không gian và thời gian [103].

2.1.1.4. Mạng bộ nhớ dài – ngắn (LSTM)

a) Cơ sở lý thuyết thuật toán:

LSTM là một biến thể nâng cao của RNN, được phát triển nhằm khắc phục các hạn chế cốt lõi của RNN vốn có, đặc biệt là khả năng xử lý các chuỗi dữ liệu dài có phụ thuộc tầm xa và vấn đề suy giảm độ dốc trong quá trình lan truyền ngược [83, 93] (Hình 2.4).



Hình 2.4. Cấu trúc mạng của thuật toán LSTM

Cốt lõi của kiến trúc LSTM là sự ra đời của các ô nhớ và các cơ chế cổng điều khiển thông tin bao gồm: cổng đầu vào, cổng quên và cổng đầu ra [84]. Các cổng này đóng vai trò như các "van thông minh" kiểm soát lưu lượng dữ liệu đi vào, giữ lại, hoặc loại bỏ trong từng chu kỳ huấn luyện, giúp mạng có khả năng duy trì và cập nhật thông tin theo ngữ cảnh một cách chọn lọc. Tại thời điểm t, các cổng này được xác định thông qua các hàm kích hoạt sigmoid, cho phép giá trị nằm trong khoảng từ 0 đến 1, biểu thị mức độ cho phép thông tin đi qua. Cụ thể, trạng thái bộ nhớ được cập nhật theo các biểu thức:

$$\mathrm{i}_t = \sigma\left(\mathrm{W}_i[\mathrm{x}_t, \mathrm{h}_{t-1}] + \mathrm{b}_i\right) \quad (2.4)$$

$$\mathrm{c}_t = \mathrm{f}_t \odot \mathrm{c}_{t-1} + \mathrm{i}_t \odot \tilde{\mathrm{c}}_t \quad (2.5)$$

$$\mathrm{h}_t = \mathrm{o}_t \odot \tanh\left(\mathrm{c}_t\right) \quad (2.6)$$

trong đó: x_t là vectơ đầu vào tại thời điểm t; h_t là trạng thái ẩn; c_t là trạng thái bộ nhớ; còn $\odot$ là phép nhân theo phần tử. Cơ chế này cho phép thông tin quan trọng được duy trì ổn định qua nhiều bước thời gian, đồng thời hạn chế hiệu quả hiện tượng mất gradient trong quá trình huấn luyện.

b) Ưu điểm và nhược điểm:

**) Ưu điểm:*

- Khắc phục hiệu quả hiện tượng tiêu biến đạo hàm của RNN truyền thống nhờ cơ chế cổng điều khiển, cho phép ghi nhớ và học các chuỗi dài một cách ổn định.

- Mô hình hóa tốt quá trình tích lũy theo thời gian, phù hợp với bản chất vật lý của nhiều dạng trượt đất, trong đó mất ổn định thường xảy ra sau một giai đoạn tích lũy nước kéo dài thay vì chỉ do một trận mưa đơn lẻ.

**) Nhược điểm:*

- Cấu trúc phức tạp hơn RNN thông thường, số lượng tham số và chi phí huấn luyện lớn hơn. Yêu cầu dữ liệu chuỗi có độ dài và chất lượng đủ lớn để phát huy hiệu quả ghi nhớ dài hạn.

- Tương tự RNN, không khai thác trực tiếp cấu trúc không gian hai chiều của dữ liệu.

c) Điều kiện ứng dụng và loại dữ liệu phù hợp:

LSTM phù hợp với dữ liệu chuỗi thời gian một chiều (1D) dài hạn, như chuỗi mưa tích lũy nhiều ngày/nhiều năm, ..., đặc biệt khi cần mô hình hóa quá trình tích lũy - suy giảm có độ trễ. Trong ứng dụng phân vùng nguy cơ trượt đất đá, LSTM thường được xem

là mô hình học sâu phù hợp nhất cho việc phân tích yếu tố thời gian, và đặc biệt hiệu quả khi được kết hợp với các mô hình không gian như CNN nhằm đồng thời khai thác cả thông tin không gian và động lực thời gian của hiện tượng trượt đất [84].

2.1.2. Đánh giá hiệu suất của mô hình trí tuệ nhân tạo

2.1.2.1. Chỉ số thống kê

Nghiên cứu đã sử dụng nhiều dữ liệu khác nhau để đánh giá hiệu suất của các mô hình AI trong cả giai đoạn đào tạo và kiểm chứng, bao gồm kết quả dương tính thật (TP), kết quả âm tính thật (TN), kết quả dương tính giả (FP), kết quả âm tính giả (FN), giá trị dự báo dương tính (PPV), giá trị dự báo âm tính (NPV), độ nhạy (SST), độ đặc hiệu hoặc tỷ lệ kết quả âm tính thật (SPF), độ chính xác (ACC), Kappa, sai số bình phương trung bình (RMSE) và diện tích dưới đường cong (AUC). Mỗi dữ liệu sử dụng đánh giá một khía cạnh cụ thể của kết quả mô hình hóa, nên đã chọn sử dụng tất cả chúng trong nghiên cứu này, như được khuyến nghị trong tài liệu Cao và nnk (2023) [55]; Chen và Fan (2023) [58, 59]; Liu và nnk (2024) [120 - 122]. Các thông số trên có thể định nghĩa như sau:

- Kết quả dương tính thật (TP): Số trường hợp dương tính dự báo đúng là dương tính.

- Kết quả âm tính thật (TN): Số trường hợp âm tính được dự báo đúng là âm tính.

- Kết quả dương tính giả (FP): Số trường hợp âm tính được dự báo không đúng là dương tính.

- Kết quả âm tính giả (FN): Số trường hợp âm tính được dự báo không đúng là âm tính.

- Giá trị dự báo dương tính (PPV): Còn được gọi là độ chính xác, đó là phần trăm các dự báo dương tính thực sự là dương tính.

$$PPV = TP/ (TP + FP) \quad (2.7)$$

- Giá trị dự báo âm tính (NPV): là tỷ lệ phần trăm các dự báo âm tính thực sự là âm tính.

$$NPV = TN/ (TN + FN) \quad (2.8)$$

- Độ nhạy (SST): Còn được gọi là tỷ lệ thu hồi hoặc tỷ lệ dương tính thực, đó là phần trăm các trường hợp dương tính thực tế được dự báo chính xác.

$$SST = TP/ (TP + FN) \quad (2.9)$$

- Độ đặc hiệu (SPF): Còn được gọi là tỷ lệ âm tính thực sự, đây là tỷ lệ phần trăm các trường hợp âm tính thực tế được dự báo chính xác.

$$SPF = TN/ (TN + FP) \quad (2.10)$$

- Độ chính xác (ACC): Là tỷ lệ phần trăm tổng số trường hợp được dự báo chính xác.

$$ACC = (TP + TN)/ (TP + TN + FP + FN) \quad (2.11)$$

- Giá trị Kappa Index (K): Đây là một biện pháp thống kê tính toán sự đồng thuận của dự báo với kết quả thực tế, có tính đến khả năng đồng thuận xảy ra ngẫu nhiên.

$$K = (P_o-P_e)/(1-P_e) \quad (2.12)$$

trong đó: P_o là tỷ lệ quan sát được; P_e là tỷ lệ ngẫu nhiên kỳ vọng

$$P_o = (TP+TN)/N \quad (2.13)$$

$$P_e = ((TP+FN)(TP+FP)+(FP+TN)(FN+TN))/N^2 \quad (2.14)$$

trong đó: N tổng số lượng điểm của tập kiểm tra

- Sai số bình phương trung bình (RMSE): Thước đo sự khác biệt giữa các giá trị dự báo bởi một mô hình và các giá trị thực tế được quan sát. Việc định lượng sự khác biệt giữa các giá trị dự báo và quan sát được đặc biệt hữu ích [72, 73, 126, 150].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.15)$$

trong đó: y_i là giá trị quan sát được; $\hat{y}_i$ là giá trị dự báo; n là số lượng quan sát.

2.1.2.2. Đường cong ROC

Hiệu suất của mô hình trong phân vùng nguy cơ trượt đất đá được đánh giá thông qua đường cong ROC và chỉ số AUC [74]. ROC cho phép đánh giá khả năng phân biệt của mô hình giữa các khu vực có và không có trượt đất thông qua việc xem xét mối quan hệ giữa tỷ lệ dương tính thật (TP) và tỷ lệ dương tính giả (FP) tại các ngưỡng phân loại khác nhau. Do không phụ thuộc vào một ngưỡng xác suất cố định, ROC phản ánh một cách toàn diện năng lực dự báo tổng quát của mô hình.

Trong nghiên cứu này, đầu ra của mô hình được biểu diễn dưới dạng xác suất xảy ra trượt đất tại từng điểm ảnh trong khu vực nghiên cứu. Bằng cách thay đổi ngưỡng phân loại từ 0 đến 1, các giá trị TP và FP tương ứng được xác định để xây dựng đường cong ROC. Biểu đồ đường cong ROC có trục tung là giá trị độ nhạy (SST), trục hoành là thể hiện giá trị (1-độ đặc hiệu) hay (1-SPF)). Đường cong ROC được xây dựng bởi các điểm có tọa độ (SST, (1-SPF)) tương ứng với một ngưỡng quyết định cụ thể. Diện tích nằm dưới đường cong ROC

được biểu diễn bởi chỉ số AUC, được sử dụng như một thước đo định lượng để đánh giá hiệu quả phân loại của mô hình. Giá trị AUC càng lớn cho thấy mô hình có khả năng phân biệt càng tốt giữa các khu vực trượt và không trượt. AUC có giá trị trong khoảng (0,1), giá trị AUC càng gần 1 thì hiệu suất dự báo của mô hình càng cao. Mô hình có giá trị AUC từ 0,9-1 được đánh giá loại "rất tốt", tiếp theo từ 0,8-0,9 đánh giá là "tốt". Công thức cho AUC không đơn giản vì nó liên quan đến tích hợp trên phạm vi của đường cong ROC. Tuy nhiên, có thể xấp xỉ nó bằng các phương pháp số khi đưa ra một tập hợp các dự báo và kết quả thực (nhị phân) [103, 158].

Ưu điểm nổi bật của chỉ số AUC là khả năng đánh giá mô hình một cách ổn định ngay cả trong điều kiện dữ liệu mất cân bằng, vốn là đặc điểm phổ biến trong các nghiên cứu trượt đất đá do số lượng điểm trượt thường nhỏ hơn nhiều so với các điểm không trượt. Do đó, AUC được xem là chỉ số phù hợp và đáng tin cậy để so sánh hiệu suất giữa các mô hình khác nhau cũng như để kiểm chứng độ tin cậy của bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá.

2.1.2.3. Giải thích giá trị Shapley – phân tích SHAP

Bên cạnh việc đánh giá hiệu suất dự báo của mô hình AI bằng các chỉ số định lượng như AUC, nghiên cứu này sử dụng phân tích SHAP nhằm làm rõ cơ chế ra quyết định của mô hình và đánh giá mức độ đóng góp của từng yếu tố điều kiện vào kết quả phân vùng nguy cơ trượt đất đá. Phân tích SHAP được xây dựng dựa trên lý thuyết giá trị Shapley trong lý thuyết trò chơi, cho phép phân bổ một cách công bằng mức độ đóng góp của mỗi biến đầu vào đối với giá trị dự báo của mô hình [182].

Trong phân vùng nguy cơ trượt đất đá, SHAP được sử dụng để lượng hóa đóng góp của từng yếu tố điều kiện (như độ dốc, thảm phủ thực vật, lượng mưa, đặc điểm địa chất, ...) lên xác suất xảy ra trượt đất tại mỗi điểm ảnh. Giá trị SHAP dương cho thấy yếu tố đó làm tăng xác suất trượt đất, trong khi giá trị SHAP âm phản ánh xu hướng giảm nguy cơ trượt. Trị tuyệt đối của giá trị SHAP càng lớn chứng tỏ mức độ đóng góp của yếu tố đó đến kết quả dự báo càng mạnh. Việc phân tích giá trị SHAP trung bình tuyệt đối trên toàn bộ tập dữ liệu cho phép xác định tầm quan trọng tương đối của các yếu tố điều kiện trong mô hình.

Giá trị SHAP của một đặc trưng i (ký hiệu ϕi) được xác định dựa trên giá trị Shapley trong lý thuyết trò chơi, theo công thức tổng quát:

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq F \setminus \{i\}} \frac{|S|!\,(|F| - |S| - 1)!}{|F|!} \left[f_{S \cup \{i\}}(x_{S \cup \{i\}}) - f_S(x_S) \right] \qquad (2.16)$$

trong đó: F là tập hợp tất cả các đặc trưng (yếu tố điều kiện) của mô hình; S là một tập

con bất kỳ của F không chứa đặc trưng I; |F| là tổng số đặc trưng; |S| là số đặc trưng trong tập con S; f(·) là hàm dự báo của mô hình máy học/học sâu; x_S là giá trị của các đặc trưng trong tập S; f_S là giá trị dự báo của mô hình khi chỉ sử dụng các đặc trưng trong tập S; $f_{S\cup\{i\}}(x_{S\cup\{i\}})$ là giá trị dự báo khi bổ sung thêm đặc trưng i.

2.2. Mô phỏng cường độ dòng nước tạm thời khi có vật liệu rời từ trượt đất nông

2.2.1. Bản chất của dòng nước khi có vật liệu rời

Sau khi xói mòn hay trượt, khối đất bão hòa thường bị phá vỡ cấu trúc ban đầu, tạo nguồn vật liệu hạt rời kích thước khác nhau, có thể hòa trộn với nước mưa và chuyển hóa thành dòng chảy chứa vật liệu rời khi cường độ dòng chảy đủ lớn. Dòng chảy này mang đặc trưng vừa là dòng nước, vừa là dòng vật liệu hạt, với cường độ, vận tốc và khả năng phá hủy lớn hơn nhiều so với dòng nước thuần túy [100].

Khác với dòng nước thủy lực truyền thống, cường độ của dòng nước có vật liệu rời phụ thuộc đồng thời vào điều kiện thủy lực, đặc tính vật liệu và tương tác hạt–nước–địa hình, khiến việc mô phỏng trở nên phức tạp và đòi hỏi các mô hình động lực học chuyên biệt.

2.2.2. Các mô hình mô phỏng cường độ dòng nước khi có vật liệu rời

2.2.2.1. Mô hình thủy lực trung bình theo chiều sâu

Cơ sở toán học phổ biến nhất trong mô phỏng dòng nước chứa vật liệu rời là hệ phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng trung bình theo chiều sâu, phát triển từ phương trình Saint–Venant.

Phương trình bảo toàn khối lượng:

$$\frac{\partial \mathrm{h}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial(\mathrm{hu})}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial(\mathrm{hv})}{\partial \mathrm{y}} = q \qquad (2.17)$$

Phương trình bảo toàn động lượng:

$$\frac{\partial(\mathrm{hu})}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial(\mathrm{h}u^2)}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial(\mathrm{huv})}{\partial \mathrm{y}} = \mathrm{ghsin}\theta_x - \frac{\tau_x}{\rho} \qquad (2.18)$$

$$\frac{\partial(\mathrm{hv})}{\partial \mathrm{t}} + \frac{\partial(\mathrm{huv})}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial(\mathrm{h}v^2)}{\partial \mathrm{y}} = \mathrm{ghsin}\theta_y - \frac{\tau_y}{\rho} \qquad (2.19)$$

trong đó: h là chiều sâu dòng chảy; u, v là vận tốc trung bình theo phương x, y; q là lượng vật chất được thêm vào hoặc lấy ra khỏi hệ thống dòng chảy tại điểm (x, y) theo thời gian t; τ là ứng suất đáy, và ρ là khối lượng riêng của hỗn hợp nước chứa vật liệu rời.

Savage và Hutter (1989) [155] là những tác giả đầu tiên đặt nền tảng lý thuyết cho việc mô phỏng dòng hạt trung bình theo chiều sâu, sau đó được Iverson (1997) [98] phát triển cho dòng nước chứa vật liệu rời phát sinh từ TĐN, trong đó nhấn mạnh vai trò của áp lực lỗ

rỗng và sự tương tác hai pha nước và hạt.

2.2.2.2. Mô hình Herschel–Bulkley

Mô hình Herschel–Bulkley là dạng mở rộng của Bingham, thể hiện quan hệ phi tuyến giữa ứng suất và tốc độ biến dạng, được Coussot và Meunier (1996) [61] sử dụng để phân loại và mô tả cơ học dòng đất đá trong nhiều điều kiện khác nhau.

$$\tau = \tau_y + k\dot{y}^n \quad (2.20)$$

trong đó: τ là ứng suất cắt; τ_y là ứng suất chảy; k là hệ số nhất quán; n là chỉ số phi tuyến; $\dot{y}$ là tốc độ biến dạng cắt.

Mô hình này mô tả tốt sự thay đổi cường độ dòng theo tốc độ biến dạng và hàm lượng hạt. Tuy nhiên, chúng đòi hỏi nhiều tham số khó xác định từ thực địa, gây hạn chế trong ứng dụng cho đánh giá nguy cơ trên diện rộng.

2.2.2.3. Mô hình Voellmy–Salm

Mô hình Voellmy–Salm là một trong những mô hình được sử dụng rộng rãi nhất hiện nay để mô phỏng cường độ dòng nước có vật liệu rời. Trong đó ứng suất cản đáy gồm hai thành phần: ma sát Coulomb và lực cản nhiễu loạn phụ thuộc vận tốc

Ứng suất cản đáy tổng:

$$\tau = \mu\rho ghcos\theta + \frac{\rho v^2}{\xi} \quad (2.21)$$

Phương trình vận tốc đặc trưng:

$$\frac{dv}{\mathrm{dt}} = gsin\theta - \mu gcos\theta - \frac{v^2}{\xi h} \quad (2.22)$$

trong đó: τ là ứng suất cắt, μ là hệ số ma sát đáy; ξ là hệ số ma sát rối – nhớt; ρ là khối lượng riêng của dòng vật liệu; h là chiều dày dòng chảy; *v* là vận tốc dòng; θ là góc dốc địa hình; g là gia tốc trọng trường.

Ban đầu được phát triển cho lở tuyết [154], mô hình này đã được chứng minh có khả năng mô phỏng hiệu quả dòng nước chứa vật liệu rời khi được hiệu chỉnh phù hợp [44, 60]. Trong bối cảnh TĐN do mưa, mưa lớn làm giảm ma sát đáy và tăng tính lưu động của vật liệu, điều này được phản ánh gián tiếp qua sự thay đổi các tham số μ và ξ.

2.2.2.4. Mô hình hai pha

Để mô tả riêng biệt chuyển động của pha rắn và pha lỏng, cho phép đánh giá chi tiết sự thay đổi cường độ dòng theo hàm lượng vật liệu rời, các mô hình hai pha đã được áp dụng với phương trình bảo toàn riêng cho từng pha:

Phương trình bảo toàn khối lượng pha rắn:

$$\frac{\partial(\alpha_s \rho_s)}{\delta t} + \nabla(\alpha_s \rho_s u_s) = 0 \quad (2.23)$$

Phương trình bảo toàn khối lượng pha lỏng:

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_{sf})}{\delta t} + \nabla\left(\alpha_f \rho_f u_f\right) = 0 \quad (2.24)$$

Phương trình động lượng pha rắn:

$$\alpha_s \rho_s \frac{Du_s}{Dt} = -\alpha_s \nabla p + f_{sf} + g \quad (2.25)$$

trong đó: α_s, α_f là hệ số thể tích của pha rắn và pha lỏng; ρ_s, ρ_f là khối lượng riêng của pha rắn và pha lỏng; u_s, u_f là vận tốc pha rắn và pha lỏng; p là áp suất (thường là áp lực lỗ rỗng); f_{sf} là lực tương tác giữa hai pha; g là gia tốc trọng trường.

Mô hình này được phát triển và hoàn thiện bởi Iverson và Denlinger (2001) [100], Pudasaini (2012) [149]. Tuy nhiên, do độ phức tạp tính toán lớn và yêu cầu dữ liệu đầu vào cao, các mô hình này chủ yếu được sử dụng cho nghiên cứu cơ chế hơn là ứng dụng thực tiễn.

2.2.3. Mô phỏng cường độ dòng nước khi có vật liệu rời bằng phần mềm RAMMS

Phần mềm RAMMS Debris Flow version 1.8.0 (phiên bản Educational License) áp dụng mô hình động lực học chất lỏng Salm (1993) [154] để mô phỏng quá trình lan truyền của dòng chảy, trong đó dòng nước có vật liệu rời được biểu diễn dưới dạng mô hình liên tục trung bình theo chiều sâu dựa trên cơ sở lý thuyết thủy lực.

Trong hệ tọa độ Descartes cố định, RAMMS sử dụng ba chiều không gian (x, y, z) và thời gian (t), trong đó x và y là các tọa độ nằm ngang đại diện cho hướng chuyển động của vật liệu, còn z là phương vuông góc với mặt cắt dòng chảy.

Từ phương trình bảo toàn khối lượng, mô hình xác định được hai tham số dòng chảy đặc trưng là chiều cao dòng H (x, y, z) và vận tốc U (x, y, z). Từ đó, phương trình bảo toàn khối lượng của mô hình Voellmy–Salm được biểu diễn như sau:

$$d_t H + d_x(HU_x) + d_y\left(HU_y\right) = Q(x, y, t) \quad (2.26)$$

trong đó: Q (x, y, t) là nguồn phát sinh khối lượng, biểu thị sự bổ sung vật liệu vào dòng chảy theo không gian và thời gian; U_x và U_y lần lượt là vận tốc trung bình theo chiều sâu của dòng chảy theo phương x và phương y.

Tương ứng, các phương trình bảo toàn động lượng trung bình theo chiều sâu theo hai

phương nằm ngang của mô hình [60] được biểu diễn như sau:

$$d_t(HU_x) + d_x\left(c_x HU_x^2 + \frac{g_z k_{\left(\frac{\alpha}{p}\right)} H^2}{2}\right) + d_y\left(HU_x U_y\right) = S_{(gx)} - S_{(fx)'} \qquad (2.27)$$

$$d_t(HU_y) + d_y\left(c_y HU_y^2 + \frac{g_z k_{\left(\frac{\alpha}{p}\right)} H^2}{2}\right) + d_x\left(HU_x U_y\right) = S_{(gy)} - S_{(fy)'} \qquad (2.28)$$

trong đó: c_x và c_y là các hệ số dạng mặt cắt, phản ánh đặc điểm hình học và địa hình của bề mặt dòng chảy theo các phương tương ứng; $k_{(\alpha/p)}$ là hệ số áp lực đất, phụ thuộc vào góc ma sát trong hoặc trạng thái ứng suất của vật liệu; S_g là gia tốc trọng trường; và S_f là thành phần giảm tốc do ma sát theo các phương x và y.

Mô hình vật lý của RAMMS sử dụng mô hình Voellmy, trong đó lực cản ma sát của khối vật liệu đang chảy được chia thành hai thành phần chính: sự cản trở của pha rắn, được biểu diễn bởi hệ số ma sát đáy μ; và sự cản trở của pha lỏng nhớt hoặc nhiễu loạn, được biểu diễn bởi hệ số ma sát rối – nhớt ξ.

Theo Salm (1993) [154], lực cản ma sát tổng S của dòng chảy được biểu diễn như sau:

$$S = \mu p H cos\phi + (\rho g U^2)/\xi \qquad (2.29)$$

trong đó: ρ là khối lượng riêng của dòng vật liệu; μ là hệ số ma sát đáy; ξ là hệ số ma sát rối – nhớt; g là gia tốc trọng trường; ϕ là góc dốc của địa hình theo hướng dòng chảy; U là vận tốc trung bình theo chiều sâu của dòng chảy; H là chiều cao (độ sâu) của dòng chảy.

2.3. Phân tích ổn định mái dốc bằng mô hình số

Khi nghiên cứu ổn định mái dốc chịu ảnh hưởng của mưa, việc xem xét riêng rẽ bài toán thấm và bài toán ổn định là chưa đủ để phản ánh cơ chế mất ổn định, đặc biệt đối với các trường hợp TĐN trong lớp phong hóa. Sự biến đổi điều kiện thủy lực trong đất, bao gồm áp lực nước lỗ rỗng và lực hút dính, đóng vai trò chi phối trực tiếp đến sự thay đổi sức kháng cắt và hệ số ổn định của mái dốc theo thời gian. Do đó, cần thiết phải áp dụng phương pháp phân tích kết hợp giữa thấm và ổn định.

Trong nghiên cứu này, phần mềm GeoStudio [81] được sử dụng với hai mô đun chính là SEEP/W và SLOPE/W nhằm mô phỏng quá trình thấm không bão hòa và đánh giá ổn định mái dốc trong điều kiện mưa. Mô đun SEEP/W cho phép giải bài toán thấm theo thời gian, có xét đến đặc trưng của đất không bão hòa thông qua đường cong đặc trưng đất-nước (SWCC) và quan hệ hệ số thấm phụ thuộc lực hút. Trên cơ sở đó, phân bố áp lực

nước lỗ rỗng và sự phát triển vùng bão hòa trong mái dốc được xác định theo từng bước thời gian.

Kết quả phân tích thấm từ SEEP/W được sử dụng làm đầu vào cho mô đun SLOPE/W để tính toán ổn định mái dốc theo phương pháp cân bằng giới hạn. Trong mô hình này, phương pháp Bishop được áp dụng để xác định hệ số ổn định và mặt trượt nguy hiểm, có xét đến ảnh hưởng của áp lực nước lỗ rỗng và lực hút dính trong đất không bão hòa.

2.3.1. Cơ sở lý thuyết phân tích thấm bằng mô đun SEEP/W

Hệ phương trình chi phối trong mô-đun SEEP/W được xây dựng trên cơ sở định luật Darcy mở rộng cho môi trường không bão hòa [112]. Với bài toán thấm hai chiều, không ổn định theo thời gian trong môi trường đất đẳng hướng, chuyển động của nước trong lỗ rỗng được mô tả bằng phương trình cân bằng khối lượng. Phương trình này thể hiện mối quan hệ giữa độ chênh lệch lưu lượng nước đi vào và đi ra khỏi một phân tố thể tích vi phân với tốc độ biến thiên của hàm lượng nước thể tích theo thời gian. Nói cách khác, sự tích lũy hoặc suy giảm nước trong một phần tử đất phải tương ứng với sai khác giữa dòng vào và dòng ra, như được trình bày trong phương trình (2.30) [78, 151, 169, 192].

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial H}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial H}{\partial y}\right) + q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \qquad (2.30)$$

trong đó: H là tổng cột nước; k_x, k_y là hệ số thấm theo phương x và y; q là lưu lượng do mưa; m_w là hệ số thay đổi thể tích nước phụ thuộc lực hút dính; γ_w là trọng lượng riêng của nước, t là thời gian.

Quá trình mưa thấm vào đất làm thay đổi hàm lượng nước thể tích, từ đó hình thành dòng thấm không ổn định trong môi trường đất không bão hòa. Trong điều kiện này, các hệ số thấm theo phương ngang và phương đứng (k_x, k_y) không còn là hằng số mà biến thiên theo lực hút dính hoặc áp suất nước lỗ rỗng.

Mô-đun SEEP/W cho phép mô phỏng cả bài toán thấm ổn định và không ổn định trong đất bão hòa cũng như không bão hòa. Trong mô hình số, mái taluy được rời rạc hóa bằng lưới phần tử hữu hạn phi cấu trúc; tại mỗi nút của lưới, các đại lượng như ứng suất, áp suất nước lỗ rỗng và lưu tốc thấm được xác định và cập nhật theo từng bước thời gian. Đối với dòng thấm không ổn định trong đất không bão hòa, SEEP/W giả thiết áp suất pha khí u_a trong lỗ rỗng không đổi và xấp xỉ bằng áp suất khí quyển. Khi không xét đến tác động của tải trọng ngoài, ứng suất tổng σ của đất được coi là không đổi, dẫn đến hiệu số ($\sigma - u_a$) giữ giá trị không đổi. Do đó, sự biến thiên hàm lượng nước trong đất không phụ

thuộc vào đại lượng này mà chủ yếu phụ thuộc vào lực hút dính (u_a–u_w), hay tương đương là áp lực nước lỗ rỗng u_w.

Sau mỗi bước thời gian, biến thiên hàm lượng nước được tính từ phương trình chi phối; giá trị áp lực nước lỗ rỗng u_w được cập nhật tương ứng, làm cơ sở xác định trạng thái thủy lực cho bước thời gian kế tiếp. SEEP/W cho phép lựa chọn thuật toán giải trực tiếp phương trình vi phân chi phối tại từng bước thời gian hoặc thực hiện tính toán đồng thời trên toàn bộ các nút của lưới phần tử hữu hạn.

2.3.2. Đường cong đặc trưng đất - nước (SWCC)

SWCC là quan hệ hàm số giữa hàm lượng nước trong đất (độ ẩm) và lực hút dính. SWCC là công cụ mô tả hành vi của đất không bão hòa, cho phép xác định nhiều tham số thủy lực và cơ học quan trọng.

Trong môi trường không bão hòa, lỗ rỗng chứa cả nước và không khí. Sự tồn tại đồng thời hai pha này tạo ra áp lực hút:

$$\psi = u_a - u_w \tag{2.31}$$

trong đó: u_a là áp suất pha khí; u_w là áp lực nước lỗ rỗng; ψ là lực hút dính (kPa)

SWCC biểu diễn mối quan hệ:

$$\theta = f(\psi) \text{ hoặc } S_r = f(\psi) \tag{2.32}$$

trong đó: θ là hàm lượng nước thể tích; S_r là độ bão hòa

SWCC thường có dạng chữ S và được mô hình hóa bằng các hàm thực nghiệm như Van Genuchten (1980) hoặc Fredlund và Xing (1994) [79]

Mô hình van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \tag{2.33}$$

trong đó: θ_s là độ ẩm thể tích bão hòa; θ_r là độ ẩm thể tích dư; α, n, m là các tham số

Mô hình Fredlund và Xing (1994):

$$\theta(\psi) = C(\psi)\frac{\theta_s}{\ln\left[e + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m} \tag{2.34}$$

trong đó: $C(\psi)$ là hệ số hiệu chỉnh; a, n, m là các tham số hiệu chỉnh; e là số tự nhiên

SWCC có thể được xác định trực tiếp thông qua các thí nghiệm trong phòng hoặc thí nghiệm hiện trường. Trong điều kiện thiếu số liệu thí nghiệm xác định trực tiếp SWCC,

khi đó SWCC sẽ được xác định gián tiếp từ đường cong thành phần hạt (PSD). Phương pháp dự báo SWCC gián tiếp từ đường cong thành phần hạt được thực hiện theo mô hình bán thực nghiệm Arya và Paris (1981) [37]. Nguyên lý của mô hình dựa trên việc chuyển đổi đường cong thành phần hạt thành đường cong phân bố kích thước lỗ rỗng tương đương, sau đó quy đổi sang lực hút tương ứng thông qua phương trình mao dẫn. Trình tự xác định gồm các bước sau:

- Bước 1: Đường cong PSD được chia thành n cấp hạt; mỗi cấp hạt thứ i có khối lượng riêng phần w_i và bán kính hạt trung bình R_i (lấy bằng trung bình hình học giữa giới hạn trên và dưới của cấp hạt).

- Bước 2: Thể tích lỗ rỗng ứng với mỗi cấp hạt được xác định theo khối lượng riêng phần w_i và hệ số rỗng e của mẫu đất nguyên trạng:

$$V_i = \frac{w_i}{\rho_s} e \tag{2.35}$$

trong đó: ρ_s là khối lượng riêng hạt đất

- Bước 3: Bán kính lỗ rỗng r_i tương ứng với cấp hạt i được xác định bằng cách quy đổi bán kính hạt R_i thông qua tham số tỷ lệ α, đặc trưng cho mức độ lệch so với giả thiết hạt cầu sắp xếp lý tưởng của đất tự nhiên:

$$r_i = R_i \left(\frac{2en_i^{1-\alpha}}{3} \right)^{1/2} \tag{2.36}$$

trong đó: n_i là số hạt cầu quy đổi trong cấp hạt i; α là tham số tỷ lệ, xác định bằng thực nghiệm, thường lấy trong khoảng 1,0–3,0 tùy loại đất.

- Bước 4: Lực hút ψ_i tương ứng với bán kính lỗ rỗng r_i được xác định theo phương trình mao dẫn (Young–Laplace):

$$\psi_i = \frac{2\sigma cos\theta}{\rho_w g r_i} \tag{2.37}$$

trong đó: σ là sức căng bề mặt của nước; θ là góc tiếp xúc (thường lấy bằng 0°); ρ_w là khối lượng riêng của nước; g là gia tốc trọng trường.

- Bước 5: Hàm lượng nước thể tích θ_i tương ứng được xác định bằng tổng lũy tích khối lượng riêng phần từ cấp hạt mịn nhất đến cấp hạt thứ i, nhân với độ ẩm bão hòa θ_s:

$$\theta_i = \theta_s \sum_{j=1}^{i} \omega_j \tag{2.38}$$

Tập hợp các cặp giá trị (ψ_i, θ_i) tính được từ Bước 4 và Bước 5 tạo thành đường cong

SWCC dự báo, được khớp với hàm van Genuchten (Công thức 2.33) để xác định các tham số α, n, m sử dụng trong các tính toán tiếp theo của luận án.

Trên cơ sở đường cong SWCC, hệ số thấm không bão hòa được xác định thông qua mô hình Mualem–Van Genuchten, trong đó hệ số thấm tương đối K_r được biểu diễn theo độ bão hòa hữu hiệu S_e như sau:

$$K_r = S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m}})^m\right]^2 \quad (2.39)$$

trong đó: l là hệ số liên kết lỗ rỗng (thường lấy l=0,5); S_e là độ bão hòa hữu hiệu

Hệ số thấm không bão hòa K được xác định theo công thức:

$$K = K_s K_r \quad (2.40)$$

trong đó: K_s là hệ số thấm bão hòa của đất

Độ bão hòa hữu hiệu S_e được xác định theo tỷ lệ giữa hàm lượng nước thực tế và khoảng biến thiên hàm lượng nước của đất:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2.41)$$

Theo mô hình van Genuchten (Công thức 2.32), S_e có thể biểu diễn trực tiếp theo lực hút ma trận ψ:

$$S_e = [1 + (\alpha\psi)^n]^{-m} \quad (2.42)$$

2.3.3. Lý thuyết cân bằng giới hạn và phương pháp phân tích ổn định mái dốc Bishop

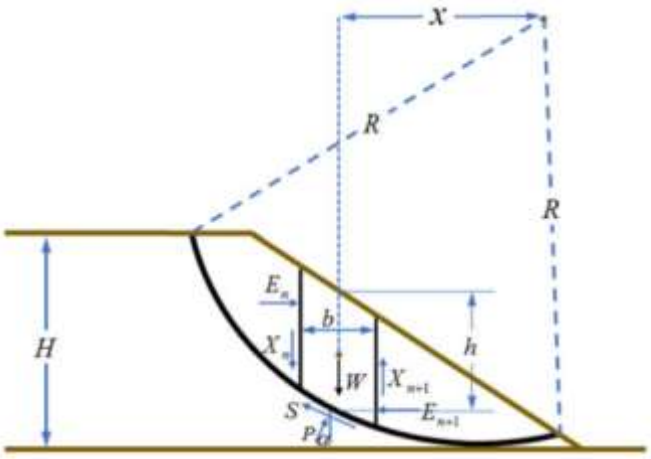
Để đánh giá mức độ ổn định của mái dốc trong điều kiện chịu tác động của mưa và trạng thái bão hòa biến đổi theo thời gian, nhiều phương pháp tính toán đã được phát triển nhằm xác định trạng thái ổn định của mái dốc dưới điều kiện độ bão hòa thay đổi. Các phương pháp này bao gồm phương pháp sai phân hữu hạn (FDM), phương pháp cân bằng giới hạn (LEM) và phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Phương pháp Bishop là một dạng của LEM và được sử dụng rộng rãi trong đánh giá ổn định mái dốc [122, 189].

Mức độ ổn định của mái dốc được đánh giá thông qua hệ số ổn định FS. Khi FS > 1, mái dốc ổn định, FS < 1 mái dốc mất ổn định và FS = 1 mái dốc ở trạng thái cân bằng giới hạn.

$$FS = \frac{\sum M_{ct}}{\sum M_{gt}} \quad (2.43)$$

trong đó: $\sum M_{ct}$ là tổng mô men của các lực chống trượt; $\sum M_{gt}$ là tổng mô men của các lực gây trượt.

Trong phương pháp Bishop, giả sử mái dốc trượt theo một cung tròn với bán kính R, và các lực gây trượt cũng như lực chống trượt được xác định cho từng thỏi đất (Hình 2.5).



Hình 2.5. Lực tác dụng lên một thỏi đất

Theo Bishop, sức kháng cắt tới hạn của đất không bão hòa được xác định [78]:

$$\tau_f = c' + [(\sigma_n - u_a) + \chi(u_a - u_w)]\tan\varphi' \quad (2.44)$$

trong đó: τ_f là sức kháng cắt tới hạn; c' là lực dính hiệu dụng của đất; φ' là góc ma sát trong hiệu dụng của đất; σ_n là ứng suất pháp của đất tại mặt trượt; u_a là áp suất khí; u_w là áp lực nước lỗ rỗng; χ thông số đặc trưng cho mức độ bão hòa của đất.

Hệ số ổn định mái dốc của đất không bão hòa xác định theo Bishop [46, 47].

$$FS = \frac{c' + (\sigma_n - u_a)\tan\varphi' + (u_a - u_w)\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)\tan\varphi'}{\rho_s g \sin\alpha\cos\alpha} \quad (2.45)$$

trong đó: FS là hệ số ổn định mái dốc; α là góc nghiêng của mái dốc; ρ_s là khối lượng riêng của đất; g là gia tốc trọng trường.

2.4. Cơ sở lý luận phân tích ảnh hưởng trượt đất nông tới ổn định nền đường

2.4.1. Ảnh hưởng trượt đất nông tới chất lượng mặt đường

Mặt đường là lớp bề mặt trên cùng của kết cấu đường, được thiết kế để chịu tác động trực tiếp từ bánh xe phương tiện và thời tiết, có chức năng phân bổ tải trọng xuống các lớp dưới, đảm bảo an toàn, êm thuận và bền vững cho giao thông. Chức năng và yêu cầu chính của mặt đường: phân tán lực từ bánh xe xuống nền đường một cách an toàn; có đủ độ ma sát chống trượt, ít gây tiếng ồn; chịu được tác động của thời tiết (nắng, mưa) và tuổi thọ cao; bề mặt không thấm nước để bảo vệ đất nền.

Ba dạng hư hỏng mặt đường bê tông nhựa điển hình được ghi nhận gồm: lún võng

cục bộ, nứt mép mặt đường và bong bật lớp mặt. Những hư hỏng này làm giảm chất lượng êm thuận, độ bền kết cấu mặt đường, đồng thời là tiêu chí đánh giá mức độ xuống cấp trong công tác duy tu bảo trì cho tuyến đường. Dưới đây là phân tích cơ chế hình thành từng loại hư hỏng trong mối liên hệ với hiện tượng TĐN.

2.4.1.1. Lún võng cục bộ

TĐN xảy ra tại taluy dương là nguyên nhân phổ biến gây lún võng cục bộ nền đường tại các khu vực miền núi. Khi TĐN xảy ra khối trượt di chuyển nhanh xuống phía dưới dọc theo mái taluy dương gây tích tụ vật liệu rời ở mép đường, một phần khối trượt tác động trực tiếp vào mặt đường hoặc mái taluy âm. Tại vị trí tiếp xúc giữa khối trượt và mặt đường gây ra lực va đập là tổ hợp tải trọng thẳng đứng, tải trọng ngang và tải trọng động.

Lực va đập của khối trượt, đặc biệt ở những dòng trượt có vận tốc lớn, gây áp lực đột ngột lên kết cấu mặt đường. Với vận tốc dòng trượt cao, động năng của khối vật liệu biến thành lực va đập cực mạnh, vượt quá khả năng chịu tải thiết kế của kết cấu áo đường, khiến nền đường bị sụt lún, nứt gãy, lớp bê tông nhựa bị phá vỡ và tạo ra các vết nứt vỡ, hố sụt trên mặt đường. Bên cạnh đó, áp lực động do dòng đất đá và nước chảy tràn trên đường gây ra ứng suất lan tỏa lên bề mặt đường trong thời gian ngắn. Hậu quả là nền đường sụt lún, mặt đường bị bong tróc lớp nhựa, xói mòn và hư hỏng hoàn toàn trên chiều dài lớn.

Những vị trí bị sụt lún, nứt vỡ tạo điều kiện cho nước mưa, nước chảy tràn trên đường (do rãnh thoát nước bị lấp) ngấm xuống nền đường, làm cho nền đường bị xói ngầm, lớp móng và mặt đường phía trên không còn được nâng đỡ đầy đủ, dẫn đến sụt lún dưới tải trọng xe. Biểu hiện ban đầu là mặt đường võng xuống nhẹ, có thể tạo thành gợn sóng hoặc vệt lún bánh xe khi xe chạy qua. Theo thời gian (và nếu tiếp tục có mưa), vùng lún có xu hướng mở rộng và lún sâu thêm do nền đường tiếp tục bị suy yếu.

Lún võng cục bộ không chỉ gây mất êm thuận mà còn làm đọng nước trên mặt đường, dẫn tới hư hại nặng hơn nếu không khắc phục kịp thời. Trong công tác bảo trì, yêu cầu đặt ra là mặt đường không được có chỗ lún võng cục bộ; nếu phát hiện phải bù lấp, vá sửa ngay để khôi phục độ bằng phẳng và đảm bảo thoát nước bề mặt.

2.4.1.2. Nứt mép mặt đường

Nứt mép là loại vết nứt chạy dọc sát mép phần xe chạy, thường xuất hiện khi mép đường bị mất hỗ trợ hoặc chịu ứng suất kéo uốn quá mức. TĐN taluy âm là nguyên nhân dẫn đến nứt mép mặt đường: khi taluy âm bị trượt, tạo lỗ hổng bên dưới phần lề và mép đường, khi đó mặt đường bị hẫng. Dưới tác động của trọng lượng mặt đường và tải trọng xe, mép mặt đường bị tách khỏi phần còn lại, hình thành vết nứt dọc kéo dài. Vết nứt này thường mở rộng dần và lan theo chiều dài đường, dịch vào sâu hơn nếu cung trượt tiếp tục phát triển.

2.4.1.3. Bong bật lớp mặt

Trong quá trình khai thác đường ô tô, đặc biệt tại các khu vực thường xuyên xảy ra ngập úng cục bộ, sự xâm nhập của nước vào kết cấu mặt đường được xác định là một nguyên nhân chủ yếu dẫn đến hiện tượng bong bật lớp mặt. Ghauch và nnk (2015) [82] đã sử dụng mô hình phần tử hữu hạn vi mô để mô phỏng ảnh hưởng của nước tới hỗn hợp bê tông nhựa. Kết quả cho thấy sự hiện diện của nước làm giảm rõ rệt lực dính kết giữa nhựa và cốt liệu, từ đó dẫn đến suy giảm cường độ liên kết tại mặt phân lớp giữa lớp áo đường và lớp móng. Hiện tượng này làm tăng khả năng bong bật lớp mặt thành từng mảng khi chịu tải trọng lặp. Tương tự, Van Staden và Fragomeni (2020) [176] thực hiện phân tích ba chiều bằng phần tử hữu hạn tại bề mặt tiếp xúc giữa lớp bê tông nhựa và móng đường, kết luận rằng khi không có lớp kết dính, nước xâm nhập tại mặt tiếp xúc làm giảm đáng kể lực cắt giới hạn, tạo điều kiện phá hủy liên kết kết cấu và phát triển bong bật lớp mặt. Mô phỏng của tác giả thể hiện rõ vai trò của dòng nước tại mặt phân lớp như một yếu tố kích hoạt phá hoại cục bộ. Ở cấp độ vi mô, Nie và nnk (2025) [138] áp dụng phương pháp động lực học phân tử để khảo sát tương tác giữa các phân tử nhựa đường và bề mặt đá khi có nước. Kết quả cho thấy các phân tử nước tạo thành màng phân cách tại lớp tiếp xúc, làm gián đoạn liên kết hóa học và tạo ra các khoảng trống vi mô tại vùng tiếp xúc, dẫn đến tách lớp ở quy mô nguyên tử. Sự suy giảm lực dính bề mặt này được xem là tiền đề cho bong bật lớp mặt ở mặt đường khi kết hợp với tải trọng lặp và rung động.

Tổng hợp các nghiên cứu trên cho thấy, cơ chế phá hoại bong bật lớp mặt không chỉ đến từ ảnh hưởng của nước từ bên ngoài mà còn do sự suy giảm tính dính kết nội tại giữa các phân tử nhựa đường và bề mặt đá trong điều kiện bão hòa nước.

2.4.2. Ảnh hưởng trượt đất nông tới hệ thống thoát nước

Chức năng chính của hệ thống thoát nước là thu gom và dẫn nước khu vực nền đường: bao gồm nước chảy tràn trên mặt đường, nước mưa từ mái taluy dương tràn xuống. Hệ thống thoát nước nền đường đào trên tuyến đường GTMN bao gồm rãnh thoát nước dọc tuyến và các cống thoát nước ngang đường. Nước mưa trên mặt đường, nước trên các mái ta luy dương sẽ được thu gom vào hệ thống rãnh thoát nước dọc tuyến sau đó được chảy sang bên phía taluy âm thông qua hệ thống cống thoát nước ngang.

TĐN ảnh hưởng đến hệ thống thoát nước đường GTMN qua nhiều cơ chế khác nhau:

- Khi xảy ra TĐN ở taluy dương, khối đất đá trượt xuống gây vùi lấp hoặc làm hư hại các rãnh thoát nước dọc, cống thoát nước ngang đường. Nếu lực va đập lớn, làm vỡ hoặc làm xê dịch các rãnh thoát nước dọc, khiến các rãnh thoát nước này mất khả năng dẫn nước.

- Địa hình mái dốc sau trượt lở bị biến dạng, làm thay đổi hướng dòng chảy bề mặt của

nước mưa. Thay vì phân tán theo thiết kế ban đầu, nước có xu hướng tập trung vào một điểm hoặc khu vực thấp, gây xói lở cục bộ ở chân nền đường. Đặc biệt, khi dòng nước bị dồn vào những nơi không được gia cố bảo vệ, hiện tượng xói mòn chân taluy và cuốn trôi vật liệu nền đường thường xuyên xảy ra, đe dọa sự ổn định của kết cấu nền đường.

Khi hệ thống thoát nước nền đường đào dọc tuyến đường miền núi không được vận hành đúng theo thiết kế, nó gây ra những hậu quả nghiêm trọng:

- Sụt lún, hư hỏng nền đường: Nước tích tụ dưới nền làm mềm đất, giảm khả năng chịu tải, dẫn đến sụt lún nền đường hoặc nứt vỡ kết cấu mặt đường.

- Xói mòn mặt đường và taluy: Dòng nước chảy mạnh không được kiểm soát gây xói mòn mặt đường, lề đường, làm phát sinh ổ gà, rãnh xói, thậm chí cuốn trôi một phần nền đường. Mái taluy không có gia cố cũng dễ bị rửa trôi, tạo hàm ếch nguy hiểm.

- Ngập úng cục bộ: Rãnh dọc, cống ngang bị tắc, nước mưa đọng lại gây ngập mặt đường, làm giảm ma sát bánh xe và hư hỏng lớp mặt (đặc biệt với kết cấu mặt đường mềm).

2.5. Tóm tắt chương 2

Chương 2 đã trình bày tóm tắt cơ sở lý thuyết được sử dụng nghiên cứu trong luận án, bao gồm phân vùng nguy cơ trượt đất đá, lý thuyết mô hình hóa dòng chảy có vật liệu rời được cung cấp từ trượt đất, phân tích ổn định mái dốc theo phương pháp cân bằng giới hạn khi xem xét cả tác động yếu tố thấm và áp lực nước lỗ rỗng.

Các mô hình trí tuệ nhân tạo học sâu tiến tiến như mô hình mạng nơ-ron tích chập (CNN), mô hình mạng nơ-ron sâu (DNN), mô hình mạng nơ-ron hồi quy (RNN) và mạng bộ nhớ dài – ngắn (LSTM) được sử dụng trong dự báo để xây dựng bản đồ nguy cơ sụt trượt đất đá dọc tuyến nghiên cứu điển hình ĐT128 tại Lai Châu, làm cơ sở lựa chọn phân đoạn nghiên cứu chi tiết được thực hiện tại chương 3. Hiệu suất dự báo của các mô hình trí tuệ nhân tạo được đánh giá bằng các công cụ tin cậy và phổ biến gồm chỉ số thống kê và đường cong ROC.

Các phương pháp phân tích định lượng lựa chọn được để nghiên cứu như: ảnh hưởng vật liệu rời từ trượt đất, ở đây là TĐN khi cuốn trôi theo dòng chảy tạm thời trên lòng khe cạn tới ổn định nền đường gồm mô hình thủy lực trung bình theo chiều sâu, mô hình Herschel–Bulkley, mô hình Voellmy–Salm hay mô hình hai pha, và có tích hợp trên phần mềm sử dụng RAMMS; cơ chế phát sinh TĐN cũng như cơ sở đề xuất giải pháp phòng chống sử dụng lý thuyết cân bằng giới hạn.

CHƯƠNG 3

NGHIÊN CỨU TRƯỢT ĐẤT ĐÁ TRÊN CÁC TUYẾN ĐƯỜNG GIAO THÔNG KHU VỰC MIỀN NÚI TÂY BẮC VÀ ĐẶC ĐIỂM TRƯỢT ĐẤT NÔNG TUYẾN NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH

Kết quả khảo sát và điều tra hiện trạng trượt đất đá trên một số tuyến giao thông MNTB làm cơ sở chọn đối tượng TĐN và tuyến nghiên cứu điển hình được trình bày tại chương 3 này. Cùng với đó, sử dụng công nghệ viễn thám và GIS kết hợp AI lập bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá tuyến nghiên cứu điển hình ĐT128 tại Lai Châu làm cơ sở chọn phân đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ để nghiên cứu chi tiết chuyên sâu về đặc điểm TĐN với ổn định nền đường và các yếu tố điều kiện tự nhiên cụ thể, đặc trưng MNTB Việt Nam.

3.1. Trượt đất đá trên các tuyến đường giao thông khu vực MNTB

3.1.1. Đặc điểm tự nhiên khu vực MNTB

Tây Bắc là vùng miền núi phía tây của miền Bắc Việt Nam, theo Atlat 2024 khu vực này bao gồm các tỉnh Hòa Bình cũ, Sơn La, Điện Biên, Lai Châu, Lào Cai và Yên Bái cũ với tổng diện tích khoảng 5,645 triệu ha.

Tây Bắc là khu vực miền núi cao và hiểm trở nhất nước ta, với 2 dãy núi chính là Hoàng Liên Sơn với đỉnh núi cao như Phan Xi Păng (3143 m), Tả Phìn (3096 m), Pu Song Sung (2985 m), Pu Sam Cap (2540 m) và dãy Sông Mã ở khu vực biên giới phía Tây kéo dài khoảng 500 km, toả rộng cả sang Lào ở Sầm Nưa và có đỉnh cao tới 1800 m. Ngoài ra còn có 2 dãy núi cao ở phần cực Tây Bắc là Phu Đen Đinh với các đỉnh cao trên 2000 m và dãy núi Pu Si Lung với đỉnh cao trên 3000 m. Các núi ở Tây Bắc có điểm chung là sườn tự nhiên thường rất dốc, bị các thung lũng hẹp chia cắt mạnh và rất sâu, biên độ giữa nơi cao và thấp đạt tới hàng ngàn mét.

Về cơ bản, các tỉnh MNTB nằm trong vùng có khí hậu nhiệt đới gió mùa với mùa nóng ẩm dài hơn mùa lạnh khô và có tổng lượng bức xạ đặc trưng cho vùng nhiệt đới khoảng (120-130) kcal/cm^2/năm. Khí hậu khu vực các tỉnh MNTB phân hoá theo địa phương và theo độ cao địa hình (vành đai thẳng đúng). Một số khu vực thuộc miền núi cao có nét của khí hậu ôn đới, vùng đồi núi trung du có khí hậu nhiệt đới gió mùa [21].

Nhìn chung khí hậu ở lãnh thổ khu vực có hai mùa rõ rệt. Mùa đông lạnh thực sự kéo dài (4-5) tháng từ tháng XI đến tháng III năm sau. Nhiệt độ mùa đông thường dưới 15^{0}C, ở khu vực núi cao nhiệt độ có khi xuống tới 0^{0}C. Mùa hạ kéo dài từ khoảng tháng IV đến tháng X với nhiệt độ trung bình (28-30)^{0}C. Ở vùng đồi trung du hay một số khu vực thung lũng nhiệt độ có thể lên tới 35^{0}C hoặc hơn. Khu vực này vào mùa hạ còn bị ảnh hưởng của gió Lào nên có ngày nhiệt độ ban ngày lên tới (40-44)^{0}C, nhưng đêm đến lại khá lạnh, nhiệt

độ tụt xuống, khoảng (15-20)^{0}C. Nhiệt độ trung bình năm (20-30)^{0}C [21].

Khu vực MNTB đặc trưng bởi lượng mưa trung bình năm lớn, phổ biến trong khoảng (2.400–3.000) mm. Vào mùa hè, nhiều nơi xuất hiện các trận mưa lớn đến rất lớn trong thời gian ngắn, gây nguy cơ cao đối với các hiện tượng trượt đất, dòng bùn đá và lũ quét. Thực tế, một số trung tâm mưa lớn như Lai Châu và Điện Biên, tổng lượng mưa năm đạt tới 4.692 mm [21]. Ngoài ra, lượng mưa trong 24 giờ có thể vượt quá 100 mm.

3.1.2. Điều tra hiện trạng trượt đất đá trên một số tuyến đường khu vực MNTB

3.1.2.1. Kết quả điều tra hiện trạng trượt đất đá trên một số tuyến đường khu vực MNTB

Trong nghiên cứu này, lựa chọn một số tuyến QL và ĐT điển hình về địa hình, đặc điểm cấu trúc địa chất, mức độ quan trọng trong giao thông vùng và đặc trưng MNTB để thu thập các dữ liệu hiện trạng trượt đất đá. Phương pháp thu thập dữ liệu được thực hiện bằng mô tả hiện trạng, kết hợp thiết bị GPS cầm tay và máy đo khoảng cách laser nhằm ghi nhận tọa độ chính xác tại các vị trí đặc trưng gồm đỉnh trượt, rìa trượt và chân trượt. Tọa độ tâm khối trượt là cơ sở để xây dựng dữ liệu và được lưu ở hệ VN-2000 kèm theo độ cao địa hình nhằm phục vụ phân tích hình thái khối trượt, nội suy chiều sâu trượt. Các thông số kích thước như chiều dài trượt, chiều rộng, và chiều sâu ước tính được đo bằng thước dây, máy đo laser và đối chiếu với dữ liệu địa hình thực địa (DEM). Điều này cung cấp cái nhìn tổng quan ban đầu về hình thái chung khu vực nghiên cứu [85]. Kết quả điều tra và khảo sát các đợt tháng 3 - 6/2023 các tuyến QL12, QL4H, ĐT128 (Lai Châu); QL4D, QL279 (Lào Cai); QL4G, QL37, QL6 (Sơn La – Hòa Bình) được tóm tắt tại Bảng 3.1 và chi tiết thể hiện phần Phụ lục 1.

Bảng 3.1. Tổng hợp hiện trạng trượt đất đá trên các tuyến đường khu vực MNTB

TT	Tuyến đường	Chiều dài tuyến/ chiều dài đoạn điều tra (km)	Địa danh hành chính	Đặc điểm địa chất	Tổng số điểm trượt (điểm)	Số điểm TĐN với chiều sâu mặt trượt <5 m
1	QL12	195/52	Lai Châu	Cắt qua hệ tầng Cẩm Thủy (P_3ct), hệ tầng Lai Châu ($T_{2-3}lc$), hệ tầng Bản Páp ($D_{1-2}bp$), hệ tầng Nậm Pìa (D_1np).	48	42
2	QL4H	350/40,6	Lai Châu	Cắt qua hệ tầng Lai Châu ($T_{2-3}lc$), hệ tầng Bản Páp ($D_{1-2}bp$), hệ tầng Nậm Cười (S_2-D_1nc), phức hệ Phu Si Lung (γC_1pl), phức hệ Phia Bioc ($\gamma\delta T_3npb$).	101	95

3	ĐT128	90/90	Lai Châu	Cắt qua hệ tầng phụ điệp dưới (K_2yc_1), phụ điệp giữa (K_2yc_2), phụ điệp trên (K_2yc_3), hệ tầng Bản Páp ($D_{1\text{-}2}bp$), hệ tầng Nậm Pìa (D_1np), hệ tầng Viên Nam (T_1vn), hệ tầng Tân Lạc (T_1otl), hệ tầng Bắc Sơn (C-P*bs*), hệ tầng Sinh Vinh (O_3-S*sv*), hệ tầng Bến Khế (ε_2-O*bk*), phân hệ tầng dưới ($T_2a đg_1$), phân hệ tầng trên ($T_2a đg_2$).	294	284
4	QL4G	122/45,6	Sơn La	Cắt qua hệ tầng Sông Mã (ε_2sm), hệ tầng Si Phay ($P_{1\text{-}2}sp$), hệ tầng Nậm Cô - phụ hệ tầng trên (PR_3nc_2), phân hệ tầng dưới ($T_2a đg_1$), phức hệ Núi Nưa (PR_3-PZ_1nn), hệ tầng Cò Nòi (T_1cn).	31	29
5	QL37	139,3/30,5	Sơn La	Cắt qua hệ tầng Sông Mã ((ε_2sm), phân hệ tầng trên (O_3-Ssv_2), hệ tầng Cẩm Thủy (P_3ct), hệ tầng Nậm Cô - phụ hệ tầng dưới (PR_3nc_1), hệ tầng Nậm Cô - phụ hệ tầng trên (PR_3nc_2), hệ tầng Nậm Cô - phụ hệ tầng giữa (PR_3nc_3), phân hệ tầng trên ($T_2a đg_2$).	50	47
6	QL6	212/50,8	Sơn La	Cắt qua hệ tầng phụ điệp dưới (K_2yc_1), phụ điệp giữa (K_2yc_2), hệ tầng Cò Nòi (T_1cn), hệ tầng Pác Ma (T_3cpm), phụ điệp dưới (T_3n-rsb_1), phân hệ tầng dưới ($T_2a đg_1$).	34	26
7	QL4D	160/43,7	Lào Cai	Cắt qua hệ tầng Mia Lé – phụ hệ tầng dưới (D_1ml_1), hệ tầng Mia Lé – phụ hệ tầng trên (D_1ml_2), hệ tầng Chang Pung (ε_3cp_1), hệ tầng Hà Giang - phụ hệ tầng dưới (ε_2hg_1), hệ tầng Hà Giang - phụ hệ tầng giữa (ε_2hg_2)	47	40
8	QL279	944/44	Lào Cai	Cắt qua hệ tầng Ngòi Chi (PR_1nc), hệ tầng Hà Giang - phụ hệ tầng giữa (ε_2hg_2), hệ tầng Thác Bà (PR_3-ε_1tb), hệ tầng Núi Voi Đen (PR_1nv).	38	31

3.1.2.2. Đặc trưng trượt đất đá trên một số tuyến đường khu vực MNTB

Kết quả khảo sát hiện trạng trượt đất đá tại Lai Châu, Sơn La và Lào Cai với chiều dài 397 km, thống kê được 643 điểm trượt các loại (không bao gồm loại hình đá lở, đá rơi) tổng hợp trong Bảng 3.2, Bảng 3.3, Bảng 3.4. Phân tích và thống kê cho thấy, mật độ trượt (số điểm trượt/ 1 km) khác nhau trên các tuyến giao thông nghiên cứu (từ 0,67 trên QL6

đến 3,27 trên ĐT128, xem Hình 3.1), tại các tỉnh khác nhau có giá trị khác nhau (trung bình từ 0,97 với Lào Cai đến 2,23 tại Lai Châu). Tương tự, tỷ lệ điểm TĐN cũng khác nhau trên các tuyến khảo sát (từ 76,5 % trên QL6 đến 96,6% tại ĐT128 xem Hình 3.2), hay tại mỗi tỉnh cũng khác nhau (trung bình tại Lào Cai 83,35% còn Lai Châu 92,73%).

Bảng 3.2. Mật độ trượt và tỷ lệ TĐN một số tuyến giao thông tại Lai Châu

TT	Nội dung	Đơn vị	Lai Châu			Tổng/ trung bình
			ĐT128	QL4H	QL12	
1	Chiều dài tuyến đường	km	90,0	40,6	52,0	182,6
2	Tổng số điểm trượt	điểm	294	101	48	443
3	Số điểm TĐN	điểm	284	95	42	421
4	Số điểm trượt sâu	điểm	10	6	6	22
5	Mật độ trung bình trên 1 km	điểm/km	3,27	2,49	0,92	2,23
6	Tỉ lệ % TĐN	%	96,6	94,1	87,5	92,73
7	Tỉ lệ % các điểm trượt sâu	%	3,4	5,9	12,5	7,27

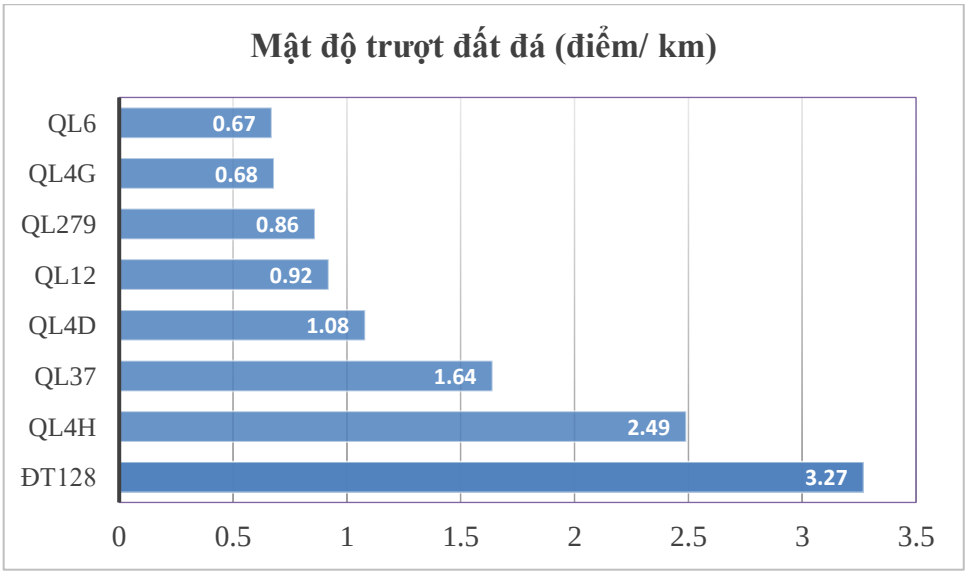
Bảng 3.3. Mật độ trượt và tỷ lệ TĐN một số tuyến giao thông tại Sơn La

TT	Nội dung	Đơn vị	Sơn La			Tổng/ trung bình
			QL4G	QL37	QL6	
1	Chiều dài tuyến đường	km	45,6	30,5	50,8	126,9
2	Tổng số điểm trượt	điểm	31	50	34	115
3	Số điểm TĐN	điểm	29	47	26	102
4	Số điểm trượt sâu	điểm	2	3	8	13
5	Mật độ trung bình trên 1 km	điểm/km	0,68	1,64	0,67	0,99
6	Tỉ lệ % TĐN	%	93,5	94,0	76,5	88,0
7	Tỉ lệ % trượt sâu	%	6,5	6,0	23,5	12,0

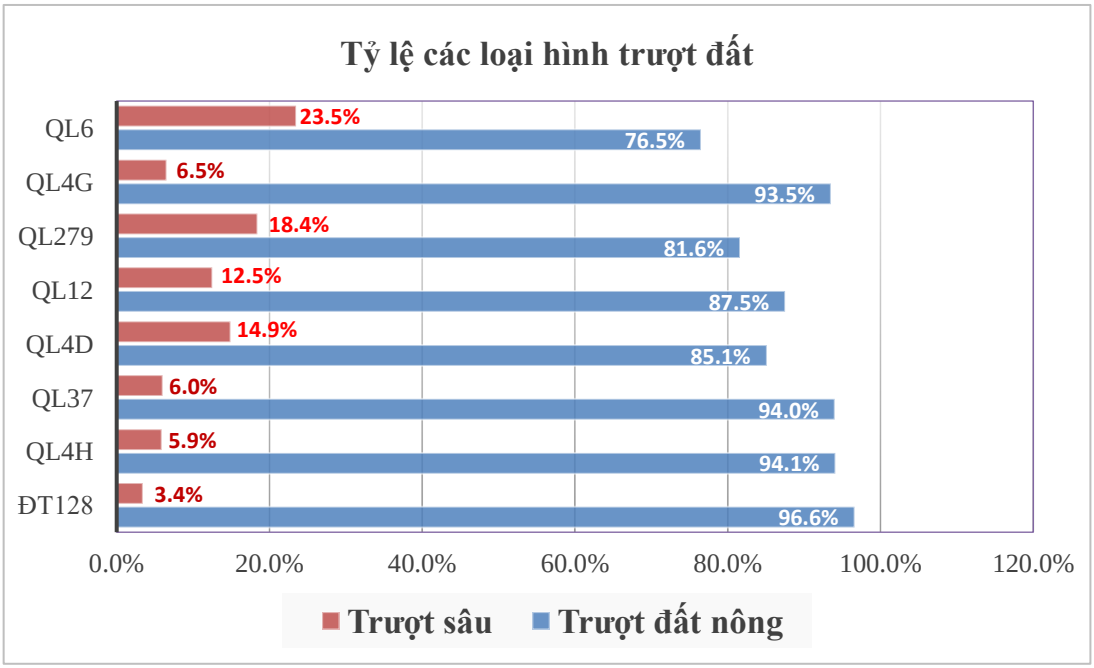
Bảng 3.4. Mật độ trượt và tỷ lệ TĐN một số tuyến giao thông tại Lào Cai

TT	Nội dung	Đơn vị	Lào Cai		Tổng/ trung bình
			QL279	QL4D	
1	Chiều dài tuyến đường	km	44,0	43,7	87,7
2	Tổng số điểm trượt	điểm	38	47	85
3	Số điểm TĐN	điểm	31	40	71
4	Số điểm trượt sâu	điểm	7	7	14
5	Mật độ trung bình trên 1 km	điểm/km	0,86	1,08	0,97
6	Tỉ lệ % TĐN	%	81,6	85,1	83,35
7	Tỉ lệ % trượt sâu	%	18,4	14,9	16,65

Kết quả thống kê cho thấy TĐN trên các tuyến đường GTMN điều tra chiếm phần chủ yếu, thấp nhất 83,35% (tại Lào Cai), cao nhất 92,73% (Lai Châu). Tại tỉnh Lai Châu thì tuyến ĐT128 có tỷ lệ TĐN cao nhất 96,6% và mật độ trượt cũng cao nhất 3,27 điểm/km.



Hình 3.1. Mật độ trượt một số tuyến khu vực MNTB



Hình 3.2. Tỷ lệ các loại hình trượt đất một số tuyến khu vực MNTB

3.1.2.3. Đặc điểm địa chất các tuyến đường khu vực MNTB

Trên phương diện thành tạo địa chất, kết quả tổng hợp từ các tuyến đường tại tỉnh Lai Châu, Sơn La và Lào Cai cho thấy, số lượng điểm trượt và loại hình trượt đất có sự phân hóa rõ rệt giữa các đơn vị Hệ tầng địa chất. Điều này phản ánh vai trò chi phối của loại đá (thành phần thạch học, mức độ phong hóa) và cấu trúc kiến tạo đối với thực tế hiện trạng trượt trên các tuyến đường này.

Tại tỉnh Lai Châu, tuyến ĐT128 có hệ tầng Sinh Vinh (O_3-S*sv*) là một trong số 12 đơn vị địa tầng điển hình có thành phần thạch học gồm các đá phiến sericit xen kẹp quarzit, đá vôi, đá vôi đolomit và đá vôi sét chiếm ưu thế với 103/294 điểm trượt. Trên QL4H, hệ

tầng Nậm Cười (S_2-D_1nc) đại diện trong số 5 đơn vị địa tầng trên tuyến có thành phần chủ yếu là đá phiến sét, đá phiến sét bị sericit hóa, xen cát kết, cát kết dạng quarzit, đá vôi và sét vôi, là nền địa chất đặc trưng với 61/101 điểm trượt. Với QL12 được khảo sát, hệ tầng Cẩm Thủy (P_3ct) đại diện trong số 5 đơn vị địa tầng có thành phần chủ yếu gồm đá bazan, bazan hạnh nhân và tuf của chúng, ghi nhận 26/48 điểm điểm trượt.

Địa bàn Sơn La, tuyến QL4G, hệ tầng Nậm Cô (PR_3nc_2) phụ hệ tầng trên là 1 trong số 7 đơn vị địa tầng có mặt trên đoạn tuyến, có thành phần gồm các đá phiến thạch anh-sericit, đá phiến sericit có granat xen quarzit sericit, với 16/31 điểm TĐN. Trên QL37, hệ tầng Sông Mã phụ giới trên (ε_2sm) và hệ tầng Nậm Cô phụ hệ tầng trên (PR_3nc_2) là 2 trong số 7 đơn vị địa tầng chủ yếu, với thành phần gồm các đá cuội kết, đá phiến sét-sericit, đá phiến sét-sericit-clorit, cát kết, bột kết, đá vôi, sét vôi và đá phiến thạch anh-sericit; đá phiến sericit có granat xen quarzit sericit với tổng cộng 25/50 điểm trượt. Riêng QL6, các điểm TĐN chủ yếu trong hệ tầng Cò Nòi phụ điệp dưới (T_1cn) là 1 trong số 6 địa tầng có thành phần gồm đá cát bột kết, đá phiến sét và đá vôi sét, ghi nhận 27/34 điểm trượt.

Tại Lai Châu, mặc dù chiều dài tuyến đường được khảo sát và điều tra trên địa bàn còn hạn chế, có thể chưa phản ảnh hết tính đặc trưng cho toàn tỉnh, nhưng cũng thể hiện được một số đặc điểm chính. Chẳng hạn trên QL4D đoạn thành phố Lào Cai – Sa Pa, thành tạo hệ tầng Mia Lé phụ hệ tầng trên với thành phần gồm đá phiến thạch anh sericit, đá phiến sét sericit, phiến sét silic xen lớp mỏng phiến sét vôi (D_1ml_2) và hệ tầng Chang Pung phụ hệ tầng dưới - đá phiến sét, sét vôi, đá vôi trứng cá (ε_3cp_1) là 2 trong số 5 đơn vị địa tầng có mặt trên đoạn tuyến đã khảo sát, tổng số điểm trượt ghi nhận 27/47 điểm. Trong khi đó, tại QL279 đoạn thuộc tỉnh Lào Cai, hệ tầng Đệ Tứ - gồm cuội, sạn, cát, sét (eQ, apQ), hệ tầng Ngòi Chi - đá phiến gneis biotit-silimanit-granat, quarzit, thấu kính amphibolit (PR_1nc) và hệ tầng Hà Giang phụ hệ tầng giữa – đặc trưng bởi đá trầm tích lục nguyên xen carbonat, đá phiến thạch anh mica, phiến sét, phiến sét sericit xen đá vôi, đá vôi bị phong hóa, đá vôi đolomit (ε_2hg_2) là 3 trong số 6 đơn vị địa tầng có mặt trên đoạn tuyến, ghi nhận số điểm TĐN tổng cộng 25/38 điểm trượt.

Mặc dù các tuyến đường khảo sát ở mỗi khu vực có các thành tạo hệ tầng riêng biệt, nhưng khi tổng hợp tất cả các hệ tầng ghi nhận số lượng điểm trượt nhiều nhất, có thể nhận thấy ba đặc điểm địa chất, thạch học chung trên các tuyến giao thông MNTB:

- Sự xuất hiện nhiều của đá phiến có cấu tạo phân phiến mạnh, như đá phiến sericit, đá phiến sét và đá phiến thạch anh-sericit. Các loại đá này xuất hiện trong hệ tầng chủ đạo: Sinh Vinh và Nậm Cười (Lai Châu), Nậm Cô (Sơn La), Mia Lé và Chang Pung (Lào Cai).

- Sự xen kẹp giữa các lớp đá cứng (quarzit, đá vôi, cuội kết) và các lớp vật liệu mềm

hơn (phiến sét, sét vôi, bột kết). Các hệ tầng điển hình như Sinh Vinh (Lai Châu), Sông Mã (Sơn La) và Hà Giang (Lào Cai) đều biểu hiện đặc trưng này.

- Yếu tố quan trọng khác có tính chất đặc thù của vùng Tây Bắc là mức độ phong hóa sâu của các loại đá magma (bazan, tuf), đá biến chất bị nghiền dập bởi hoạt động kiến tạo, và các trầm tích Đệ Tứ rời rạc. Hệ tầng Cẩm Thủy (bazan hạnh nhân và tuf) tại Lai Châu và các trầm tích Đệ Tứ tại Lào Cai là ví dụ tiêu biểu trong phạm vi đã khảo sát nhiên cứu.

Từ các phân tích trên có thể khẳng định rằng, dù thành phần thạch học cụ thể giữa các hệ tầng khác nhau, song các cơ chế địa kỹ thuật chi phối trượt đất đá lại có tính thống nhất cao. Các yếu tố quyết định bao gồm: thành phần thạch học và sự phân phiến mạnh; sự xen kẹp địa chất giữa lớp cứng, mềm giữa các thể địa chất nguồn gốc khác nhau; mức độ phong hóa và bề dày tầng phủ phong hóa. Các yếu tố này đều là đặc trưng cấu trúc vật liệu điển hình của khu vực MNTB, đặc biệt gần với ĐT128.

3.1.2.4. Tuyến nghiên cứu điển hình khu vực MNTB

Tuyến ĐT128, tỉnh Lai Châu nằm trong vùng có đặc điểm địa hình đặc trưng của khu vực MNTB với độ dốc lớn $(30\text{-}45)^0$, độ cao trên 900 m, địa hình phân cắt sâu dạng sườn núi bám theo thung lũng. ĐT128 thuộc miền kiến tạo hoạt động mạnh nhất Tây Bắc, thuộc khu vực Tam Đường – Sìn Hồ nằm gần đới đứt gãy Lai Châu – Điện Biên, tạo nên các tập hợp khe nứt dày đặc, các khối đá nghiền nát dập vỡ và mức độ phong hóa mạnh với bề dày tầng phủ sâu. Hệ tầng Sinh Vinh trên ĐT128 có đặc trưng thạch học cấu tạo đá phân phiến mạnh, xen kẹp giữa đá phiến, đá vôi, đá vôi sét tương đồng lớn với các hệ tầng gây trượt chủ đạo tại các tỉnh MNTB. Mật độ trượt đất cao, với 294 điểm trượt, trong đó có 284 điểm TĐN chiếm tỷ lệ 96,6% cho thấy tuyến ĐT128 là một tuyến nghiên cứu điển hình phù hợp và có tính đại diện cao đối với điều kiện trượt đất tại các tỉnh MNTB.

3.2. Nghiên cứu phân vùng nguy cơ trượt đất đá dọc tuyến ĐT128 tỉnh Lai Châu bằng phương pháp trí tuệ nhân tạo

3.2.1. Điều kiện tự nhiên khu vực nghiên cứu

3.2.1.1. Đặc điểm địa hình, địa mạo

Tỉnh Lai Châu nằm trong vùng địa hình núi từ trung bình đến núi cao, với đặc trưng địa hình phân cách mạnh. Phía tây là dãy Sông Mã, phía đông là dãy Hoàng Liên Sơn và giữa hai dãy núi này là hệ thống thung lũng sâu, hẹp cùng các sống núi kéo dài chủ yếu theo hướng Tây Bắc - Đông Nam. Phân bố độ cao địa hình cho thấy: khu vực có độ cao trên 2000 m chiếm khoảng 10% diện tích; vùng cao từ (1000-2000) m chiếm 50%; vùng trung bình từ (500-1000) m chiếm 30% và vùng thấp dưới 500 m chỉ chiếm 10% [10].

Tuyến ĐT128 đi qua khu vực địa hình núi cao, hiểm trở, nhiều dốc lớn đặc trưng của MNTB, với độ cao thay đổi liên tục 300 m đến 2000 m. Địa hình bị phân cắt sâu, sườn dốc lớn, nhiều đoạn có độ dốc địa hình phổ biến $>30^0$, gây khó khăn lớn cho giao thông. Tuyến có hướng kéo dài chủ yếu Tây Bắc – Đông Nam, bám theo triền núi tự nhiên.

Theo phân loại địa mạo, tỉnh Lai Châu gồm hai nhóm chính: địa hình có nguồn gốc xâm thực - bóc mòn, rửa lũa; địa hình nguồn gốc tích tụ dòng chảy, phân bố chủ yếu tại các thung lũng, suối và bãi bồi [10].

- Nhóm địa hình nguồn gốc xâm thực - bóc mòn, rửa lũa: phát triển chủ yếu tại các dãy núi cao như Hoàng Liên Sơn, Phu Đen Đinh, Pu Si Lung, Hà Tao San, ... Độ cao phổ biến từ 700 m đến >2500 m. Các dải địa hình cao (>2500 m) tập trung ở dãy Hoàng Liên Sơn phân bố khu vực đỉnh Phan Xi Păng, Pu Kho Luông, Hà Tao San, Pu Si Lung, Phu Đen Đinh. Dải địa hình (2000-2500) m và (1600-2000) m xuất hiện trên các nhánh núi lớn thuộc khu vực Mường Tè, Phong Thổ, Tân Uyên, Tam Đường, Than Uyên. Dải (1000-1600) m và (700-1000) m ở đỉnh núi trung bình ở Mường Tè, Phong Thổ, Nậm Nhùn, Tân Uyên. Các khu vực này chịu chi phối bởi quá trình rửa trôi bề mặt, xói mòn tạo khe rãnh. Bề mặt pediment thung lũng phân bố ở độ cao (300-700) m dọc Sông Đà và các suối Nậm Na, Nậm Mu… đặc trưng bởi địa hình thoải và hệ thống khe rãnh xâm thực phát triển.

- Nhóm địa hình nguồn gốc dòng chảy tích tụ: Gồm các máng tích tụ lũ tích – tàn tích hình thành tại chân sườn và thung lũng. Đây là khu vực tích tụ sản phẩm từ lũ quét và dòng bùn đá. Vật liệu tích tụ chủ yếu là đá tảng, cuội, dăm, sét và cát, có chiều dày dao động từ (0,5-10) m. Bề mặt thường xuyên bị xâm thực tiếp tục bởi dòng chảy và chịu tác động mạnh từ lũ ống, lũ quét và ngập lụt. Các thềm bãi bồi tích – lũ tích phân bố hẹp dọc các dòng như Sông Đà, Nậm Na, Nậm Mạ, Nậm Mu, có độ cao tương đối từ (0,5-8) m.

3.2.1.2. Đặc điểm địa chất dọc tuyến

Tỉnh Lai Châu nằm trong phạm vi các đới cấu trúc Phan Xi Păng, Mường Tè, Sông Đà và Sông Mã, thuộc miền kiến tạo Tây Bắc Bộ. Khu vực nghiên cứu phân bố trên 43 phân vị địa chất với tuổi trải dài từ Proterozoi muộn đến Đệ Tứ, bao gồm các thành tạo trầm tích, magma và biến chất [10]. Trong đó các đá trầm tích lục nguyên và lục nguyên - carbonat chiếm ưu thế, với thành phần thạch học chủ yếu gồm cát kết, bột kết, đá phiến sét, sét vôi, xen đá vôi. Các thành tạo này thuộc các hệ tầng như Sông Mã, Tây Trang, Pa Hằm, Bản Páp, Nậm Pìa, Cò Nòi, Bắc Sơn, Permi, Tân Lạc, Mường Trai, Đồng Giao, Nậm Pô, Suối Bàng và Yên Châu, có tuổi từ Cambri đến Creta. Chiều dày thay đổi từ (300-

1200) m, trong đó một số hệ tầng Bắc Sơn, Bản Páp và Đồng Giao chứa tỷ lệ đá vôi cao, tạo thành các khối núi đá vôi quy mô lớn, đặc trưng ở khu vực Sìn Hồ và gần Tam Đường.

Dọc tuyến ĐT128 thuộc phạm vi nghiên cứu, có các phân vị địa tầng chính sau:

- Hệ tầng Bến Khế (ε_2-O*bk*): Phân bố thành dải lớn từ phía bắc bản Chiềng Chăn kéo dài xuống phía nam huyện Sìn Hồ, lộ rõ dọc sông Đà từ khu vực hang Tôm đến gần cửa Nậm Mu. Thành phần gồm đá phiến màu đen bị ép phiến, chuyển tiếp lên là cát kết, quarzit xen với đá phiến màu xám đen, xám lục. Bề dày khoảng (350-450) m. Các thành tạo trầm tích này không chỉnh hợp dưới hệ tầng Sinh Vinh và tương ứng với mặt cắt chuẩn của hệ tầng Bến Khế.

- Hệ tầng Sinh Vinh (O_3-S*sv*): Phân bố bao quanh các dải nếp lồi chứa trầm tích hệ tầng Bến Khế, hình thành hai dải kéo dài từ phía bắc Chiềng Chăn đến nam huyện Sìn Hồ. Mở đầu bằng lớp sạn kết, đôi chỗ xuất hiện thấu kính cuội kết với thành phần chủ yếu là thạch anh mài tròn, xi măng dạng cát kết gắn kết tốt, tiếp theo là đá vôi. Bề dày ước tính từ (500-550) m.

- Hệ tầng Bó Hiềng (S_2-D_1*bh*): Tương ứng với tập đá phiến sericit và sét vôi nằm ở phần thấp của phụ hệ tầng trên hệ tầng Pa Ham [10]. Chúng phân bố không nhiều ở phía đông Xá Phìn (huyện Sìn Hồ) thành 1 dải hẹp, tiếp giáp hệ tầng Sinh Vinh. Thành phần chủ yếu gồm đá phiến sericit, đá phiến sét vôi, xen lớp đá vôi mỏng chứa hóa thạch Rrtziella weberi, Howellella sp, tuổi Silur muộn. Bề dày hệ tầng khoảng 400 m.

- Hệ tầng Nậm Pìa *(*D_1*np)*: Thiết lập từ mặt cắt điển hình Đevon hạ tại khu vực Nậm Pìa [10]. Hệ tầng này phân bố thành dải liên tục phía nam huyện Sìn Hồ, ngoài ra còn gặp rải rác ở bắc Phong Thổ và một số khu vực khác. Bề dày hệ tầng dao động từ (406-440) m.

- Hệ tầng Yên Châu *(*K_2*yc*): Phân bố thành một dải lớn kéo dài theo phương Tây Bắc – Đông Nam, dọc theo đường chia nước của dãy núi Pu Sam Cáp, từ khu vực biên giới Việt - Trung đến phía tây huyện Than Uyên. Bề dày trung bình hệ tầng (350-500) m.

Khu vực nghiên cứu có đặc điểm kiến tạo phức tạp, thể hiện rõ qua sự phát triển của các đới đứt gãy sâu có phương chủ đạo Tây Bắc - Đông Nam. Các hoạt động kiến tạo này làm đất đá bị dập vỡ, phong hóa mạnh, hình thành các đới yếu rộng hàng trăm mét. Bốn hệ thống đứt gãy chính chi phối cấu trúc địa chất – địa hình bao gồm: Điện Biên - Lai Châu, Sông Đà, Bình Lư - Than Uyên và Ma Lù Thàng - Nậm Mạ - Quỳnh Nhai, chúng có vai trò quyết định "bức tranh" hiện trạng cấu trúc địa hình và địa chất của vùng [10]. Ngoài ra

còn có các đứt gãy á kinh tuyến trẻ hơn cũng góp phần làm phức tạp thêm cấu trúc kiến tạo khu vực. Dọc theo các đới này, đá bị cà nát dập vỡ mạnh, nhiều mặt trượt đứt gãy có độ dốc lớn đến gần như thẳng đứng. Về mặt địa hình, hai bên sườn một số khu vực còn lưu giữ dấu tích khối trượt cổ, thể hiện qua địa hình sườn dốc lớn và bị chia cắt mạnh.

Bên cạnh các hệ thống đứt gãy chính, khu vực nghiên cứu còn tồn tại nhiều đứt gãy quy mô nhỏ hơn, đặc biệt tại các vị trí giao cắt với đứt gãy Sông Đà, thường tạo ra các đới đá bị vò nhàu, dập vỡ và dịch chuyển mạnh, đi kèm biểu hiện trượt đất đá. Căn cứ vào đặc điểm thạch học, cấu tạo, các chỉ tiêu cơ lý và chiều dày tầng phong hóa, khu vực được phân thành 33 phức hệ địa chất công trình. Các phức hệ này được phân nhóm theo mức độ ổn định thành 4 cấp [10]:

- *Nhóm đá có mức độ ổn định trung bình đến ổn định:* Gồm 14 phân vị, chủ yếu là các thành tạo lục nguyên và carbonat thuộc hệ tầng Pắc Ma (T_3cpm), Đồng Giao ($T_2a\text{đ}g$), Nậm Thẳm (T_2lnt), Cò Nòi (T_1cn), Tân Lạc (T_1otl), Na Vang (P_2nv), Sy Phay ($P_{1\text{-}2}sp$), Bắc Sơn (C-Pbs), Đá Mài (C-P$\text{đ}m$), Nậm Pìa (D_1np), Bản Páp (D_1bp), Sinh Vinh (O_3-Ssv), Sin Quyền ($PR_{1\text{-}2}sq$) cùng với các thành tạo magma.

- *Nhóm đá có mức độ ổn định trung bình:* Gồm 8 phân vị, bao gồm các hệ tầng có thành phần lục nguyên, phun trào hoặc carbonat như hệ tầng Mường Trai (T_2lmt), Viên Nam (T_1vn), Cẩm Thủy (P_3ct), Bản Nguồn (D_1bn), Bó Hiềng (S_2-D_1bh), Bến Khế (ε_2-Obk), Suối Chiềng (PPsc) và Nậm Cô (NPnc).

- *Nhóm đá kém ổn định đến trung bình:* Gồm 10 phân vị, là các thành tạo trầm tích thuộc các hệ tầng Pu Tra, Yên Châu (K_2yc), Nậm Ma (Knm), Nậm Pô ($J_{1\text{-}2}np$), Suối Bé (J_3-K_1sb), Suối Bàng (T_3n-rsb), Nậm Mu (T_3cnm), Lai Châu ($T_{2\text{-}3}lc$), Sông Đà ($P_{1\text{-}2}s\text{đ}$) và Nậm Cười (S_2-D_1nc).

- *Nhóm kém ổn định:* Gồm 1 phân vị duy nhất là các trầm tích rời rạc thuộc hệ Đệ Tứ (Q), thường có tính chất cơ lý yếu và dễ bị tác động bởi điều kiện môi trường bên ngoài.

3.2.1.3. Đặc điểm thạch học, vỏ phong hóa

Trên địa bàn tỉnh Lai Châu phân bố 34 phân vị địa tầng, 9 phức hệ magma, phản ánh cấu trúc địa chất đa dạng và phức tạp của khu vực. Căn cứ theo thành phần thạch học chủ yếu, các thành tạo địa chất tại đây được phân chia thành các nhóm chính sau: Nhóm đá bở rời; nhóm đá trầm tích lục nguyên giàu alumosilicat; nhóm đá carbonat; nhóm đá biến chất giàu alumosilicat; nhóm đá biến chất và trầm tích lục nguyên giàu thạch anh; nhóm đá phun trào axit-trung tính và tuf của chúng; nhóm đá phun trào mafic và tuf của chúng; nhóm đá xâm nhập axit - trung tính; nhóm đá xâm nhập mafic-siêu mafic [10].

Dọc tuyến ĐT128 điều kiện địa chất biểu hiện tính chất phức tạp với thành phần đá đa dạng và mức độ phong hóa không đồng đều. Nhiều khu vực địa hình có độ dốc lớn, bị chi phối bởi quá trình xâm thực mạnh, dẫn đến bào mòn trơ đá gốc tại bề mặt. Tuy nhiên, ở các khu vực dọc theo đới đứt gãy, hoặc nơi phân bố đá có thành phần hạt mịn và đá magma phun trào, vỏ phong hóa phát triển dày, cấu trúc rời rạc, dễ mất ổn định. Vỏ phong hóa phát triển với đặc điểm và chiều dày khác nhau, phụ thuộc vào thành phần thạch học và mức độ nứt nẻ của từng hệ tầng địa chất:

- *Hệ tầng Bến Khế* (e_2-O*bk*): Thành phần chính là đá biến chất và trầm tích lục nguyên giàu thạch anh. Vỏ phong hóa phổ biến thuộc đới phong hóa hoàn toàn đến mạnh, chiều dày (0-15) m, phủ trên trên đá gốc phong hóa yếu. Vật liệu phong hóa chủ yếu là hỗn hợp gồm cát, sạn, sét, bột và vụn đá gốc;

- *Hệ tầng Nậm Cười* (S_2-D_1*nc*): Gồm đá phiến sét, phiến silic – sericit hóa, là loại đá biến chất giàu alumosilicat. Vỏ phong hóa phát triển mạnh, có nơi gần như hoàn toàn, cấu trúc rời rạc, mềm bở. Thành phần phong hóa gồm sét, bột, dăm sạn và các mảnh vụn đá gốc, chiều dày trung bình khoảng 8 m, cục bộ có thể vượt 50 m tại các vùng đới đứt gãy.

- *Hệ tầng Bó Hiềng* (S_2-D_1*bh*): Đại diện cho nhóm đá trầm tích carbonat (đá vôi, sét vôi). Vỏ phong hóa phân bố dạng dải dọc theo phương Tây Bắc – Đông Nam, thành phần chủ yếu là đất sét có lẫn mùn hữu cơ, đôi chỗ trộn vụn đá vôi. Chiều dày trung bình vỏ phong hóa khoảng 5 m.

- *Hệ tầng Nậm Pìa (*D_1*np) và Sinh Vinh* (O_3 - S*sv*): Chủ yếu là đá trầm tích lục nguyên giàu alumosilicat, phân bố khá rộng tại khu vực nghiên cứu. Vỏ phong hóa có thành phần hỗn hợp gồm sét, bột, cát xen lẫn sỏi sạn và cuội tảng, chiều dày trung bình khoảng 5 m, phát triển mạnh tại các taluy tự nhiên có độ dốc lớn hoặc khu vực cắt qua đới đứt gãy.

3.2.1.4. Đặc điểm khí hậu, thủy văn

Xung quanh khu vực nghiên cứu có ba trạm khí tượng thủy văn chính gồm Trạm Sìn Hồ, Trạm Lai Châu, Trạm Nậm Giàng, ngoài ra còn có thể tham khảo dữ liệu mưa từ nguồn viễn thám Nasa Power (IMERG – GPM) với độ phủ thời gian – không gian rộng. Tuy nhiên, thực tế cho thấy không phải mọi số liệu mưa từ các trạm hoặc nguồn vệ tinh đều phản ánh chính xác hoặc đồng bộ với thời điểm xảy ra các sự kiện trượt đất đá trong khu vực. Dựa vào số liệu mưa của các trạm đo được thu thập, kết hợp các dữ liệu tổng hợp có thể mô tả tóm tắt đặc điểm khí hậu, thủy văn khu vực nghiên cứu như sau:

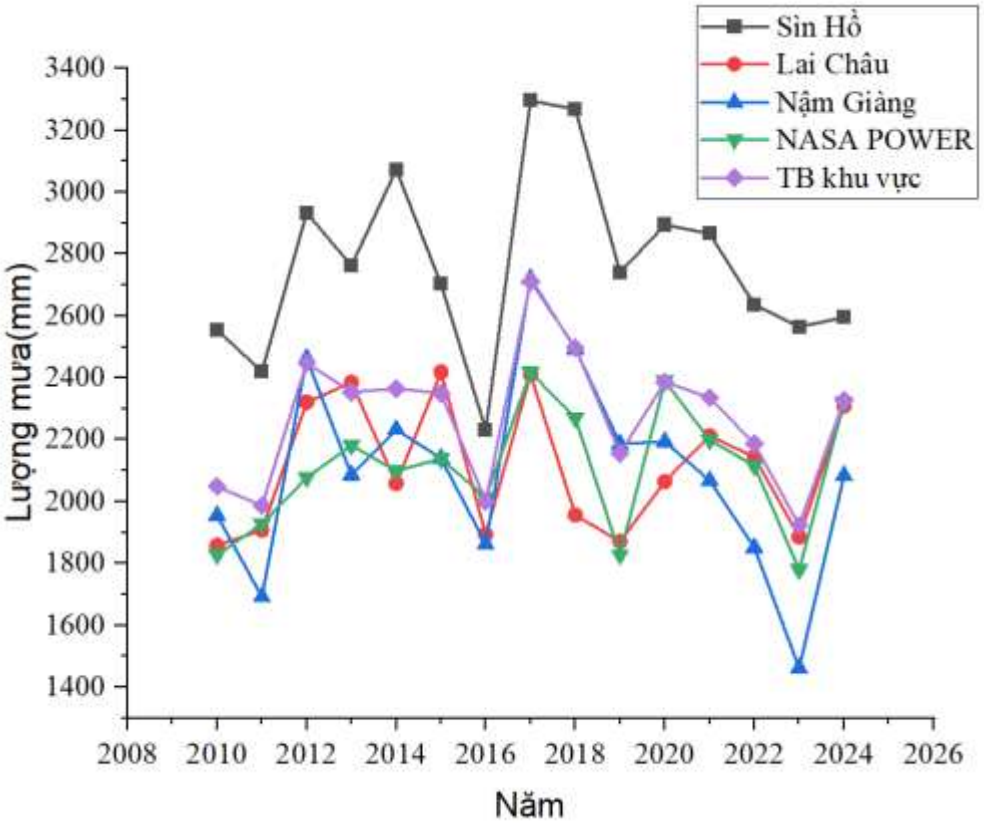
- Khu vực nghiên cứu thuộc vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa, đặc trưng hai mùa rõ

rệt: mùa đông lạnh kéo dài từ tháng XI đến tháng III năm sau, với nhiệt độ phổ biến dưới 15^0C, thậm chí xuống tới 0^0C ở vùng núi cao; mùa hè kéo dài từ khoảng tháng IV đến tháng X, với nhiệt độ trung bình (28- 30)^{0}C.

- Lượng mưa khu vực nghiên cứu lớn, trung bình nhiều năm (2010-2024) tại tất cả các trạm đạt 2271,8 mm/năm. Trong đó, trạm Sìn Hồ ghi nhận lượng mưa giá trị cao nhất, còn trạm Nậm Giàng có lượng mưa thấp nhất. Đáng chú ý, tại trạm Sìn Hồ, các năm 2017 và 2018 ghi nhận lượng mưa tăng đột biến khoảng 18% so với trung bình giai đoạn (2010–2024) (Bảng 3.5, Hình 3.3).

Bảng 3.5. Lượng mưa trung bình năm (mm) giai đoạn 2010 – 2024 (Nguồn: Tổng hợp từ số liệu của Đài khí tượng Thủy văn tỉnh Lai Châu và IMERG – GPM)

Trạm đo / Năm	Sìn Hồ	Lai Châu	Nậm Giàng	Nasa Power	TB khu vực
2010	2554,2	1857,8	1954,7	1828,4	2048,78
2011	2420,2	1907,7	1692,1	1927,7	1986,93
2012	2933,0	2320,7	2463,1	2077,9	2448,68
2013	2762,6	2384,9	2086,0	2181,3	2353,70
2014	3072,6	2058,1	2233,2	2099,0	2365,73
2015	2702,2	2418,4	2139,6	2138,7	2349,73
2016	2232,5	1893,8	1863,0	2013,0	2000,58
2017	3295,2	2410,9	2720,6	2418,3	2711,25
2018	3268,1	1956,9	2493,3	2270,0	2497,08
2019	2740,2	1870,3	2186,3	1827,5	2156,08
2020	2894,4	2064,8	2193,6	2389,8	2385,65
2021	2865,1	2211,9	2068,0	2199,3	2336,08
2022	2636,2	2143,9	1851,7	2115,3	2186,78
2023	2564,9	1886,1	1462,4	1779,6	1923,25
2024	2595,0	2308,7	2083,9	2320,5	2327,03
Trung bình	**2769,0**	**2113,0**	**2099,5**	**2105,8**	**2271,8**

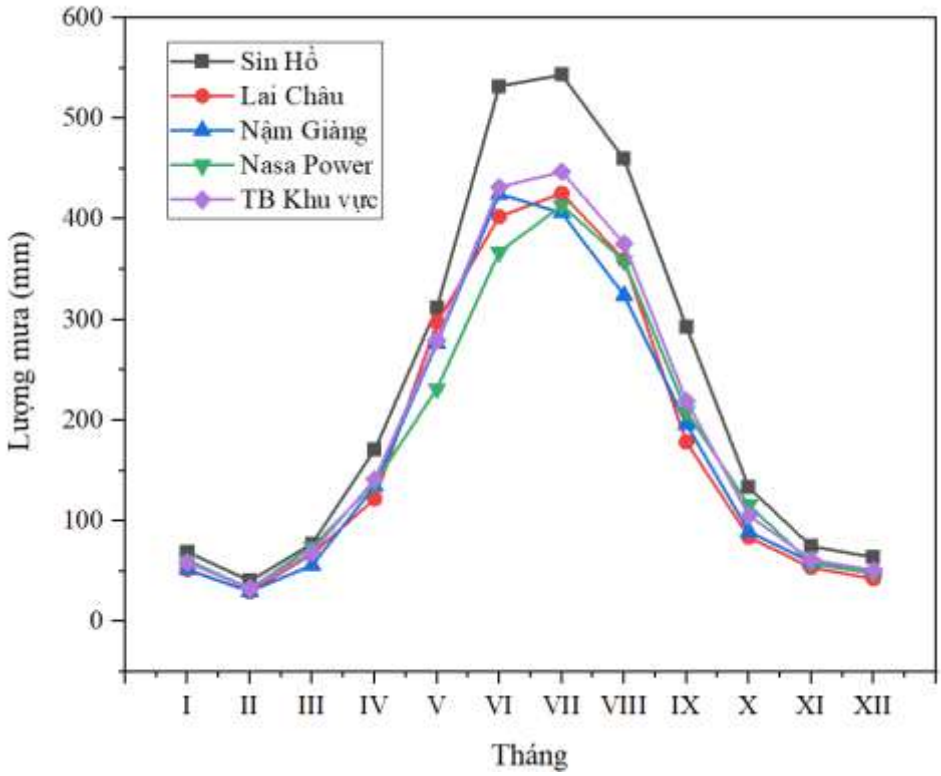


Hình 3.3. Biểu đồ lượng mưa trung bình năm giai đoạn 2010-2024

- Khu vực nghiên cứu có chế độ mưa phân hóa rõ rệt theo mùa: mùa mưa từ tháng V đến tháng IX, mùa khô từ tháng X đến tháng IV (Bảng 3.6, Hình 3.4). Trong mùa mưa lượng mưa chiếm khoảng 77% tổng lượng mưa năm, với giá trị cao nhất ghi nhận tại trạm Sìn Hồ tới 2.140,6 mm. Các tháng có đỉnh mưa lớn là tháng VI (431,7 mm) và tháng VII (447,2 mm). Ngược lại, mùa khô lượng mưa rất thấp, nhiều tháng chỉ dưới 70 mm.

Bảng 3.6. Lượng mưa trung bình tháng (mm) giai đoạn 2010 – 2024 (Nguồn: Tổng hợp từ số liệu của Đài khí tượng Thủy văn tỉnh Lai Châu và IMERG – GPM)

Tháng / Trạm đo	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Sìn Hồ	69,0	40,3	77,2	170,6	312,3	532,2	543,3	459,6	293,2	133,0	74,7	63,6
Lai Châu	51,8	29,6	67,0	122,0	297,2	402,4	425,6	359,4	178,5	83,7	53,5	42,3
Nậm Giàng	51,3	30,1	55,9	134,7	277,1	425,0	406,2	324,3	196,2	89,3	59,1	50,2
Nasa Power	61,0	32,7	74,0	137,7	231,5	367,2	413,6	358,5	208,8	115,6	57,7	47,4
TB Khu vực	**58,3**	**33,2**	**68,5**	**141,3**	**279,5**	**431,7**	**447,2**	**375,5**	**219,2**	**105,4**	**61,3**	**50,9**



Hình 3.4. Biểu đồ lượng mưa trung bình tháng giai đoạn 2010-2024

Hệ thống mạng lưới sông suối và khe cạn quanh tuyến ĐT128 phân bố dày đặc, phần lớn có quy mô nhỏ, hẹp nhưng độ dốc lớn. Các sông chính gồm Sông Đà, sông Nậm Na và sông Nậm Mu, đóng vai trò thoát nước chủ đạo trong khu vực. Vào mùa mưa, nguồn nước mặt dồi dào, trong khi mùa khô thường khan hiếm. Đặc biệt, với hệ thống lưu vực lớn, nhiều khe cạn đặc trưng dốc và dài thường tạo dòng tạm thời với lưu lượng nước cũng như cường độ chảy mạnh, đặc trưng khu vực Lai Châu hay MNTB.

3.2.1.5. Thảm thực vật

Thảm thực vật xung quanh khu vực dọc tuyến ĐT128 chịu ảnh hưởng của khí hậu nhiệt đới gió mùa, kết hợp với địa hình chia cắt phức tạp, tạo tính đặc trưng riêng:

- Diện tích rừng tự nhiên chiếm phần lớn khu vực, có một số loài cây gỗ lớn (dẻ, lim, thông, pơ mu), cây gỗ tạp và tầng cây bụi. Một số nơi có rừng phòng hộ, phân bố chủ yếu tại các khu vực đầu nguồn, có vai trò bảo vệ đất và chống xói mòn;

- Đất trống, đồi trọc tập trung chủ yếu ở những nơi có hoạt động canh tác nương rẫy, hoặc khai thác gỗ trước đây khá phổ biến khu vực nghiên cứu.

- Thảm cỏ và cây bụi tập trung phổ biến ở các khu vực đất bị thoái hóa.

- Cây trồng nông nghiệp chủ yếu gần các khu vực dân cư dọc tuyến đường hay nơi có thổ nhưỡng phù hợp như lúa nước, ngô, sắn, chè. Ở vùng cao, một số nơi có trồng cây dược liệu hoặc cây ăn quả như mận, đào.

- Tác động của con người như các hoạt động khai thác tài nguyên, xây dựng hạ tầng giao thông,… và canh tác nông nghiệp đã làm giảm diện tích rừng tự nhiên, thay thế bằng các loại cây trồng hoặc đất trống.

3.2.2. Cơ sở dữ liệu sử dụng phân vùng nguy cơ trượt đất đá dọc tuyến nghiên cứu điển hình

3.2.2.1. Hiện trạng trượt đất đá trên tuyến ĐT128

Dữ liệu trượt đất đá được thu thập từ các nguồn khác nhau và thông quá các đợt điều tra khảo sát. Phạm vi điều tra khảo sát xác định theo dải rộng 500 m dọc tuyến ĐT128, vừa đảm bảo tính đại diện và độ tin cậy trong việc ghi nhận đầy đủ các điểm trượt và đặc điểm đi kèm, vừa phù hợp với khả năng triển khai thực tế trong điều kiện địa hình miền núi phức tạp.

Hiện trạng trượt đất đá dọc tuyến ĐT128 đã được khảo sát từ tháng 3 đến tháng 6 năm 2023, kết hợp với dữ liệu thu thập từ cơ quan quản lý giao thông tỉnh Lai Châu trong các năm trước, đồng thời tiếp tục bổ sung qua các đợt khảo sát năm 2024 và 2025.

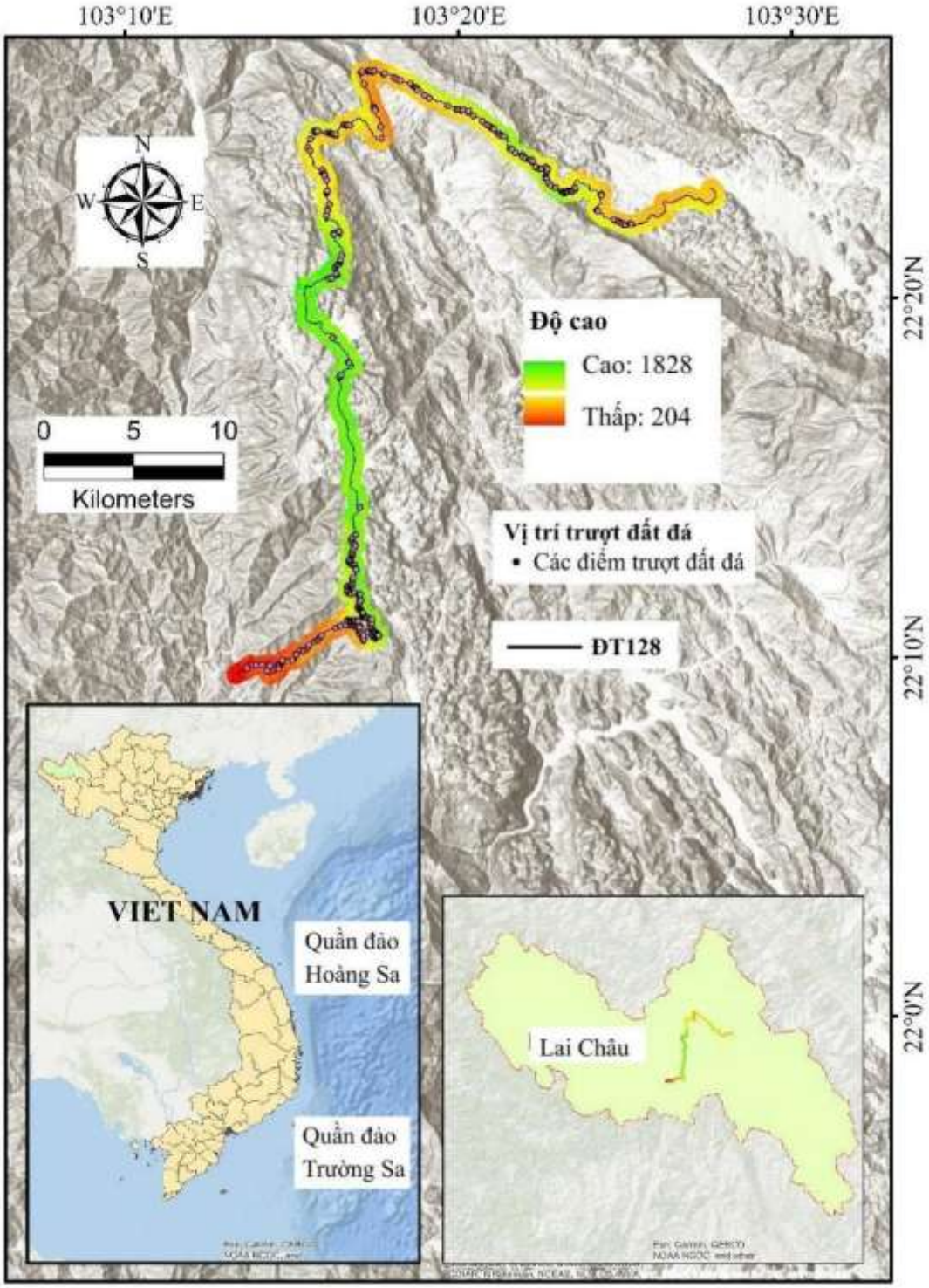
Dữ liệu về trượt đất dọc tuyến nghiên cứu được điều tra mô tả trực tiếp hiện trường về loại hình, quy mô và các kích thước, đặc điểm tầng phủ, đặc điểm và hình thái mặt trượt, … Dữ liệu này được tích hợp dọc tuyến nghiên cứu trên bản đồ số hóa, cho phép cung cấp cái nhìn tổng quan ban đầu về hình thái chung khu vực nghiên cứu. Các điểm trượt lớn, phức tạp được lập phiếu điều tra chuyên sâu với nội dung mô tả kỹ về hiện trạng mái dốc, loại vật liệu, đặc điểm mái dốc, kiểu hình sườn dốc, kiểu mặt cắt ngang, mô tả đá gốc, mô tả tầng phong hóa, nước mặt, địa chất thủy văn, đặc điểm công trình lân cận, đặc điểm thực vật, thiệt hại phát sinh nếu mái dốc mất ổn định,…

Kết quả khảo sát và thu thập ghi nhận được 294 điểm trượt dọc toàn tuyến nghiên cứu. Tất cả các điểm trượt thu thập được đưa lên Google Earth để giải đoán hình ảnh vệ tinh, giúp xác minh và đánh giá chính xác vị trí trượt (Hình 3.5).

3.2.2.2. Dữ liệu đầu vào sử dụng phân vùng nguy cơ trượt đất đá

Nghiên cứu lựa chọn 14 yếu tố ảnh hưởng, đại diện cho các nhóm cơ chế chính gây trượt đất đá và có mối quan hệ tương tác theo chuỗi từ điều kiện địa hình–địa chất đến kích hoạt bởi mưa. Các yếu tố ảnh hưởng như độ cao địa hình, độ dốc sườn, hướng dốc, chỉ số độ ẩm địa hình (TWI), chỉ số sức mạnh dòng chảy (SPI) và tích lũy dòng chảy được trích xuất từ DEM có độ phân giải 12,5 m qua nguồn Cục Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ (USGS). Các yếu tố này được tính toán bằng các kỹ thuật GIS tiêu chuẩn trong DEM. Về các bước tiền xử lý, dữ liệu DEM đã được kiểm tra để tìm các giá trị không nhất quán và bị thiếu.

Bất kỳ khoảng trống hoặc bất thường nào đều được lấp đầy bằng các kỹ thuật nội suy để đảm bảo một tập dữ liệu hoàn chỉnh và nhất quán.



Hình 3.5. Vị trí khu vực nghiên cứu điển hình và các điểm trượt

Chỉ số NDVI được tính toán từ ảnh vệ tinh Sentinel 2 có độ phân giải 12,5 m. Dữ liệu lượng mưa trung bình hàng năm và lượng mưa lớn nhất sử dụng nghiên cứu được lấy từ Cục Khí tượng Thủy văn ở độ phân giải 12,5 m. Dữ liệu ảnh vệ tinh và lượng mưa cũng được kiểm tra để tìm các giá trị bị thiếu, được giải quyết thông qua các phương pháp nội

suy không gian tiêu chuẩn. Các yếu tố địa chất, khoảng cách đến các đứt gãy được lấy từ bản đồ địa chất tỷ lệ 1:200.000 của Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam. Khoảng cách tới đường giao thông, khoảng cách tới các con sông, suối được tính toán bằng dữ liệu từ Bộ Nông nghiệp và Môi trường. Tất cả các yếu tố đã được lấy mẫu ở độ phân giải chung 12,5 m nhằm đảm bảo tính nhất quán trong độ phân giải không gian của các biến đầu vào khi lập mô hình AI. Các tập dữ liệu cuối cùng đã được chuyển đổi sang định dạng ô lưới và cắt bớt theo phạm vi của khu vực nghiên cứu (Bảng 3.7)

Bảng 3.7. Tổng hợp dữ liệu sử dụng phân vùng nguy cơ trượt đất đá tuyến ĐT128

Thông số	Tỷ lệ	Nguồn dữ liệu
Độ cao địa hình (m)	12,5 m	DEM - USGS
Độ dốc sườn	12,5 m	Trích xuất từ DEM
Độ cong bề mặt sườn	12,5 m	Trích xuất từ DEM
Hướng dốc	12,5 m	Trích xuất từ DEM
Chỉ số thực vật (NDVI)	12,5 m	Sentinel 2
Chỉ số độ ẩm địa hình (TWI)	12,5 m	Trích xuất từ DEM
Chỉ số sức mạnh dòng chảy (SPI)	12,5 m	Trích xuất từ DEM
Tích lũy dòng chảy	12,5 m	Trích xuất từ DEM
Lượng mưa trung bình năm	12,5 m	Cục Khí tượng Thủy văn
Lượng mưa lớn nhất	12,5 m	Cục Khí tượng Thủy văn
Địa chất	1:200.000	Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam
Khoảng cách tới đứt gãy	1:200.000	Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam
Khoảng cách tới đường	-	Bộ Nông nghiệp và Môi trường
Khoảng cách tới sông	-	Bộ Nông nghiệp và Môi trường

- Độ cao địa hình là một trong những yếu tố địa hình quan trọng có ảnh hưởng tới tính nhạy cảm trượt đất đá đặc biệt trong bối cảnh địa hình đồi núi phức tạp như khu vực MNTB. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng nguy cơ xảy ra trượt đất không phân bố đồng đều theo độ cao, mà có xu hướng tăng lên hoặc giảm đi tùy theo các dải độ cao đặc trưng. Cụ thể, Cemiloglu và nnk (2023) [57] và Jaafari (2018) [102] đã chứng minh rằng các khu vực nằm trong dải độ cao trung bình đến cao thường có mức độ nhạy cảm trượt đất đá cao hơn, do tích lũy vật liệu rời, độ dốc lớn, cũng như tác động mạnh của các quá trình xói mòn và dòng chảy mặt tạm thời. Bên cạnh đó, các yếu tố như lượng mưa, kiểu khí hậu, thảm thực vật và đặc trưng cơ lý của đất cũng thay đổi theo độ cao địa hình, từ đó ảnh hưởng đến trạng thái ổn định của sườn dốc. Du và Wang (2014) [74], Le Minh và nnk (2023) [110] đều nhấn

mạnh rằng việc tích hợp đầy đủ các mối quan hệ giữa độ cao và các yếu tố phụ thuộc nói trên là điều kiện tiên quyết để xây dựng các mô hình đánh giá nguy cơ trượt đất đá chính xác. Địa hình khu vực nghiên cứu được phân chia thành 8 lớp độ cao sử dụng bản đồ số hóa địa hình (DEM), bao gồm: (43–92) m, (92–430) m, (430–633) m, (633–828) m, (828–1038) m, (1038–1269) m, (1269–1523) m, và (1523–2177) m (Phụ lục 2). Cách phân loại này cho phép làm rõ phân bố không gian trượt đất đá theo từng dải độ cao, phục vụ cho việc hiệu chỉnh trọng số yếu tố đầu vào trong mô hình dự báo nguy cơ trượt đất đá.

- Độ dốc sườn là một trong những yếu tố địa hình có ảnh hưởng đến sự ổn định của mái dốc và thường được xem là thông số chính trong các mô hình đánh giá nguy cơ trượt đất đá. Về mặt cơ học đất, độ dốc liên quan trực tiếp thành phần lực song song với bề mặt sườn - yếu tố chi phối lực trượt tác động lên khối vật liệu trên mái dốc. Theo Jahandar và nnk (2022) [105], khi độ dốc tăng, thành phần lực trượt do trọng lực tác động cũng tăng, trong khi khả năng kháng trượt của vật liệu có xu hướng giảm, đặc biệt khi gặp điều kiện bất lợi như đất bão hòa nước hoặc chịu dao động của động đất. Các nghiên cứu điển hình gần đây như của Jaafari và nnk (2022b) [104] cũng nhấn mạnh rằng, nguy cơ trượt đất đá tăng mạnh ở các vùng có độ dốc lớn, do tại đây trạng thái cân bằng cơ học của khối đất bị phá vỡ, đặc biệt khi kết hợp với các yếu tố kích hoạt như mưa lớn, rung chấn hay cắt xẻ địa hình. Bản đồ độ dốc được xây dựng từ DEM độ phân giải 12,5 m, và được phân thành 7 lớp độ dốc: $(0\text{-}10{,}871)^0$; $(10{,}971\text{-}18{,}777)^0$; $(18{,}777\text{-}25{,}366)^0$; $(25{,}366\text{-}31{,}626)^0$; $(31{,}626\text{-}38{,}215)^0$; $(38{,}215\text{-}47{,}109)^0$; $(47{,}109\text{-}84{,}006)^0$ (Phụ lục 2). Cần lưu ý, với kích thước pixel DEM 12,5 m bao trùm đồng thời cả mặt taluy và địa hình tự nhiên xung quanh, khiến giá trị độ dốc trích xuất chủ yếu phản ánh độ dốc sườn núi tổng thể bao quanh tuyến đường, không hoàn toàn tương ứng với độ dốc thực tế của mái taluy đã thi công

- Độ cong mặt địa hình là một tham số địa hình có ảnh hưởng đáng kể đến quá trình hình thành và phát triển trượt đất đá, thông qua sự phân bố ứng suất và đặc tính dòng chảy bề mặt trên mái dốc. Về mặt hình học, độ cong mô tả sự thay đổi hình dạng của bề mặt địa hình theo chiều ngang hoặc chiều dọc. Theo Jaafari (2018) [102], Nhu và nnk (2020) [136], các mái dốc có hình dạng lồi với đường cong hướng ra ngoài có xu hướng phân tán ứng suất tốt hơn và thúc đẩy thoát nước bề mặt nhanh chóng, góp phần tăng cường ổn định mái dốc. Ngược lại, các mái dốc lõm với đường cong hướng vào trong có khả năng tập trung dòng chảy mặt, gây tích tụ nước và tăng độ bão hòa trong đất, dẫn đến giảm lực kháng cắt và tăng nguy cơ phát sinh trượt đất đá. Bản đồ độ cong cũng được xây dựng dựa trên DEM độ phân giải 12,5 m, và được chia thành ba

lớp chính gồm: lõm (< –0,05), mặt bằng (–0,05-0,05), và lồi (> 0,05) (Phụ lục 2).

- Hướng dốc là đại lượng đặc trưng cho hướng không gian mà một sườn dốc quay về so với các phương chính, đóng vai trò quan trọng trong việc điều tiết các quá trình vi khí hậu và phân bố độ ẩm trên bề mặt địa hình. Hướng dốc ảnh hưởng trực tiếp đến lượng bức xạ mặt trời nhận được, mức độ thoát hơi nước và sự phát triển của thảm thực vật che phủ từ đó gián tiếp tác động đến trạng thái ổn định của sườn dốc. Theo Cellek (2021) [56], các sườn dốc quay về hướng nam có xu hướng nhận được bức xạ mặt trời nhiều hơn so với các hướng bắc, dẫn đến quá trình thoát hơi và phát triển thảm thực vật tốt hơn. Chính yếu tố che phủ thực vật này góp phần nâng cao khả năng chống xói mòn và giảm thiểu nguy cơ trượt đất đá do tăng cường ma sát bề mặt và cải thiện tính liên kết trong lớp đất mặt. Ngược lại, các sườn dốc hướng bắc thường ít ánh sáng mặt trời, dễ bị tích nước và quá trình phong hóa mạnh hơn, từ đó làm giảm độ bền của vật liệu đất đá và tăng nguy cơ mất ổn định mái dốc. Bản đồ hướng dốc khu vực được phân thành 8 lớp theo phương vị gồm: Bắc, Đông Bắc, Đông, Đông Nam, Nam, Tây Nam, Tây và Tây Bắc (Phụ lục 2).

- Chỉ số thực vật (NDVI) là một đại lượng viễn thám quan trọng, phản ánh mật độ của lớp phủ thực vật tại khu vực nghiên cứu. NDVI được chứng minh là có mối quan hệ chặt chẽ với tính ổn định mái dốc thông qua khả năng liên kết hạt đất và hạn chế xói mòn bề mặt. Theo Liu và nnk (2024b) [121], giá trị NDVI cao cho thấy thảm thực vật phát triển tốt, từ đó làm tăng cường độ liên kết đất – rễ, nâng cao độ bền tổng thể của sườn dốc. Alqadhi và nnk (2024) [35] chỉ ra rằng các khu vực có mật độ thực vật cao thường ít xảy ra hiện tượng trượt đất đá hơn do hệ rễ thực vật có khả năng tăng cường ổn định cơ học cho lớp đất mặt, đồng thời làm giảm tác động của dòng chảy bề mặt. Ngược lại, tại các khu vực có NDVI thấp, nơi thảm thực vật thưa thớt hoặc không có, độ bền cắt giảm đáng kể, gia tăng nguy cơ mất ổn định mái dốc khi chịu tác động mưa lớn. Bản đồ NDVI được xây dựng từ dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 2 với độ phân giải cao, phân loại thành 5 lớp theo phổ giá trị từ -1 đến 1, bao gồm: -1 đến 0,0625; 0,0625 – 0,242188; 0,242188 – 0,375; 0,375 – 0,476563; và 0,476563 – 1 (Phụ lục 2).

- Chỉ số độ ẩm địa hình (TWI) là một chỉ tiêu thủy văn có vai trò quan trọng trong việc đánh giá ảnh hưởng của địa hình đến sự phân bố và tích lũy độ ẩm trong đất. TWI được xác định từ DEM và phản ánh xu hướng tích nước tại một điểm địa hình cụ thể dựa trên mối quan hệ giữa diện tích lưu vực đổ về và độ dốc tại điểm đó. Theo Pham và nnk (2022) [142], Ye và nnk (2024) [193], giá trị TWI cao thường đi kèm với trạng thái bão hòa cao của đất, làm suy giảm lực kháng cắt và tăng nguy cơ mất ổn định mái dốc. Do đó, TWI đóng vai trò như một yếu tố "kích hoạt"

tiềm tàng hiện tượng trượt đất đá, đặc biệt trong điều kiện mưa lớn kéo dài hoặc địa hình có khả năng giữ nước cao. Bản đồ TWI được xây dựng từ dữ liệu DEM có độ phân giải 12,5 m và được phân thành năm lớp độ ẩm địa hình, cụ thể gồm: 0,698–4,605; 4,605–6,304; 6,304–9,501; 9,501–13,997; và 13,997–26,187 (Phụ lục 2).

- Chỉ số sức mạnh dòng chảy (SPI) là một tham số thủy văn có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá khả năng xói mòn tiềm tàng của dòng nước trên bề mặt địa hình. SPI được tính toán từ DEM trên cơ sở kết hợp giữa diện tích lưu vực và độ dốc tại một điểm xác định. Theo Le Minh và nnk (2023) [110], Pham và nnk (2022) [142] các khu vực có giá trị SPI cao thường đi kèm với năng lượng dòng chảy lớn, làm tăng khả năng xói lở bề mặt, phá hủy lớp thảm thực vật, suy giảm cấu trúc nền đất và góp phần thúc đẩy quá trình hình thành trượt đất đá, đặc biệt tại các vùng khe tụ thủy nơi tập trung dòng chảy khi mưa lớn. Bản đồ SPI được xây dựng từ dữ liệu DEM độ phân giải 12,5 m và được phân loại thành 4 nhóm: 0–3371,461; 3371,461–15151,576; 15151,576–35400,345; và 35400,345–74172,152 (Phụ lục 2). Việc phân vùng giá trị SPI giúp nhận diện các khu vực có khe tụ thủy và khu vực có nguy cơ tập trung dòng chảy cao, những nơi có khả năng bị xói mòn, những nơi có nguy cơ kích hoạt các dạng trượt đất đá.

- Tích lũy dòng chảy ánh mức độ hội tụ của dòng chảy bề mặt tại các điểm trên DEM. Chỉ số này thể hiện các khu vực có khả năng tập trung dòng chảy lớn, những nơi thường xuyên bão hòa nước và có nguy cơ trượt đất đá cao hơn. Theo Bai và nnk (2021) [43], các khu vực có giá trị tích lũy dòng chảy lớn thường gắn với sự hình thành các vùng rãnh xói, khe tụ thủy, nơi nước mưa tập trung với lưu lượng cao, làm tăng mức độ bão hòa lớp đất mặt và giảm hệ số an toàn ổn định mái dốc. Bản đồ tích lũy dòng chảy được xây dựng từ DEM độ phân giải 12,5 m và phân chia thành 5 lớp giá trị: 0–514; 514–2008; 2008–4618; 4618–8888 và 8888–16210 (Phụ lục 2). Phân vùng này hỗ trợ việc nhận diện các khu vực có dòng chảy tập trung mạnh, các vùng lõm địa hình hoặc rãnh tụ thủy nơi thường xuyên xuất hiện điều kiện bão hòa cục bộ và là điểm kích hoạt tiềm năng trượt đất, đặc biệt sau các trận mưa lớn.

- Lượng mưa trung bình năm là một thông số khí hậu chủ đạo, có ảnh hưởng sâu sắc đến mức độ bão hòa lâu dài của tầng đất mặt, từ đó tác động tới ổn định tổng thể của mái dốc. Trong các khu vực có lượng mưa trung bình năm cao, độ ẩm trong đất thường xuyên duy trì ở mức cao, làm giảm lực liên kết giữa các hạt đất, đặc biệt trong các tầng vật liệu rời hoặc phong hóa sâu. Kết quả là sức kháng cắt của đất bị suy giảm, dẫn đến tăng xác suất phát sinh trượt đất. Theo Alqadhi và nnk (2024) [35], Zhang và nnk (2023a) [197], Zhao và nnk (2024b) [199], các vùng địa hình đồi núi có lượng mưa trung bình năm lớn hơn 2200 mm thường ghi nhận tần suất trượt

đất đá cao hơn rõ rệt so với các vùng khác. Tình trạng bão hòa kéo dài làm tăng áp lực nước lỗ rỗng và gây mất ổn định lớp đất phủ trên mái dốc, nhất là tại các vùng có cấu trúc địa chất yếu, thảm phủ kém và hệ thống thoát nước không hiệu quả. Bản đồ lượng mưa trung bình năm được xây dựng và phân loại thành 4 lớp để sử dụng trong mô hình dự báo phân vùng AI: (2100–2200) mm, (2200–2300) mm, (2300–2400) mm và lớn hơn 2400 mm (Phụ lục 2).

- Lượng mưa lớn nhất là lượng mưa cực trị ghi nhận trong thời đoạn 24 giờ và là một trong những yếu tố kích hoạt quan trọng đối với trượt đất đá. Khi lượng mưa trong 24 giờ lớn, nước mưa thấm vào lớp đất phủ làm gia tăng độ ẩm và mức độ bão hòa, giảm lực hút dính của đất không bão hòa, đồng thời làm tăng áp lực nước lỗ rỗng, qua đó làm suy giảm sức kháng cắt và mức độ ổn định của sườn dốc. Theo nghiên cứu của Bai và nnk (2021) [43], Li và nnk (2024a) [116], Zhao và nnk (2024a) [198], mưa cực đoan là một trong những tác nhân quan trọng kích hoạt trượt đất tại khu vực miền núi. Tác động tích lũy của mưa lớn không chỉ làm suy giảm sức kháng cắt của đất theo thời gian mà còn làm tích tụ nước trong các khe tụ thủy, nơi có nguy cơ hình thành dòng trượt đất đá nguy hiểm. Bản đồ lượng mưa lớn nhất được chia thành hai lớp: từ (105–110) mm, và từ (110–200) mm (Phụ lục 2).

- Địa chất là một trong những yếu tố nền tảng chi phối rõ rệt đến cơ chế phát sinh và phân bố không gian của các hiện tượng trượt đất đá. Đặc điểm thạch học, thành phần khoáng vật và cấu trúc địa chất của các thành tạo đất đá ảnh hưởng trực tiếp đến tính chất cơ học, độ bền, tính thấm và mức độ phong hóa của đất. Theo Li và nnk (2024b) [117], sự hiện diện của các tầng đá bị phong hóa mạnh như đá phiến sét, đá bột kết, hoặc các hệ tầng chứa hàm lượng sét cao là những yếu tố làm giảm hệ số ổn định mái dốc, đặc biệt dưới tác động của mưa lớn. Nghiên cứu của Thanh và nnk (2020) [170] tại các khu vực miền núi cũng cho thấy rằng các thành tạo địa chất như tầng sét yếu, đá phong hóa mạnh hoặc các khu vực đứt gãy thường là nơi tập trung các điểm trượt đất đá có nguy cơ cao. Bản đồ địa chất khu vực được phân chia thành các đơn vị địa chất đặc trưng bao gồm: Bắc Sơn, Bản Páp, Bến Khế, Đệ Tứ, Đồng Giao, Lai Châu, Mường Trai, Nậm Pia, Sinh Vinh, Tân Lạc, Viên Nam và Yên Châu (Phụ lục 2). Cần lưu ý, bản đồ địa chất tỷ lệ 1:200.000 có độ phân giải không gian thấp hơn đáng kể so với các yếu tố còn lại (12,5 m); việc lấy mẫu lại về cùng lưới 12,5 m không bổ sung thêm thông tin thực tế tiềm ẩn sai số khi mô hình học các mối quan hệ không gian chi tiết dọc hành lang tuyến hẹp

- Khoảng cách tới đứt gãy là yếu tố địa cấu trúc có ảnh hưởng đến sự ổn định mái dốc. Các vùng nằm gần các đới đứt gãy thường đặc trưng bởi mật độ nứt nẻ cao, sự phân mảnh của đất đá, và thành phần khoáng vật yếu, những yếu tố làm suy giảm đáng kể cường độ kháng cắt và

khả năng ổn định tổng thể của sườn dốc. Các đứt gãy còn là hành lang phát triển của nước ngầm, tạo điều kiện cho quá trình phong hóa mạnh và tăng bão hòa nước, góp phần làm giảm độ bền của lớp phong hóa trên bề mặt mái dốc. Theo Liu và nnk (2024c) [122], Sun và nnk (2024) [166], mức độ rủi ro trượt đất đá có xu hướng tăng rõ rệt tại các khu vực nằm trong phạm vi gần đứt gãy, đặc biệt dưới điều kiện mưa lớn hoặc địa chấn. Bản đồ khoảng cách đến các đứt gãy đã được xây dựng từ dữ liệu địa chất khu vực và phân loại thành 6 lớp khoảng cách: nhỏ hơn 500 m; (500–1000) m; (1000–1500) m; (1500–2000) m; (2000–2500) m; và lớn hơn 2500 m (Phụ lục 2).

- Khoảng cách đến sông, suối là một trong những yếu tố có ảnh hưởng đến mức độ ổn định mái dốc. Tại các khu vực gần sông, quá trình xói mòn bờ xảy ra thường xuyên do dòng chảy tập trung, nhất là vào mùa mưa lũ, làm chân mái dốc bị xói lở, tăng khả năng mất ổn định của các khối đất đá phía trên. Ngoài tác động cơ học của dòng chảy, các khu vực gần sông thường có đường bão hòa cao. Độ ẩm cao trong đất làm giảm lực ma sát trong và lực dính kết đơn vị, hai thông số quan trọng ảnh hưởng tới sức kháng cắt của đất, từ đó làm giảm hệ số ổn định mái dốc một cách đáng kể. Do đó, các khu vực ven sông là những vùng nhạy cảm cần được ưu tiên phân tích trong mô hình đánh giá nguy cơ trượt đất đá. Trong nghiên cứu này, khoảng cách tới sông, suối được trích xuất từ dữ liệu địa hình và thủy văn với mô hình DEM độ phân giải 12,5 m. Các giá trị khoảng cách được phân lớp thành 6 nhóm: (0–100) m; (100–200) m; (200–300) m; (300–400) m; (400–500) m; và lớn hơn 500 m (Phụ lục 2).

Khi lựa chọn các yếu tố đầu vào cho mô hình phân vùng nguy cơ trượt đất, cần loại trừ các biến có mối tương quan mạnh để tránh hiện tượng đa cộng tuyến, gây sai lệch kết quả mô hình. Hệ số tương quan Pearson được sử dụng để định lượng mức độ tương quan tuyến tính giữa các cặp biến, với giá trị dao động từ −1 đến +1. Theo ngưỡng thường được chấp nhận trong các nghiên cứu địa kỹ thuật, nếu hệ số tương quan Pearson giữa hai biến vượt quá ±0,7, một trong hai nên được loại bỏ khỏi mô hình để đảm bảo tính độc lập tương đối giữa các biến đầu vào [103]. Trong nghiên cứu này, phân tích tương quan cho thấy yếu tố "khoảng cách đến đường" có hệ số tương quan cao với các biến khác, do đó đã được loại bỏ. Mô hình AI được tiến hành với 13 yếu tố còn lại ((không bao gồm khoảng cách tới đường) nhằm đảm bảo độ chính xác trong dự báo và phân vùng nguy cơ trượt đất đá.

3.2.3. Phương pháp phân vùng nguy cơ trượt đất đá khu vực nghiên cứu

Phân vùng nguy cơ trượt đất đá dọc tuyến ĐT128 trong nghiên cứu này được minh họa trong Hình 3.6, gồm 6 bước chính:

- Bước 1 – Thu thập dữ liệu. Kết quả khảo sát thực địa và thu thập bổ sung ghi nhận được 294 điểm trượt. Cùng với đó là 13 yếu tố ảnh hưởng trượt (Xác định trong mục 3.2.2) được thu thập, phân tích, xử lý là số liệu sử dụng nghiên cứu. Các lớp dữ liệu được đồng

bộ với độ phân giải (12,5x12,5) m trong phần mềm ArcGIS.

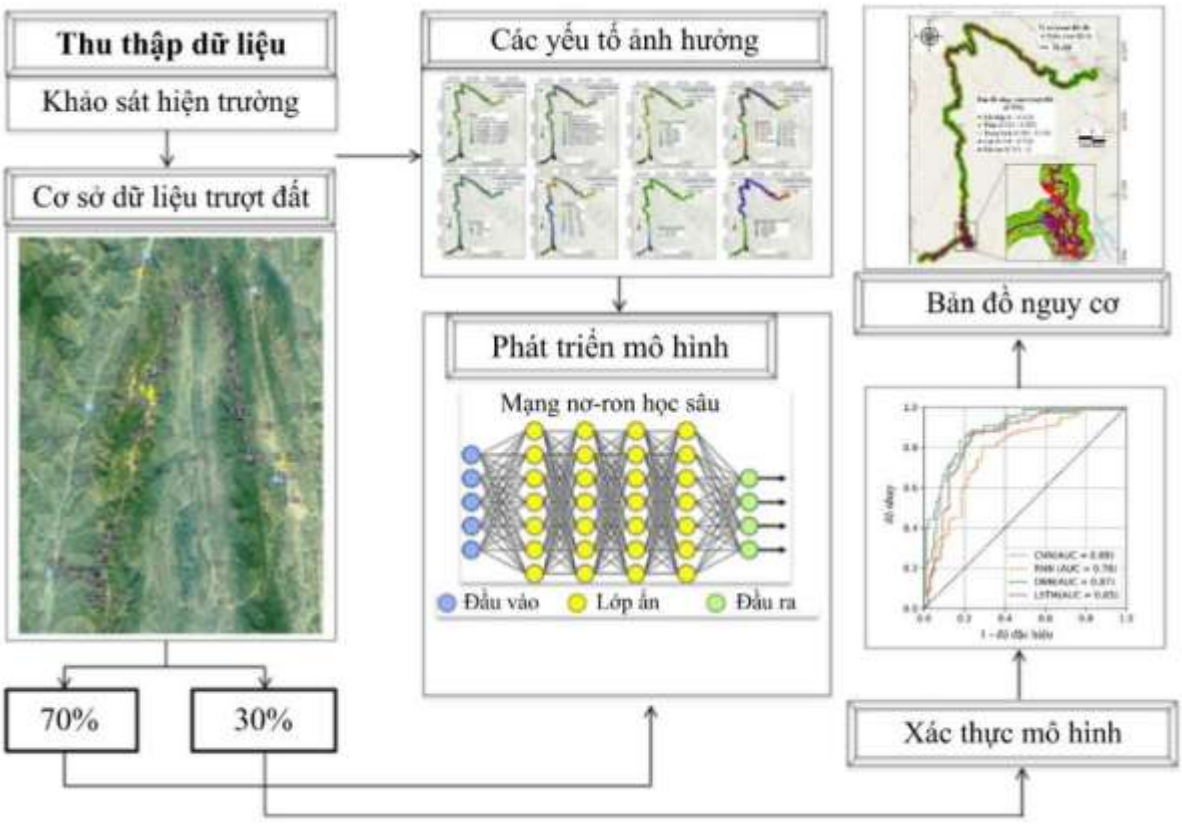
- Bước 2 – Phân chia dữ liệu. Các điểm trượt đất đá đã xác định dọc theo tuyến ĐT128 được chia thành hai nhóm 70% (206 mẫu) dùng để đào tạo (huấn luyện) và 30% còn lại (88 mẫu) dùng để xác thực (kiểm chứng). Sau đó cũng lấy một số lượng tương đương các khu vực không bị trượt (294 trường hợp) làm mẫu đối chứng (Hình 3.7).

- Bước 3 – Xây dựng và đào tạo mô hình. Bốn mô hình học sâu được sử dụng nghiên cứu gồm CNN, DNN, RNN và LSTM.

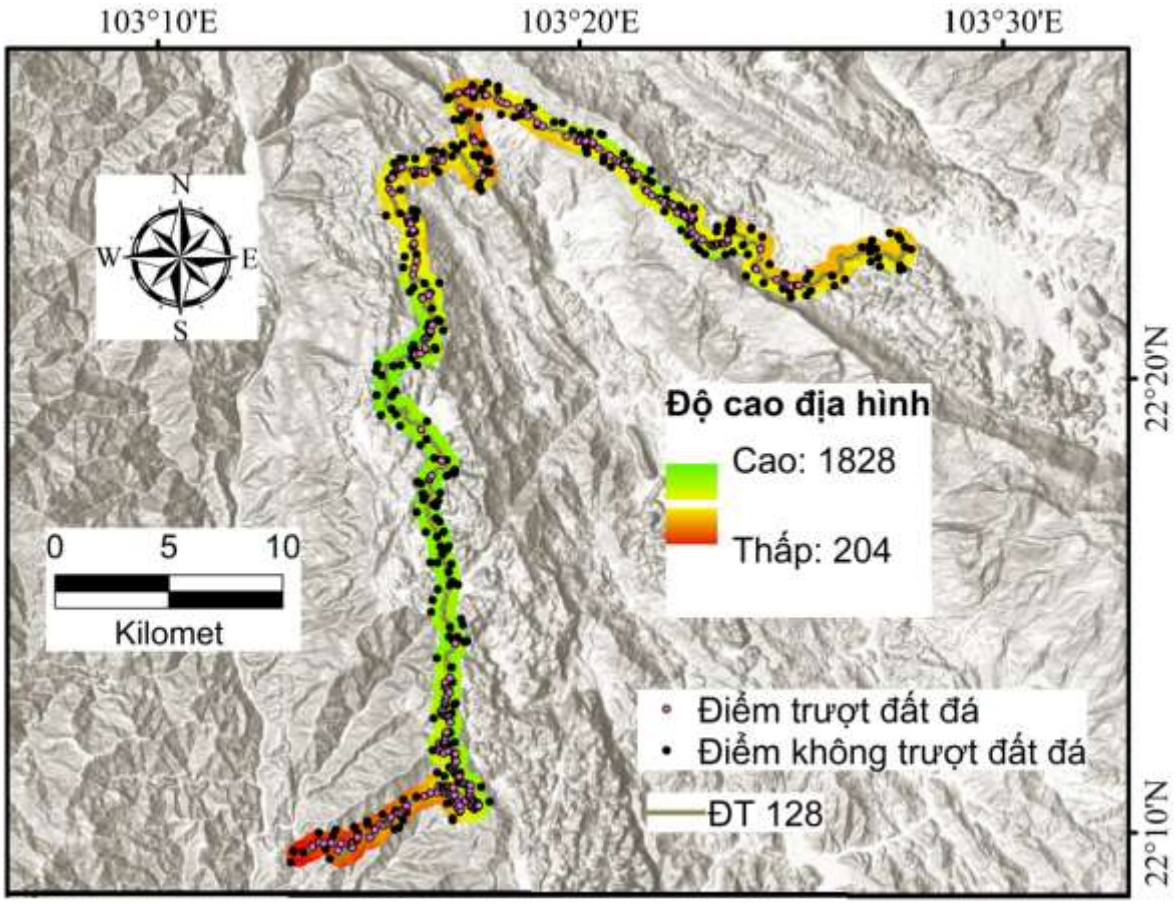
- Bước 4 – Đánh giá hiệu suất dự báo các mô hình. Các mô hình AI sau khi được đào tạo và xác thực được đánh giá hiệu suất dự báo bằng các chỉ số AUC, độ chính xác, độ nhạy, độ đặc hiệu, …

- Bước 5 – Lập bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá. Bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá được lập theo mô hình có hiệu suất dự báo tốt nhất. Kết quả phân loại 5 cấp độ biểu thị cho các mức độ nhạy cảm khác nhau đối với trượt đất đá từ rất thấp, thấp, trung bình, cao và rất cao. Cuối cùng là phân tích bản đồ nhạy cảm để xác định mức độ diện tích đất nằm trong mỗi hạng mục nhạy cảm.

- Bước 6 – Xác thực và đánh giá bản đồ. Bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá được xác thực bằng cách so sánh với các điểm trượt đất đá không tham gia vào đào tạo mô hình.



Hình 3.6. Sơ đồ nguyên lý lập bản đồ nguy cơ trượt đất đá phạm vi nghiên cứu



Hình 3.7. Vị trí các điểm trượt và không trượt đất đá

3.2.4. Kết quả phân vùng nguy cơ trượt đất đá khu vực nghiên cứu

3.2.4.1. Đánh giá hiệu suất của mô hình khi sử dụng các chỉ số đánh giá thống kê

Hiệu suất của các mô hình được xác thực qua cả giai đoạn đào tạo và xác thực. Trong giai đoạn đào tạo (Bảng 3.8), các mô hình thể hiện khả năng khác nhau trong việc xác định đúng các trường hợp dương tính và âm tính. Về việc xác định đúng các trường hợp dương tính thật (TP), các mô hình có số lượng cụ thể sau: CNN (165); RNN (175); DNN (166); và LSTM (134). Tương tự, số lượng các trường hợp âm tính thật (TN), đại diện cho việc xác định chính xác các trường hợp âm tính, được ghi nhận như sau: CNN (181); RNN (104); DNN (190); và LSTM (189).

Tuy nhiên, các mô hình sử dụng nghiên cứu cũng cho thấy trường hợp phân loại sai. Số lượng các trường hợp dương tính giả (FP), tức là các trường hợp âm tính được xác định sai là dương tính, được ghi nhận cho CNN (26), RNN (16), DNN (25), và LSTM (57). Số lượng các trường hợp âm tính giả (FN), tức là các trường hợp dương tính được xác định sai là âm tính, được tìm thấy cho CNN (35), RNN (112), DNN (26), và LSTM (27). Phân tích PPV, đại diện cho phần trăm các trường hợp dương tính được xác định đúng trong tất

cả các trường hợp được dự báo là dương tính, thay đổi giữa các mô hình: CNN (86,39%); RNN (91,62%); DNN (86,91%); và LSTM (70,16%). Chỉ số NPV, biểu thị phần trăm các trường hợp âm tính được xác định đúng trong tất cả các trường hợp được dự báo là âm tính: CNN (83,80%); RNN (48,15%); DNN (87,96%); và LSTM (87,50%). Độ nhạy (SST), phản ánh phần trăm các trường hợp dương tính thực sự được mô hình xác định đúng, cho thấy sự khác biệt: CNN (82,50%); RNN (60,98%); DNN (86,46%); và LSTM (83,23%). Độ đặc hiệu (SPF), chỉ ra phần trăm các trường hợp âm tính thực sự được mô hình xác định đúng, có sự biến đổi: CNN (87,44%); RNN (86,67%); DNN (88,37%); và LSTM (76,83%). Độ chính xác tổng thể (ACC), bao gồm các dự báo đúng cho cả các trường hợp dương tính và âm tính, khác nhau giữa các mô hình: CNN (85,01%); RNN (68,55%); DNN (87,47%); và LSTM (79,36%). Chỉ số Kappa, thay đổi giữa các mô hình: CNN (0,700); RNN (0,386); DNN (0,748); và LSTM (0,582). Ngoài ra, RMSE: CNN (0,148); RNN (0,310); DNN (0,125); và LSTM (0,206).

Dựa trên các chỉ số đã cung cấp, các mô hình AI lựa chọn trong nghiên cứu được xếp hạng về kết quả dự báo giai đoạn đào tạo như sau:

1. Mô hình DNN có độ chính xác tổng thể cao nhất (87,47%), Kappa cao nhất (0,748), và RMSE thấp nhất (0,125). Nó cũng hoạt động tốt về các chỉ số PPV (86,91%), NPV (87,96%), độ nhạy (86,46%), và độ đặc hiệu (88,37%);

2. Mô hình CNN có độ chính xác tổng thể cao thứ hai (85,01%) và Kappa (0,700), cùng với RMSE thấp thứ hai (0,148). Nó cũng có hiệu suất tốt về các chỉ số PPV (86,39%), NPV (83,80%), độ nhạy (82,50%), và độ đặc hiệu (87,44%);

3. Mô hình LSTM có độ chính xác tổng thể thấp hơn (79,36%) và Kappa (0,582), cùng với RMSE cao hơn (0,206) so với DNN và CNN. Tuy nhiên, nó có NPV tốt (87,50%) và độ nhạy (83,23%), nhưng PPV (70,16%) và độ đặc hiệu (76,83%) thấp hơn;

4. Mô hình RNN có độ chính xác tổng thể thấp nhất (68,55%), Kappa thấp nhất (0,386), và RMSE cao nhất (0,310). Mặc dù có PPV cao nhất (91,62%), nhưng nó hoạt động kém về các chỉ số NPV (48,15%), độ nhạy (60,98%), và độ đặc hiệu (86,67%).

Chuyển sang giai đoạn xác thực (Bảng 3.8), các mô hình đều cho kết quả dự báo tốt, tuy nhiên thể hiện ưu thế khác nhau. Mô hình RNN đạt TP cao (84) và FP thấp nhất (14), đồng thời có PPV cao nhất (85,71%), cho thấy khả năng nhận diện chính xác các điểm trượt đất (dương tính) vượt trội. Ngược lại, mô hình LSTM nổi bật với TP cao (64) và NPV cao nhất (88,31%), phản ánh khả năng nhận diện chính xác các khu vực không xảy ra trượt

đất. LSTM cũng đạt SST cao nhất (87,67%), trong khi CNN có SPF cao nhất (78,38%), cho thấy hiệu quả trong phân loại âm tính.

Xét tổng thể, mô hình CNN cho hiệu suất cân bằng và ổn định nhất với ACC đạt 80% và hệ số Kappa cao nhất (0,592), thể hiện mức độ phù hợp tốt giữa kết quả dự báo và dữ liệu thực tế. Đồng thời, CNN có RMSE thấp nhất (0,2), cho thấy sai số dự báo nhỏ và độ tin cậy cao hơn so với các mô hình còn lại. Cụ thể trong giai đoạn xác thực kết quả dự báo của các mô hình như sau:

1. Mô hình CNN có độ chính xác tổng thể cao nhất (80,00%), Kappa cao nhất (0,592), và RMSE thấp nhất (0,2). Nó cũng hoạt động tốt về các chỉ số PPV (83,67%), NPV (75,32%), SST (81,19%), và độ đặc hiệu (78,38%).

2. Mô hình DNN có độ chính xác tổng thể cao thứ hai (79,43%) và Kappa (0,585), cùng với RMSE thấp thứ hai (0,206). Nó cũng có hiệu suất tốt về các chỉ số PPV (79,59%), NPV (79,22%), SST (82,98%), và SPF (75,31%).

3. Mô hình LSTM có độ chính xác tổng thể thấp hơn (75,43%) và Kappa (0,518), cùng với RMSE cao hơn (0,245) so với CNN và DNN. Tuy nhiên, nó có NPV cao nhất (88,31%) và SST (87,67%), nhưng PPV (65,31%) và SPF (66,67%) thấp hơn.

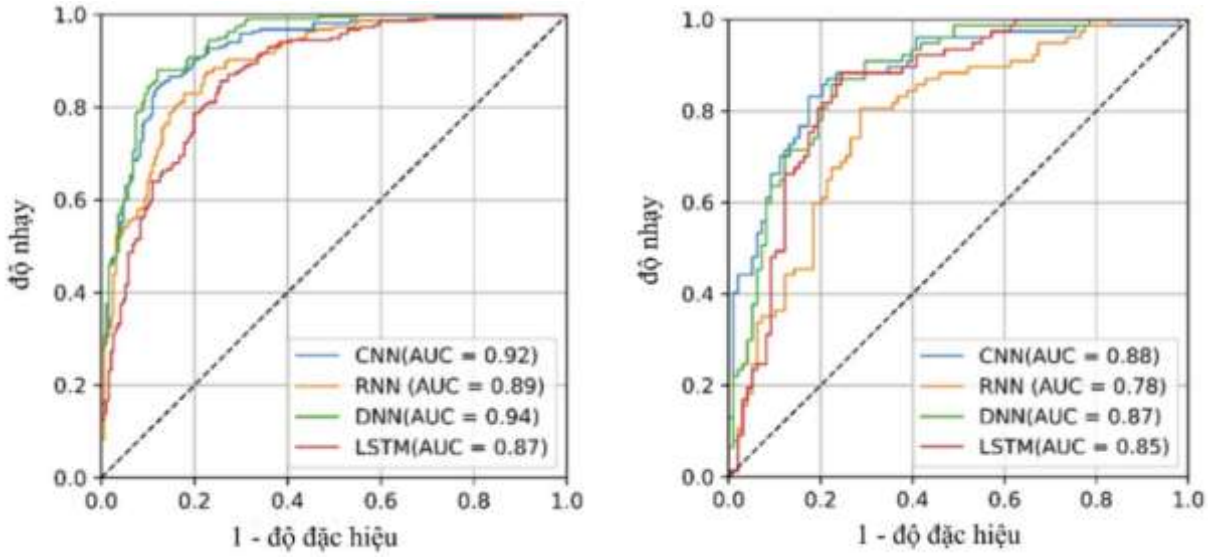
4. Mô hình RNN có độ chính xác tổng thể thấp nhất (67,43%), Kappa thấp nhất (0,310), và RMSE cao nhất (0,326). Mặc dù có PPV cao nhất (85,71%), nhưng nó hoạt động kém về các chỉ số NPV (44,16%), SST (66,14%), và SPF (70,83%).

Bảng 3.8. Hiệu suất dự báo của mô hình AI qua các giai đoạn đào tạo và xác thực

TT	Số liệu	Đào tạo				Xác thực			
		CNN	RNN	DNN	LSTM	CNN	RNN	DNN	LSTM
1	TP	165	175	166	134	82	84	78	64
2	TN	181	104	190	189	58	34	61	68
3	FP	26	16	25	57	16	14	20	34
4	FN	35	112	26	27	19	43	16	9
5	PPV (%)	86,39	91,62	86,91	70,16	83,67	85,71	79,59	65,31
6	NPV (%)	83,80	48,15	87,96	87,50	75,32	44,16	79,22	88,31
7	SST (%)	82,50	60,98	86,46	83,23	81,19	66,14	82,98	87,67
8	SPF (%)	87,44	86,67	88,37	76,83	78,38	70,83	75,31	66,67
9	ACC (%)	85,01	68,55	87,47	79,36	80,00	67,43	79,43	75,43
10	Kappa	0,700	0,386	0,748	0,582	0,592	0,310	0,585	0,518
11	RMSE	0,148	0,31	0,125	0,206	0,2	0,326	0,206	0,245

3.2.4.2. Đánh giá hiệu suất dự báo của mô hình sử dụng nghiên cứu qua chỉ số AUC

Trong giai đoạn đào tạo, mô hình DNN hoạt động tốt nhất với AUC cao nhất là 0,94, trong khi mô hình LSTM có AUC thấp nhất là 0,87. Mô hình CNN và RNN cho thấy hiệu suất trung bình với AUC lần lượt là 0,92 và 0,89 (Hình 3.8a). Trong giai đoạn xác thực, mô hình CNN thể hiện hiệu suất tốt nhất với AUC cao nhất là 0,88, trong khi mô hình RNN hiển thị AUC thấp nhất là 0,78. Các mô hình DNN và LSTM thể hiện hiệu suất trung gian với AUC lần lượt là 0,87 và 0,85 (Hình 3.8b).



a) Giai đoạn đào tạo b) Giai đoạn xác thực

Hình 3.8. Phân tích AUC của các mô hình sử dụng nghiên cứu

Dựa trên tất cả các số liệu hiệu suất được cung cấp cho cả giai đoạn đào tạo và xác thực, các mô hình có thể được xếp hạng như sau:

1. Mô hình CNN cho thấy hiệu quả hoạt động mạnh mẽ ở cả hai giai đoạn. Nó đứng thứ hai trong giai đoạn đào tạo và đứng đầu giai đoạn xác thực, mặc dù hiệu suất của nó giảm nhẹ trong giai đoạn xác thực so với giai đoạn đào tạo.

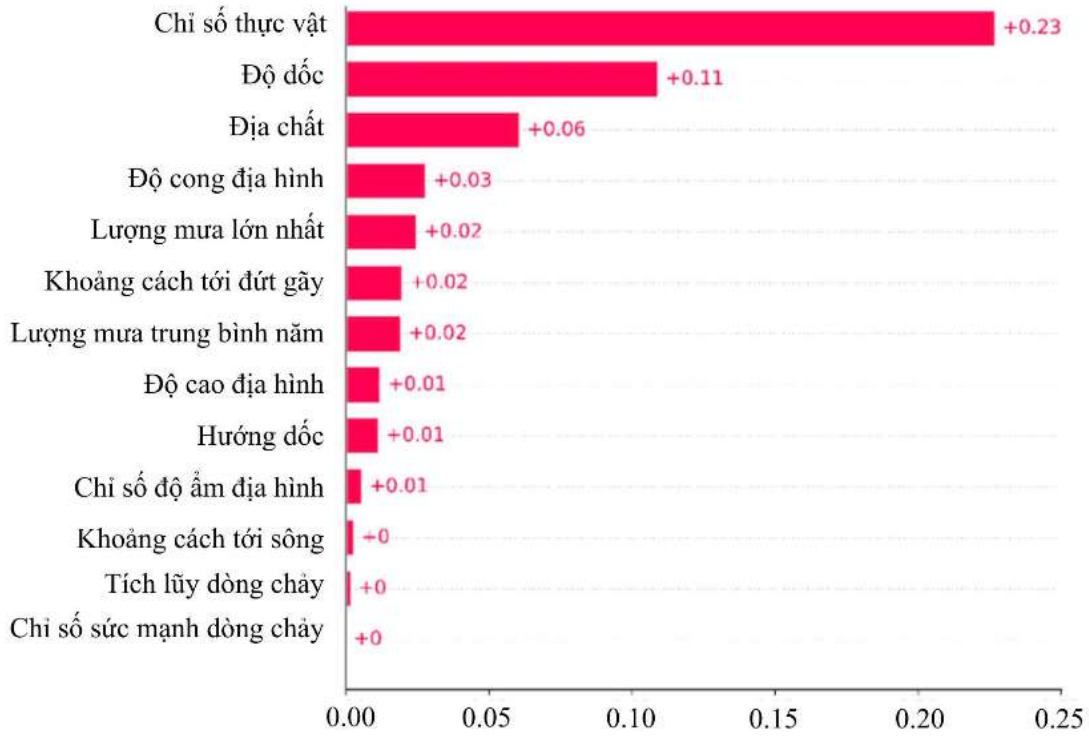
2. Mô hình DNN hoạt động tốt trong cả giai đoạn đào tạo và xác thực. Nó có AUC, độ chính xác, Kappa cao nhất và RMSE thấp nhất trong giai đoạn đào tạo và duy trì hiệu suất tốt trong giai đoạn xác thực.

3. Mô hình LSTM đứng thứ ba trong cả hai giai đoạn. Mặc dù nó có NPV và độ nhạy tốt nhưng PPV, độ đặc hiệu và độ chính xác tổng thể của nó thấp hơn so với DNN và CNN.

4. Mô hình RNN xếp cuối cùng trong cả hai giai đoạn. Mặc dù có PPV cao nhất trong giai đoạn xác thực, nhưng nó hoạt động kém về NPV, độ nhạy, độ đặc hiệu, độ chính xác tổng thể, Kappa và RMSE trong cả hai giai đoạn.

3.2.4.3. Phân tích ảnh hưởng của các yếu tố sử dụng trong mô hình qua phân tích SHAP

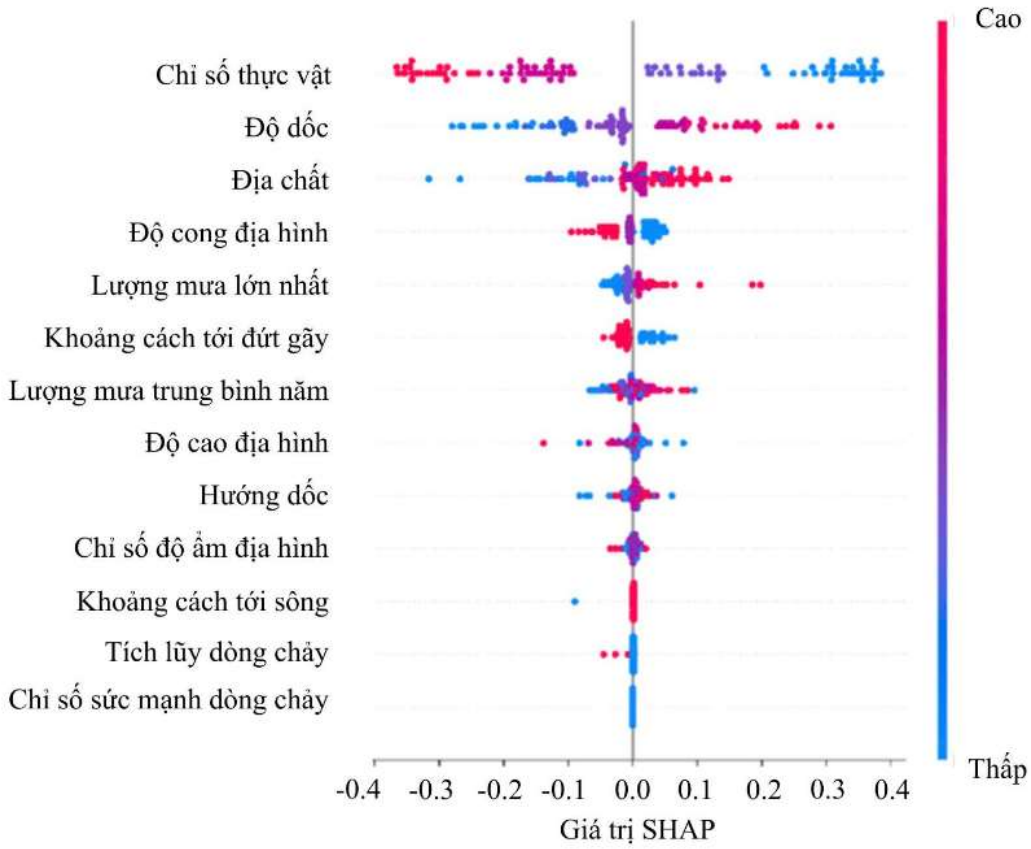
Biểu đồ giá trị SHAP trung bình thể hiện mức độ đóng góp trung bình của các yếu tốc đầu vào đối với kết quả dự báo mô hình sử dụng dự báo (Hình 3.9). Các yếu tố được xếp hạng cao hơn cho thấy mức độ đóng góp lớn hơn đến khả năng dự báo của mô hình. Cần lưu ý, mức đóng góp SHAP phản ánh tương quan thống kê giữa yếu tố đầu vào với kết quả dự báo của mô hình học máy, không đồng nghĩa với vai trò nguyên nhân vật lý trực tiếp gây mất ổn định sườn dốc [135].



Hình 3.9. Biểu đồ giá trị SHAP trung bình

Bên cạnh việc phân tích giá trị SHAP trung bình, phương pháp SHAP còn cho phép khai thác sâu hơn thông qua biểu đồ tổng hợp SHAP. Biểu đồ này dùng để đánh giá mức độ tương đối của các yếu tố đầu vào, đồng thời phân tích chiều và mức độ tác động của từng yếu tố đến xác suất xảy ra trượt đất theo kết quả dự báo của mô hình. Cụ thể, Hình 3.10 minh họa phân bố giá trị SHAP của các yếu tố ảnh hưởng đối với toàn bộ tập dữ liệu đào tạo, trong đó mỗi dấu chấm đại diện cho một mẫu dữ liệu. Màu sắc của dấu chấm phản ánh giá trị thực tế của yếu tố đầu vào tương ứng: các giá trị thấp được biểu diễn bằng màu xanh lam, trong khi các giá trị cao được biểu diễn bằng màu đỏ. Phân bố giá trị SHAP theo chiều dọc thể hiện mức độ tác động của các yếu tố ảnh hưởng đến xác suất trượt tại từng điểm, giá trị SHAP dương góp phần làm tăng xác suất trượt do mô hình dự báo, trong khi giá trị âm có xu hướng làm giảm xác suất này. Phân tích cung cấp cái nhìn định lượng và định tính về mức độ đóng góp thống kê của từng yếu tố địa mạo, địa chất, địa hình hoặc

thủy văn đến kết quả dự báo của mô hình, từ đó hỗ trợ hiệu quả cho việc hiệu chỉnh mô hình và định hướng thu thập dữ liệu trong phân vùng nguy cơ trượt đất.



Hình 3.10. Biểu đồ tổng hợp SHAP

Kết quả phân tích SHAP cho thấy, chỉ số thực vật và độ dốc địa hình là các yếu tố có mức đóng góp thống kê lớn nhất đến kết quả dự báo của mô hình đã sử dụng trong nghiên cứu, thể hiện qua giá trị SHAP trung bình lớn. Chỉ số thực vật, đại diện cho mật độ thảm thực vật, có giá trị SHAP trung bình cao hơn (+0,23) một chút so với độ dốc (+0,11), cho thấy mối tương quan thống kê mạnh giữa độ che phủ thực vật và khả năng dự báo trượt đất đá của mô hình [40]. Giá trị chỉ số thực vật cao trong tập dữ liệu có thể là dấu hiệu gián tiếp của khu vực có địa hình ổn định hơn, gắn với sự phát triển tốt của thảm thực vật [103]. Độ dốc, dù có giá trị SHAP trung bình thấp hơn chỉ số thực vật, vẫn thể hiện mức đóng góp thống kê đáng kể đến khả năng dự báo của mô hình, cho thấy nó tiếp tục là yếu tố quan trọng cần xem xét trong các mô hình dự báo trượt đất đá tương tự [120]. Cần lưu ý, giá trị SHAP của yếu tố độ dốc được tính toán trên nền dữ liệu độ dốc trích xuất từ DEM 12,5m, độ phân giải chưa phản ánh đầy đủ độ dốc thực tế của taluy đường đào mà thiên về độ dốc sườn núi tổng thể xung quanh. Do đó, mức đóng góp cao của độ dốc theo SHAP phản ánh tương quan thống kê với dữ liệu độ dốc ở quy mô địa hình rộng, cần được xem xét thận trọng khi diễn giải vai trò của độ dốc taluy cụ thể trong cơ chế phát sinh trượt đất đá.

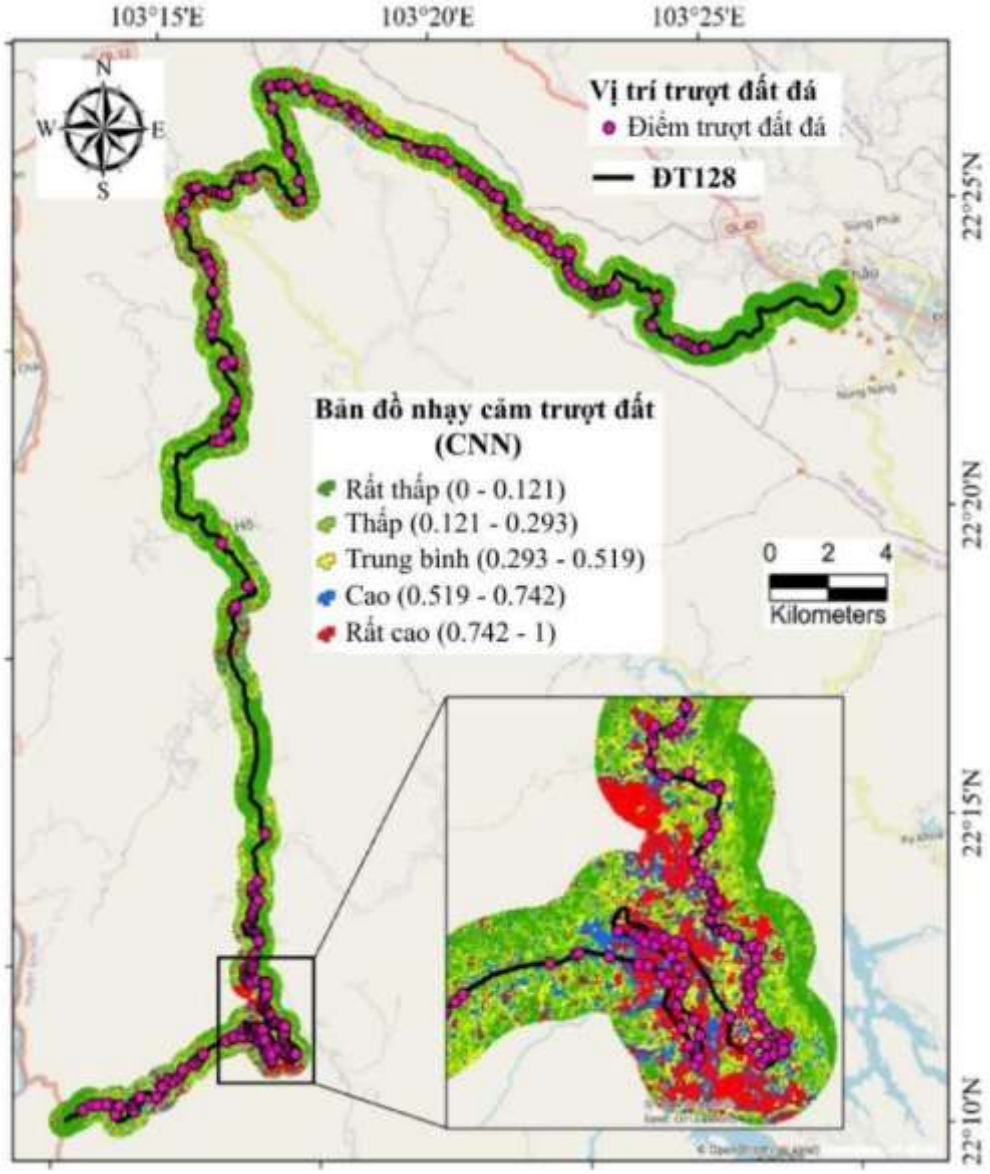
Thành phần địa chất và độ cong địa hình cũng thể hiện mức đóng góp thống kê đáng kể, mặc dù giá trị SHAP trung bình thấp hơn so với chỉ số thực vật và độ dốc. Mức đóng góp của yếu tố địa chất cũng cần được xem xét trong bối cảnh dữ liệu đầu vào được xây dựng từ bản đồ địa chất tỷ lệ 1:200.000, độ phân giải thô hơn đáng kể so với các yếu tố còn lại (12,5m, mục 3.2.2.2), nên chưa phản ánh đầy đủ mức độ biến đổi thạch học chi tiết dọc hành lang tuyến nghiên cứu. Các yếu tố như lượng mưa lớn nhất, khoảng cách đến đứt gãy, lượng mưa trung bình năm, cao độ, hướng dốc, chỉ số độ ẩm địa hình, khoảng cách đến sông suối, tích lũy dòng chảy, và chỉ số sức mạnh dòng chảy có mức đóng góp thống kê thấp hơn khi xét riêng lẻ. Tuy nhiên, các yếu tố này có thể tạo ra tác động lớn hơn khi kết hợp với nhau, cho thấy sự tương tác phức tạp giữa các yếu tố ảnh hưởng đến kết quả dự báo của mô hình [102, 104, 120].

Đáng chú ý, hai yếu tố mưa (lượng mưa trung bình năm, lượng mưa lớn nhất) có mức đóng góp SHAP thấp trong mô hình. Một phần nguyên nhân là các bản đồ mưa được xây dựng từ số liệu khí hậu mang tính thống kê dài hạn theo năm, đại diện cho mức mưa cực đoan đặc trưng của từng khu vực khí hậu, chứ không phải lượng mưa thực đo của một trận mưa cụ thể - được phân loại thành số lớp giá trị hạn chế (2–4 lớp, Phụ lục 2), dẫn đến mức độ biến thiên không gian giữa các điểm ảnh trong phạm vi hẹp của tuyến nghiên cứu rất thấp so với các yếu tố địa hình như độ dốc hay chỉ số thực vật. Đồng thời, dù đã phản ánh phần nào tính cực đoan của mưa, đây là số liệu mưa thống kê dài hạn mang tính khí hậu học, không phải số liệu mưa thời gian thực tại thời điểm xảy ra trượt, trong khi trượt đất đá thường được kích hoạt bởi một trận mưa cụ thể xảy ra ngay trước thời điểm trượt. Do đó, mức đóng góp SHAP thấp của yếu tố mưa chỉ phản ánh hạn chế về độ phân giải không gian và thời gian của dữ liệu đầu vào trong mô hình phân vùng ở Chương 3, hoàn toàn không đồng nghĩa với việc mưa, kể cả mưa cực trị trong 24 giờ, có vai trò kích hoạt thấp đối với trượt đất đá.

Nhìn chung, kết quả phân tích SHAP cho thấy mật độ thảm thực vật và độ dốc địa hình là hai yếu tố có mức đóng góp thống kê cao nhất đến khả năng dự báo của mô hình đã sử dụng. Cần khẳng định rõ: chỉ số thực vật và độ dốc chủ yếu đóng vai trò là các yếu tố điều kiện nền, phản ánh đặc điểm tĩnh của địa hình, trong khi yếu tố kích hoạt - cụ thể là mưa lớn kéo dài mới là nguyên nhân trực tiếp quyết định thời điểm phát sinh trượt đất đá. Hai vai trò này không mâu thuẫn mà bổ sung cho nhau trong việc lý giải đầy đủ cơ chế phát sinh TĐN tại khu vực nghiên cứu.

3.2.4.4. Lập bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá khu vực nghiên cứu

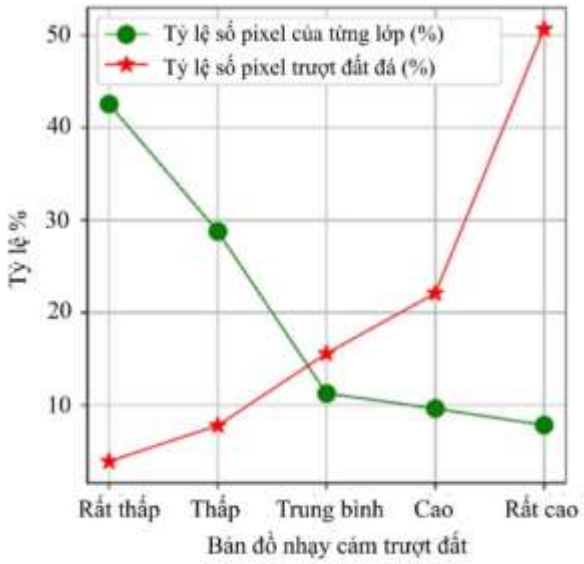
Mô hình CNN được chọn sử dụng để phân vùng nguy cơ trượt đất đá cho tuyến ĐT128. Bản đồ được chia thành năm cấp độ và thể hiện bằng màu sắc biểu thị cho các mức độ nhạy cảm khác nhau đối với trượt đất đá gồm: rất thấp (0-0,121); thấp (0,121-0,293); trung bình (0,293-0,519); cao (0,519-0,742); và rất cao (0,742-1) (Hình 3.11). Kết quả phân tích cho thấy khoảng 42% chiều dài tuyến đường nghiên cứu nằm trong vùng có mức độ nhạy cảm trượt đất rất thấp. Phần còn lại có 29%, 11%, 10% và 8% chiều dài tuyến đường lần lượt được phân loại vào các mức nhạy cảm thấp, trung bình, cao và rất cao (Hình 3.12).



Hình 3.11. Phân vùng nguy cơ trượt đất đá dọc tuyến ĐT128

Mặt khác, kết quả phân tích chỉ ra một xu hướng rõ ràng tỷ lệ các điểm ảnh trượt tăng dần theo mức độ nhạy cảm trượt đất đá. Lớp nhạy cảm rất cao tuy chiếm tỷ lệ diện tích nhỏ nhưng lại tập trung phần lớn các điểm ảnh trượt đất. Điều này chứng tỏ mô hình đã phân

định hiệu quả các khu vực có nguy cơ trượt đất đá cao dựa trên các dữ liệu lịch sử. Mối quan hệ nghịch giữa phân bố diện tích và phân bố trượt đất là bằng chứng quan trọng khẳng định độ tin cậy của bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá được xây dựng.



Hình 3.12. Phân tích phân bố các lớp nhạy cảm và mật độ trượt đất đá

Trên bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá (Hình 3.11), dễ nhận thấy đoạn tuyến từ Chăn Nưa - Sìn Hồ dài 20 km là khu vực tập trung mật độ cao các ô lưới có mức nhạy cảm "cao" và "rất cao", thể hiện qua sự xuất hiện dày đặc của các mảng màu xanh dương và đỏ trên bản đồ. Đáng chú ý, số lượng điểm trượt lịch sử ghi nhận trong đoạn tuyến này nhiều hơn đáng kể so với các đoạn tuyến khác, phản ánh sự tương thích cao giữa kết quả mô hình và thực tế khảo sát hiện trường. Điều này góp phần khẳng định độ tin cậy và khả năng phản ánh đúng quy luật không gian của mô hình CNN trong đánh giá nguy cơ trượt đất đá. Về đặc điểm địa hình, đoạn tuyến này đi qua khu vực taluy dương cao, độ dốc lớn, địa hình chia cắt mạnh, nhiều đoạn cua gấp và chịu tác động mạnh bởi dòng chảy mặt tập trung. Những yếu tố này kết hợp lại làm tăng quá trình xói mòn, suy giảm cường độ đất đá, phá vỡ cân bằng sườn dốc và là nguyên nhân chính thúc đẩy các hiện tượng TĐN, sạt lở và dòng chảy đất đá. Sự hội tụ đồng thời của các yếu tố bất lợi về địa hình, địa chất và điều kiện thủy văn khiến đoạn tuyến Chăn Nưa – Sìn Hồ trở thành khu vực có nguy cơ trượt đất đá cao nhất trên toàn tuyến ĐT128.

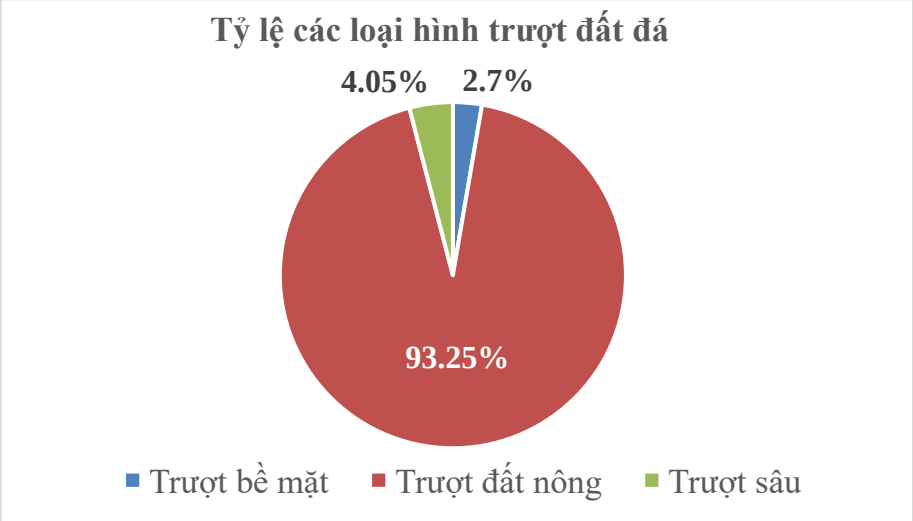
Do sự phân hóa phức tạp về địa chất, khí hậu trên toàn vùng MNTB, kết quả phân tích chi tiết tại đoạn tuyến này mang tính chất nghiên cứu điển hình, phản ánh đặc điểm chung của nhóm tuyến có điều kiện địa chất, địa hình tương tự; việc mở rộng kiểm chứng cho các tuyến có điều kiện khác biệt hơn là hướng nghiên cứu tiếp theo. Trên cơ sở đó, đoạn tuyến Chăn Nưa – Sìn Hồ được lựa chọn làm khu vực nghiên cứu điển hình để triển khai các phân tích chuyên sâu trong các nội dung tiếp theo của luận án.

3.3. Đặc điểm trượt đất nông đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ khu vực dọc tuyến ĐT128

3.3.1. Hiện trạng trượt đất nông đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ

3.3.1.1. Kết quả khảo sát hiện trạng

Khảo sát hiện trạng trượt đất đá đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ dài 20 km lần 2 được tiến hành vào tháng 3/2024. Kết quả ghi nhận 74 điểm trượt đất đá các loại, thông tin chi tiết mỗi điểm trượt được thống kê trong Phụ lục 3, Phụ lục 4. Sử dụng phân loại trượt đất theo độ sâu mặt trượt của Xavarenxkiy (1934) thì trong 74 điểm trượt có 2 điểm trượt bề mặt, 69 điểm TĐN (mặt trượt – mặt lộ sau khi trượt < 5 m) và 3 điểm trượt sâu (mặt trượt > 5 m). Tỷ lệ các loại hình trượt đất như Hình 3.13. Như vậy TĐN trên đoạn tuyến Chăn Nưa – Sìn Hồ chiếm tỷ lệ chủ yếu (93,25%), các loại hình trượt đất khác chiếm tỷ lệ không đáng kể.

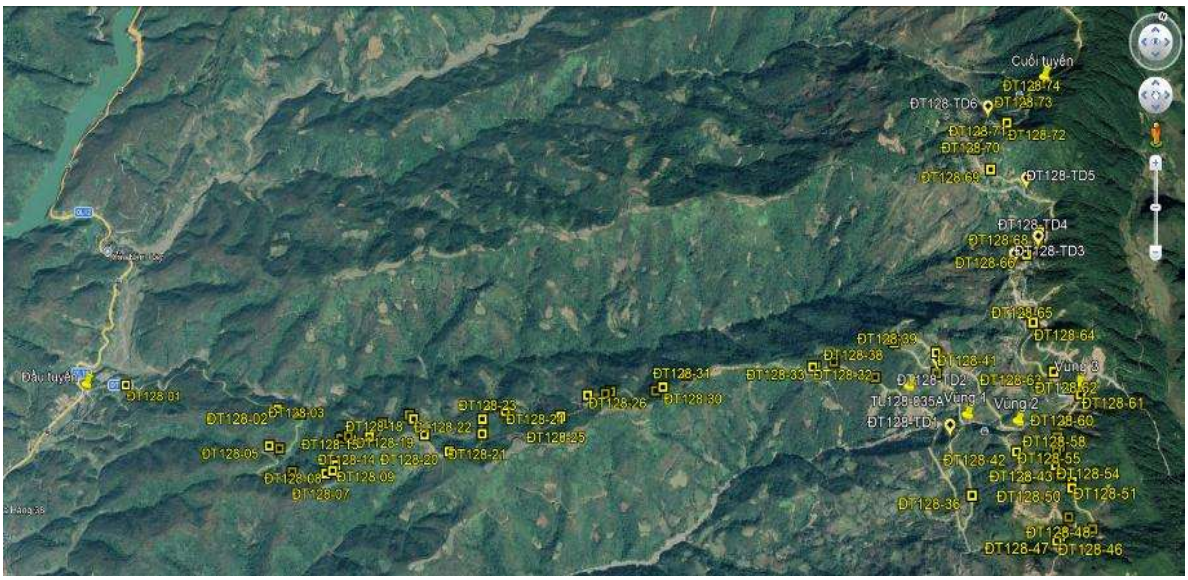


Hình 3.13. Tỷ lệ các loại hình trượt đất đá trên tuyến đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ

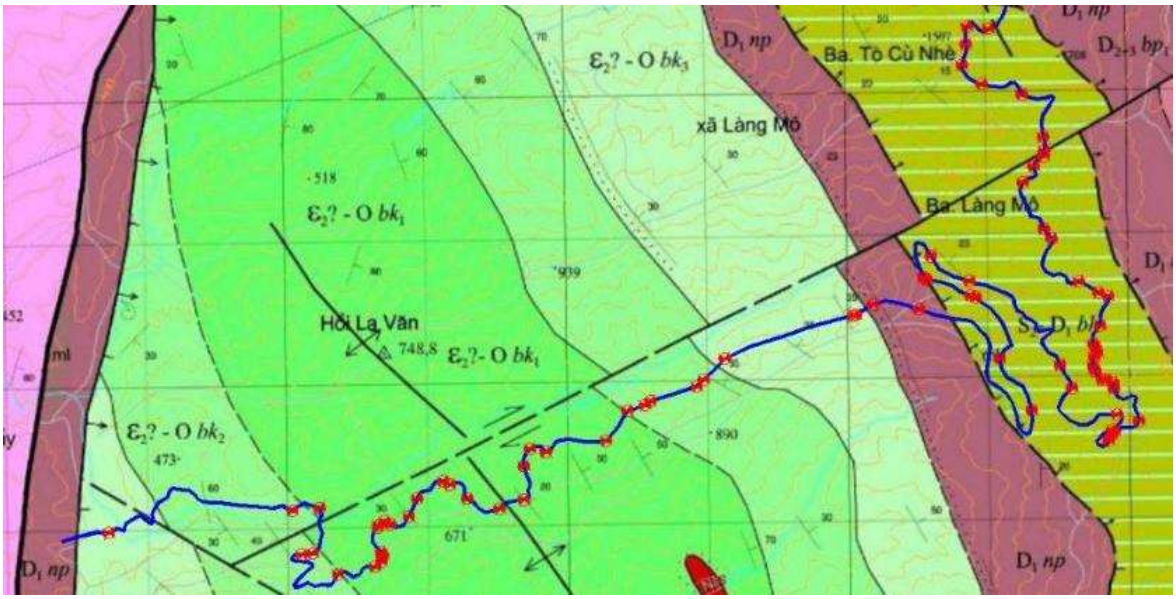
a) Mật độ trượt

Vị trí địa lý hiện trạng của các điểm TĐN đã được định vị chính xác trên nền ảnh vệ tinh Google Earth (Hình 3.14) và đồng thời hiển thị trên bản đồ địa chất khu vực tỷ lệ 1:50.000 (Hình 3.15). Việc kết hợp phân tích hình thái thực địa với đặc điểm địa chất giúp tăng độ tin cậy trong việc xác định mối liên hệ giữa TĐN và các điều kiện địa chất.

Trên nền bản đồ địa chất 1:50.000 (Hình 3.15), tuyến ĐT128 đoạn nghiên cứu điển hình đi qua 5 đơn vị tầng địa chất: hệ tầng Bến Khế - phụ hệ tầng dưới (ε_2?-O *bk*$_1$); hệ tầng Bến Khế - phụ hệ tầng giữa (ε_2?-O *bk*$_2$); hệ tầng Bến Khế - phụ hệ tầng trên (ε_2?-O *bk*$_3$); hệ tầng Nậm Pìa (D_1 *np*); hệ tầng Bó Hiềng (S_2-D_1 *bh*) . Tỷ lệ và mật độ TĐN tương ứng với từng hệ tầng địa chất được thống kê trong Bảng 3.9 và Hình 3.16, Hình 3.17.



Hình 3.14. Vị trí hiện trạng các điểm TĐN trên nền bản đồ Google Earth

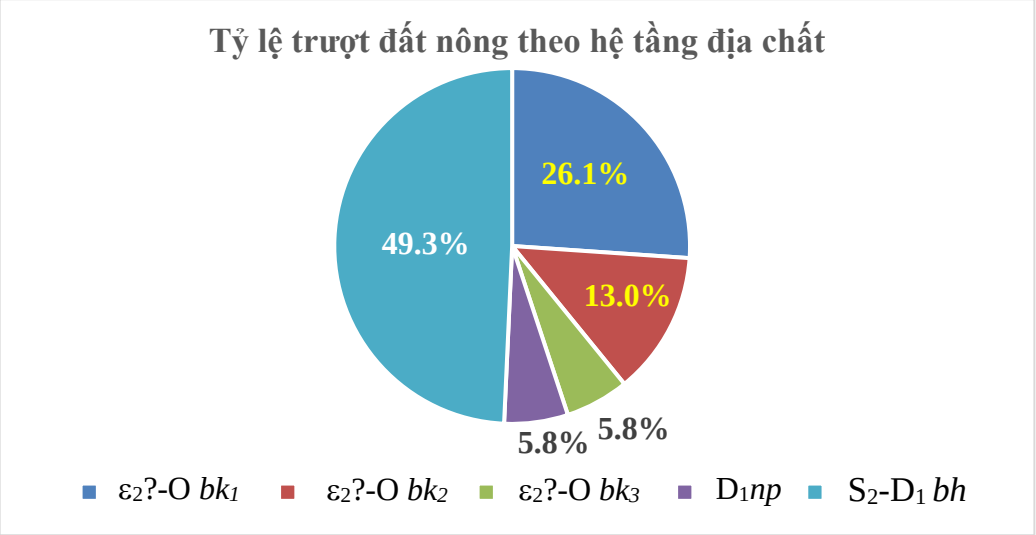


Hình 3.15. Vị trí các điểm TĐN trên bản đồ địa chất 1:50.000

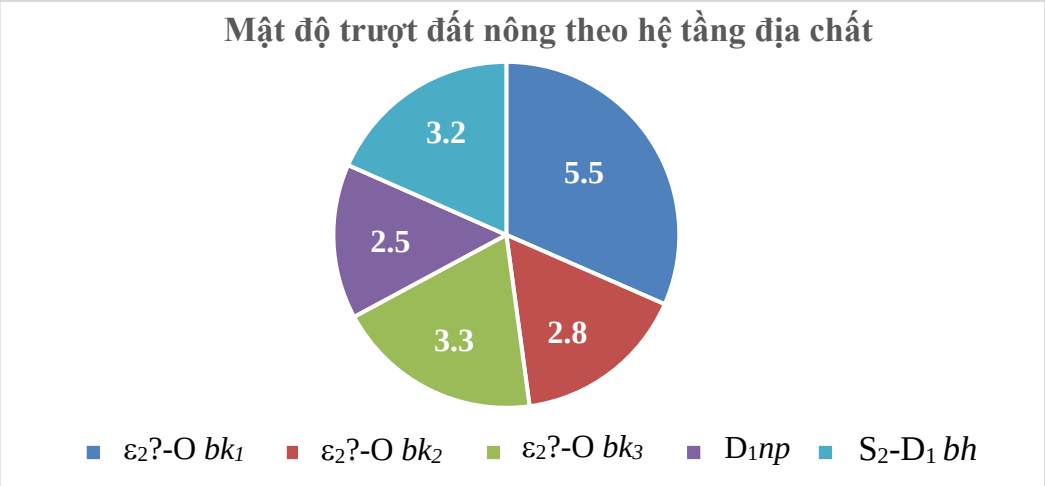
(Tờ bản đồ F-48-63-A (Bản Chiềng Chăn) – Nhóm tờ Lai Châu)

Bảng 3.9. Tỷ lệ và mật độ TĐN theo hệ tầng địa chất phạm vi nghiên cứu

TT	Ký hiệu hệ tầng địa chất	Số lượng (Điểm)	Tỷ lệ (%)	Chiều dài (km)	Mật độ (Điểm/km)
1	ε_2?-O *bk1*	18	26,1	3,3	5,5
2	ε_2?-O *bk2*	9	13,0	3,2	2,8
3	ε_2?-O *bk3*	4	5,8	1,2	3,3
4	D_1 *np*	4	5,8	1,6	2,5
5	S_2-D_1 *bh*	34	49,3	10,7	3,2
Tổng số		**69**	**100**	**20**	**3,45**



Hình 3.16. Tỷ lệ TĐN theo hệ tầng địa chất phạm vi nghiên cứu



Hình 3.17. Mật độ TĐN theo hệ tầng địa chất phạm vi nghiên cứu

Dựa trên phân tích từ Bảng 3.9, Hình 3.16 và Hình 3.17, mật độ TĐN trung bình trên tuyến ĐT128 đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ là 3,45 điểm/km. TĐN xuất hiện hầu hết trong các thành tạo địa chất có mặt trên tuyến đường đi qua, tuy nhiên mức độ phân bố và tỷ lệ điểm trượt có sự khác biệt đáng kể giữa các hệ tầng.

Hệ tầng Bó Hiềng với thành phần địa chất gồm đá vôi, đá phiến sét ghi nhận được số điểm TĐN nhiều nhất (34 điểm), chiếm 49,3% số lượng điểm TĐN trên toàn tuyến, với mật độ điểm trượt 3,2 điểm/km. Tiếp theo là hệ tầng Bến Khế - Phụ hệ tầng dưới có số lượng điểm TĐN đứng thứ 2 (18 điểm), chiếm 26,1% số lượng điểm TĐN trên toàn tuyến, mật độ điểm TĐN chiếm cao nhất trong các hệ tầng địa chất cắt qua là 5,5 điểm/km. Các hệ tầng địa chất còn lại chiếm số lượng điểm TĐN không đáng kể. Như vậy TĐN xuất hiện tập trung chủ yếu trong hệ tầng Bó Hiềng và hệ tầng Bến Khế - phụ hệ tầng dưới.

b) Quy mô khối trượt:

Các điểm TĐN trong khu vực nghiên cứu thể hiện sự đa dạng rõ rệt về quy mô, hình thái và cấu trúc. Trong đó, quy mô khối trượt được xác định theo thể tích vật liệu bị trượt và được phân nhóm nhằm phục vụ công tác thống kê, phân tích và so sánh trên toàn tuyến.

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp phân chia khoảng giá trị độc lập, dựa trên kết quả thống kê 69 điểm trượt thu thập dọc tuyến ĐT128 đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ. Việc xác định các ngưỡng thể tích được thực hiện trên cơ sở các cụm giá trị phổ biến, có sự phân tách rõ ràng và phản ánh đặc trưng địa hình - địa chất thực tế khu vực khảo sát.

Cụ thể, quy mô khối trượt được phân thành 5 nhóm như sau:

- Trượt quy mô rất nhỏ (M1): thể tích < 10 m^3;
- Trượt quy mô nhỏ (M2): thể tích từ 10 m^3 đến 100;
- Trượt quy mô trung bình (M3): thể tích từ 100 m^3 đến 1.000 m^3;
- Trượt quy mô lớn (M4): thể tích từ 1.000 m^3 đến 10.000 m^3;
- Trượt quy mô rất lớn (M5): thể tích > 10.000 m^3

Bảng 3.10. Thống kê điểm TĐN theo quy mô khối trượt và hệ tầng địa chất

TT	Hệ tầng	M1	M2	M3	M4	M5	Tổng số
1	ε_2?-O *bk*$_1$	2	6	7	3	-	18
2	ε_2?-O *bk*$_2$	-	5	4	-	-	9
3	ε_2?-O *bk*$_3$	-	2	2	-	-	4
4	D_1*np*	-	-	2	1	1	4
5	S_2-D_1 *bh*	-	7	20	7	-	34
Tổng số		**2**	**20**	**35**	**11**	**1**	**69**
Tỷ lệ (%)		**2,9**	**29,0**	**50,7**	**16,0**	**1,4**	**100**

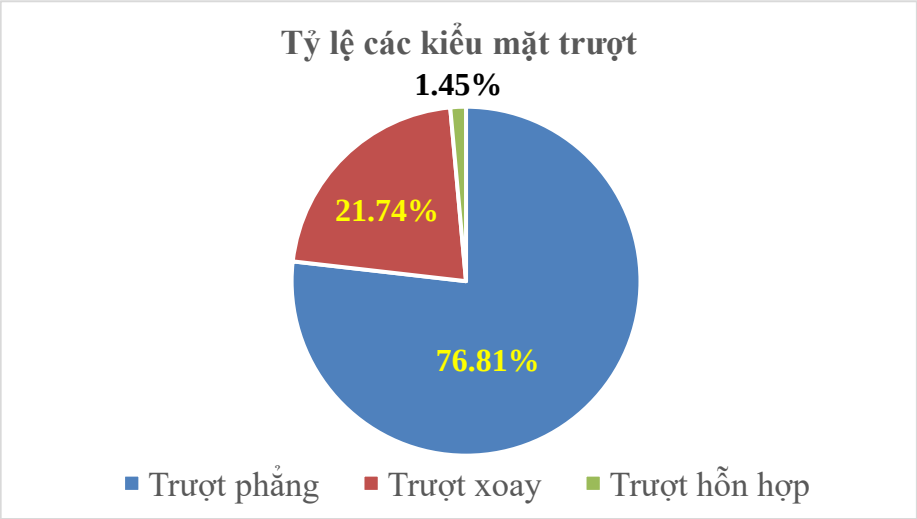
Thống kê quy mô khối trượt theo 5 nhóm thể hiện trong Bảng 3.10. Kết quả cho thấy sự phân bố không đều giữa các nhóm, phần lớn các điểm trượt tập trung ở nhóm quy mô nhỏ (M2-29%) và quy mô trung bình (M3-50,7%) - chiếm tỷ trọng cao nhất toàn tuyến.

c) Kiểu trượt

Kiểu trượt thường được phân loại dựa trên cơ chế chuyển động của khối trượt gồm: trượt xoay, trượt phẳng và trượt hỗn hợp. Dựa trên kết quả thống kê được trình bày trong Bảng 3.11 và minh họa bằng Hình 3.18, cho thấy: trượt phẳng là kiểu phổ biến nhất, chiếm 76,81% tổng số điểm TĐN trong phạm vi nghiên cứu; trượt xoay chiếm 21,74%, thường gắn với các sườn tích tụ đất phong hóa, độ dốc vừa phải; trượt hỗn hợp chỉ chiếm tỷ lệ nhỏ, không đáng kể với vật liệu trượt là hỗn hợp đất, đá.

Bảng 3.11. Thống kê điểm trượt theo kiểu trượt và quy mô khối trượt

TT	Quy mô	Trượt xoay	Trượt phẳng	Trượt hỗn hợp	Tổng số
1	M1	-	2	-	2
2	M2	-	20	-	20
3	M3	9	26	-	35
4	M4	5	5	1	11
5	M5	1	-	-	1
Tổng số		**15**	**53**	**1**	**69**
Tỷ lệ (%)		**21,74**	**76,81**	**1,45**	**100**



Hình 3.18. Tỷ lệ các kiểu trượt

d) Hình dạng khối trượt

Hình dạng khối trượt là một trong những yếu tố phản ánh trực tiếp cơ chế phát sinh, điều kiện địa chất, địa hình và đặc điểm lan truyền của hiện tượng trượt. Trong khu vực nghiên cứu, hình dạng khối trượt được nhận diện và phân loại chủ yếu thông qua khảo sát hiện trường kết hợp phân tích mô hình số độ cao (DEM), cho thấy sự đa dạng về hình thái. Một số hình dạng điển hình bao gồm:

- Hình vòng cung: Hình dạng cung trượt theo hình vòng cung.

- Hình dạng trên rộng, dưới hẹp: Hình dạng bên trên khối trượt thì rộng, bên dưới thì hẹp.

- Hình dạng trên hẹp, dưới rộng: Hình dạng bên trên khối trượt thì hẹp, bên dưới thì rộng.

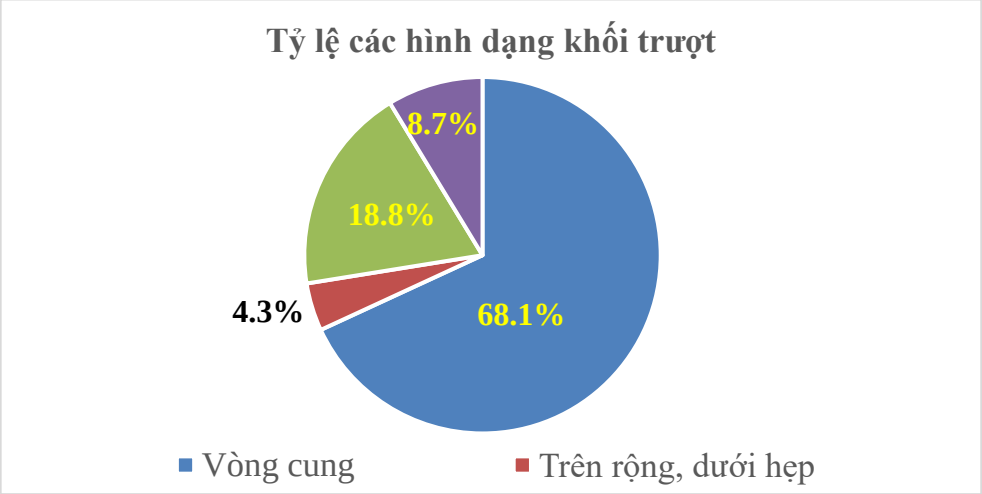
- Hình lưỡi dao: Các khối trượt kéo dài, hẹp và sâu, thường liên quan đến trượt theo khe nứt hoặc địa hình rãnh hẹp.

Kết quả thống kê số lượng điểm TĐN theo hình dạng khối trượt và hệ tầng địa chất trình bày trong Bảng 3.12, tỷ lệ phân bố các hình dạng thể hiện trực quan trong Hình 3.19. Phân tích cho thấy, dạng hình thái phổ biến nhất là hình vòng cung (68,1%), tập trung trong

hệ tầng địa chất Bó Hiềng (24 điểm) và hệ tầng Bến Khế - phụ hệ tầng dưới (14 điểm).

Bảng 3.12. Thống kê điểm TĐN theo hình dạng khối trượt và hệ tầng địa chất.

TT	Hệ tầng	Vòng cung	Trên rộng, dưới hẹp	Trên hẹp, dưới rộng	Lưỡi dao	Tổng số
1	ε_2?-O *bk*$_1$	14	-	3	1	18
2	ε_2?-O *bk*$_2$	3	1	5	-	9
3	ε_2?-O *bk*$_3$	3	1	-	-	4
4	D_1*np*	3	-	-	1	4
5	S_2-D_1 *bh*	24	1	5	4	34
Tổng số		**47**	**3**	**13**	**6**	**69**
Tỷ lệ (%)		**68,1**	**4,3**	**18,8**	**8,7**	**100**



Hình 3.19. Tỷ lệ các hình dạng khối TĐN

e) Chiều cao khối trượt

Chiều cao khối trượt (hoặc chiều cao thẳng đứng của khối trượt) là khoảng cách thẳng đứng giữa điểm cao nhất và điểm thấp nhất của khối trượt. Tương tự như phân loại quy mô khối trượt, các khoảng phân loại chiều cao khối trượt được xây dựng độc lập dựa trên tập hợp dữ liệu khảo sát thực địa tại 69 điểm trượt.

Theo đó, độ cao khối trượt phân thành 3 nhóm để xem xét, đánh giá ảnh hưởng của độ cao ứng với từng hệ tầng địa chất như sau:

– Chiều cao khối trượt nhỏ (H1): Khối trượt có chiều cao nhỏ hơn 5 m;

– Chiều cao khối trượt trung bình (H2): Khối trượt có chiều cao từ (5 – 10) m;

– Chiều cao khối trượt lớn (H3): Khối trượt có chiều cao trên 10 m;

Chiều cao khối trượt có sự dao động lớn, từ nhỏ đến lớn, thể hiện sự khác biệt rõ rệt giữa các dạng địa hình và cấu trúc địa chất. Kết quả thống kê số lượng điểm TĐN theo chiều cao khối trượt và hệ tầng địa chất đã được trình bày chi tiết trong Bảng 3.13.

Phân tích kết quả cho thấy, phần lớn các điểm TĐN tập trung chủ yếu ở chiều cao lớn

hơn 10 m (66,7%). Chiều cao này xuất hiện tập trung chủ yếu trong hệ tầng Bó Hiềng (22 điểm) và hệ tầng Bến Khế - Phụ hệ tầng dưới (12 điểm).

Bảng 3.13. Thống kê điểm TĐN theo chiều cao và hệ tầng địa chất

TT	Hệ tầng	H1	H2	H3	Tổng số
1	ε_2?-O *bk*$_1$	2	4	12	18
2	ε_2?-O *bk*$_2$	2	1	6	9
3	ε_2?-O *bk*$_3$	1	1	2	4
4	D_1 *np*			4	4
5	S_2-D_1 *bh*		12	22	34
Tổng số		**5**	**18**	**46**	**69**
Tỷ lệ (%)		**7,2**	**26,1**	**66,7**	**100**

f) Độ dốc địa hình

Thông thường khi trượt nằm nghiêng, góc mặt trượt tương đương với góc sườn dốc (độ dốc địa hình). Tương tự như phân loại chiều cao khối trượt, các khoảng phân loại độ dốc địa hình được xây dựng độc lập. Nghiên cứu sử dụng năm thang độ dốc để đánh giá và nghiên cứu quy luật phân bố các điểm trượt đất theo độ dốc địa hình như sau:

– Độ dốc địa hình D1: Độ dốc của sườn dốc $<20^0$

– Độ dốc địa hình D2: Độ dốc của sườn dốc $(20 - 30)^0$

– Độ dốc địa hình D3: Độ dốc của sườn dốc $(30 - 40)^0$

– Độ dốc địa hình D4: Độ dốc của sườn dốc $(40 - 50)^0$

– Độ dốc địa hình D5: Độ dốc của sườn dốc $> 50^0$

Kết quả thống kê số lượng điểm TĐN theo độ dốc địa hình và quy mô khối trượt trong Bảng 3.14. Các điểm TĐN trên tuyến đường tập trung nhiều nhất và chủ yếu vào các sườn dốc từ $(30 - 40)^0$ (58,0%). Các khối TĐN có quy mô nhỏ thường xảy ra ở khu vực có độ dốc địa hình $(20 - 40)^0$ (D2 và D3, 18 điểm) và quy mô trung bình xảy ra ở khu vực có độ dốc địa hình $(30 - 40)^0$ (D3, 21 điểm).

Bảng 3.14. Thống kê điểm TĐN theo độ dốc địa hình và quy mô khối trượt

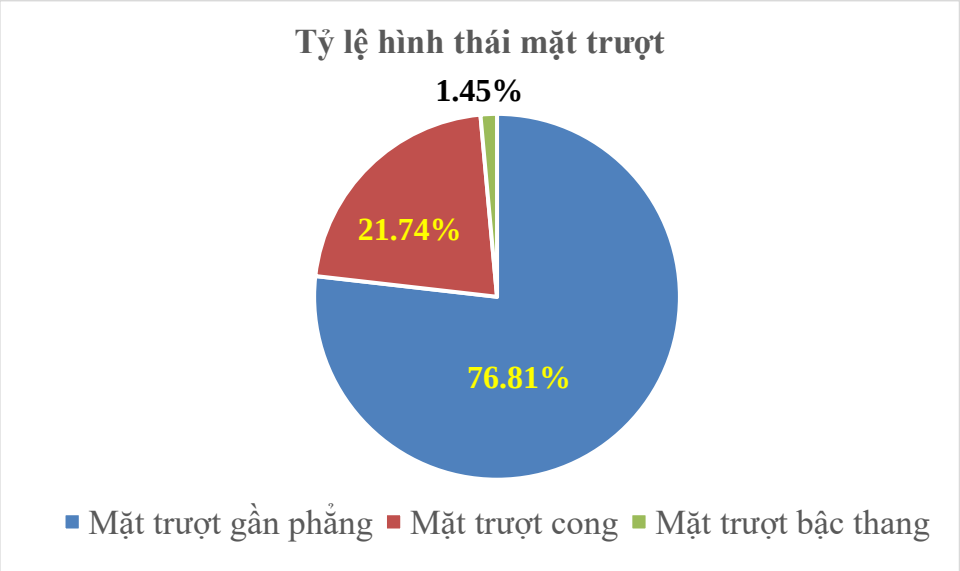
TT	Quy mô	D1	D2	D3	D4	D5	Tổng số
1	M1	-	1	1	-	-	2
2	M2	-	9	9	-	2	20
3	M3	-	8	21	6	-	35
4	M4	-	2	8	1	-	11
5	M5	-	-	1	-	-	1
Tổng số		**0**	**20**	**40**	**7**	**2**	**69**
Tỷ lệ (%)		**0**	**29,0**	**58,0**	**10,1**	**2,9**	**100**

g) Hình thái mặt trượt

Hình thái mặt trượt được phân loại dựa trên hình dạng bề mặt trượt và đặc điểm địa hình tại khu vực xảy ra trượt. Khu vực tuyến nghiên cứu có các hình thái mặt trượt phổ biến là mặt trượt gần phẳng, mặt trượt cong và mặt trượt bậc thang. Kết quả thống kê số lượng điểm TĐN theo hình thái mặt trượt và hệ tầng địa chất (Bảng 3.15), tỷ lệ hình thái mặt trượt (Hình 3.20). Các điểm trượt có hình thái mặt trượt gần phẳng là chủ yếu (76,81%), tập trung trong hệ tầng địa chất Bó Hiềng (22 điểm) và hệ tầng Bến Khế - Phụ hệ tầng dưới (18 điểm).

Bảng 3.15. Thống kê điểm trượt theo hình thái mặt trượt và hệ tầng địa chất.

TT	Hệ tầng	Mặt trượt gần phẳng	Mặt trượt cong	Mặt trượt bậc thang	Tổng số
1	ε_2?-O *bk*$_1$	18	-	-	18
2	ε_2?-O *bk*$_2$	9	-	-	9
3	ε_2?-O *bk*$_3$	4	-	-	4
4	D$_1$*np*	-	3	1	4
5	S$_2$-D$_1$ *bh*	22	12	-	34
Tổng số		**53**	**15**	**1**	**69**
Tỷ lệ (%)		**76,81**	**21,74**	**1,45**	**100**



Hình 3.20. Tỷ lệ các hình thái mặt trượt phạm vi nghiên cứu điển hình

3.3.1.2. Sơ đồ địa chất công trình với hiện trạng trượt đất nông đoạn tuyến nghiên cứu

Kết quả khảo sát thực địa đợt 3/2024 kết hợp tài liệu thu thập, đã ghi nhận trong cùng một hệ tầng Bó Hiềng – Hệ tầng có tỷ lệ TĐN cao nhất trên tuyến nghiên cứu (dài 10,7 km dọc tuyến) đặc điểm thạch học có sự thay đổi hay chuyển tập địa tầng nhiều. Cùng hệ tầng theo bản đồ địa chất 1:200.000 nhưng thể hiện rõ 6 vị trí thay đổi đặc điểm thạch học trên

thực địa, thể hiện tại các điểm lộ khảo sát ĐT128-TD1, ĐT128-TD2, ĐT128-TD3, ĐT128-TD4, ĐT128-TD5, ĐT128-TD6 (Bảng 3.16).

Bảng 3.16. Thành phần thạch học tại một số điểm lộ trong hệ tầng Bó Hiềng trên tuyến nghiên cứu điển hình

TT	Điểm đầu	Điểm cuối	Thành phần thạch học	Đặc điểm lớp phong hóa	Đoạn tuyến
1	km9+230	km11+000	Đá vôi, sét vôi	Sét bột kết lẫn đá vụn	Đầu tuyến ÷ TD1
2	km11+000	km11+600	Đá phiến sét	Sét bột kết	TD1 ÷ TD2
3	km11+600	km17+750	Đá sét vôi kẹp đá phiến sét	Sét bột kết, cát kết	TD2 ÷ TD3
4	km17+750	km18+020	Đá phiến sét, cát kết, bột kết	Sét bột kết, nhiều đá vụn	TD3 ÷ TD4
5	km18+020	km18+700	Đá vôi phân lớp dày, sét vôi	Sét bột kết, kèm mảnh vụn	TD4 ÷ TD5
6	km18+700	km19+520	Đá vôi, sét vôi	Sét bột kết, nhiều đá vụn	TD5 ÷ TD6
7	km19+520	km19+960	Đá phiến sét, cát kết, bột kết	Sét bột kết, kèm mảnh vụn	TD6 ÷ Cuối tuyến

Kết quả nghiên cứu cho thấy, mặc dù số hệ tầng địa chất không nhiều nhưng phân bố thành phần thạch học dọc tuyến đa dạng và biến đổi phức tạp. Đặc biệt tại các vị trí chuyển tiếp bao gồm đá vôi, sét vôi, đá phiến sét, đá cát kết và bột kết. Ví dụ, đoạn km9+230–km11+000 là đá vôi và sét vôi, đặc điểm lớp phong hóa chủ yếu là sét bột kết lẫn đá vụn; trong khi đoạn km11+000–km11+600 chủ yếu là đá phiến sét với lớp phong hóa sét bột kết. Sự đa dạng thành phần thạch học không chỉ cho thấy điều kiện địa chất phức tạp tại khu vực này mà còn thể hiện sự vò nhàu và mức độ phong hóa cũng có sự biến đổi mạnh.

Trên nền bản đồ địa chất 1:50.000 và các điểm thay đổi thành phần thạch học trong hệ tầng Bó Hiềng (Bảng 3.16), tiến hành lập sơ đồ địa chất công trình tỷ lệ 1:20.000 có thể hiện tuyến đường nghiên cứu điển hình và 69 điểm TĐN đã khảo sát được (Phụ lục 6). Từ 69 điểm TĐN lựa chọn được 8 vị trí đại diện cho các thành phần thạch học tuyến đường cắt qua để xây dựng mặt cắt nghiên cứu chi tiết (Phụ lục 7).

Sơ đồ địa chất công trình được xây dựng trên cơ sở tổng hợp kết quả khảo sát thực địa, tài liệu địa chất khu vực và các kết quả thí nghiệm đặc trưng cơ lý của đất đá. Trên sơ đồ thể hiện chi tiết sự phân bố các hệ tầng địa chất, đặc điểm thạch học, cấu trúc tầng phủ phong hóa có liên quan. Đồng thời, việc tích hợp các thông tin về tính chất cơ lý của đất

đá với vị trí các điểm TĐN cho phép làm rõ mối liên hệ giữa đặc điểm địa chất công trình với mật độ trượt, hình thái mặt trượt và quy mô khối trượt trong khu vực nghiên cứu.

3.3.2. Mối liên hệ lượng mưa với trượt đất nông

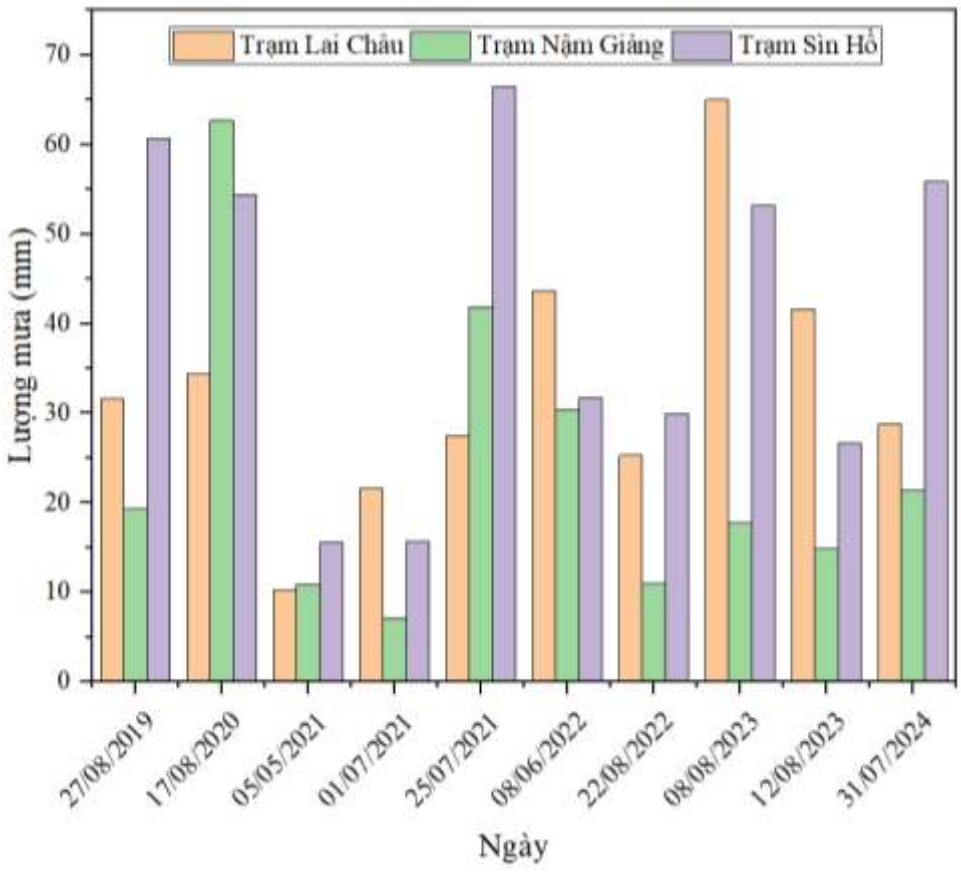
Kết quả điều tra và thống kê giai đoạn 2019-2024 [12-15, 26, 30, 31] cho thấy, TĐN trên tuyến nghiên cứu điển hình có mối quan hệ chặt chẽ với yếu tố mưa trong mỗi mùa mưa (Bảng 3.17):

Bảng 3.17. Tổng hợp sự kiện TĐN giai đoạn 2019 - 2024

STT	Thời gian xảy ra	Vị trí	Quy mô (m^3)	Diễn biến và hậu quả
1	28/8/2019	km10+230	300	Trượt đất dài 40 m, đường bị chia cắt hoàn toàn
		km17+250	25000	Sạt lở taluy dương, đất đá tràn lấp mặt đường gây ách tắc giao thông, xói lở nền đường
2	17/8/2020	km17+100	500	Trượt đất taluy dương sau đợt mưa lớn kéo dài, đất đá tràn mặt đường (lần 3) gây ách tắc giao thông (5h30')
		km17+250		Sạt lở taluy dương, đất đá tràn lấp mặt đường (lần 10) làm ách tắc giao thông, xói lở nền đường gây đứt một phần đường ĐT128
3	05/5/2021	km10+100	250	Trượt đất đá xuống mặt đường sau mưa lớn, giao thông ách tắc cục bộ
		km17+250	2000	Sạt lở đất đá xuống mặt đường sau mưa lớn, gây ách tắc giao thông, phá hủy ta luy âm nền đường
	01/7/2021	km17+230	8000	Trượt ta luy dương, đất đá lấp mặt đường, gây ách tắc giao thông cục bộ
	25/07/2021	km11+900	2000	Trượt taluy dương sau mưa lớn kéo dài, đất đá tràn xuống mặt đường gây tắc giao thông
4	08/6/2022	km3+150	300	Trượt đất ta luy dương gây ách tắc giao thông
		km19+820 ÷km19+915	450	Đất đá trượt xuống đường, rãnh dọc, nước tràn qua mặt đường, gây ách tắc giao thông, hư hỏng kết cấu mặt đường, phá hủy một phần nền đường và một phần rãnh dọc
	22/8/2022	km7+900	550	Đất đá trượt xuống mặt đường sau mưa lớn, gây ách tắc giao thông cục bộ
5	08/8/2023	km17+250	15500	Sụt trượt đất đá trên ta luy dương sau mưa lũ, liên tục xuất hiện dòng bùn đất đá chảy tràn lên mặt đường gây tắc giao thông, xói lở ta luy âm, mép xói ta luy âm ăn sâu vào mặt đường láng nhựa

	12/8/2023	km9+870	2235	Trượt đất đá từ taluy dương xuống mặt đường sau mưa kéo dài, lấp rãnh dọc gây ách tắc giao thông, tràn nước qua mặt đường gây hư hỏng mặt đường và phá hủy ta luy âm, trôi đốt cống ngang đường phía hạ lưu
		km10+300	7200	Xói lở đất đá dưới lòng cầu cạn Km10+300 khi mưa lớn, sụt trượt phần bê tông gia cố ốp mái mố và trụ cầu. Phạm vi sụt trượt ăn sâu vào nền và bệ móng trụ T1 và T2. Hư hỏng ốp mái tứ nón bên phải mố M1

Dựa trên dữ liệu mưa ngày tại các trạm quan trắc khí tượng thủy văn Lai Châu, Nậm Giàng và Sìn Hồ, kết quả phân tích cho thấy không có sự biến động lớn về tổng lượng mưa trung bình năm trong giai đoạn 2019–2024. Tuy nhiên, khi xét cụ thể đến các sự kiện TĐN được thống kê trong Bảng 3.17, có thể thấy lượng mưa ngày trên một sự kiện thay đổi đáng kể và biểu đồ Hình 3.21 cũng chỉ ra không có phân biệt rõ ràng trong toàn bộ khu vực nghiên cứu. Hầu hết các sự kiện trượt đất xảy ra trong khu vực có lượng mưa ngày từ mưa vừa đến mưa to, tức lượng mưa ngày dao động trong khoảng (30-100) mm. Đây cũng là khoảng ngưỡng mưa kích hoạt TĐN được đề xuất cho khu vực nghiên cứu.



Hình 3.21. Lượng mưa ngày trong các sự kiện trượt đất đá giai đoạn 2019-2024 (Nguồn: Tổng hợp từ số liệu của Đài khí tượng Thủy văn tỉnh Lai Châu)

3.3.3. Đặc trưng trượt đất nông đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ

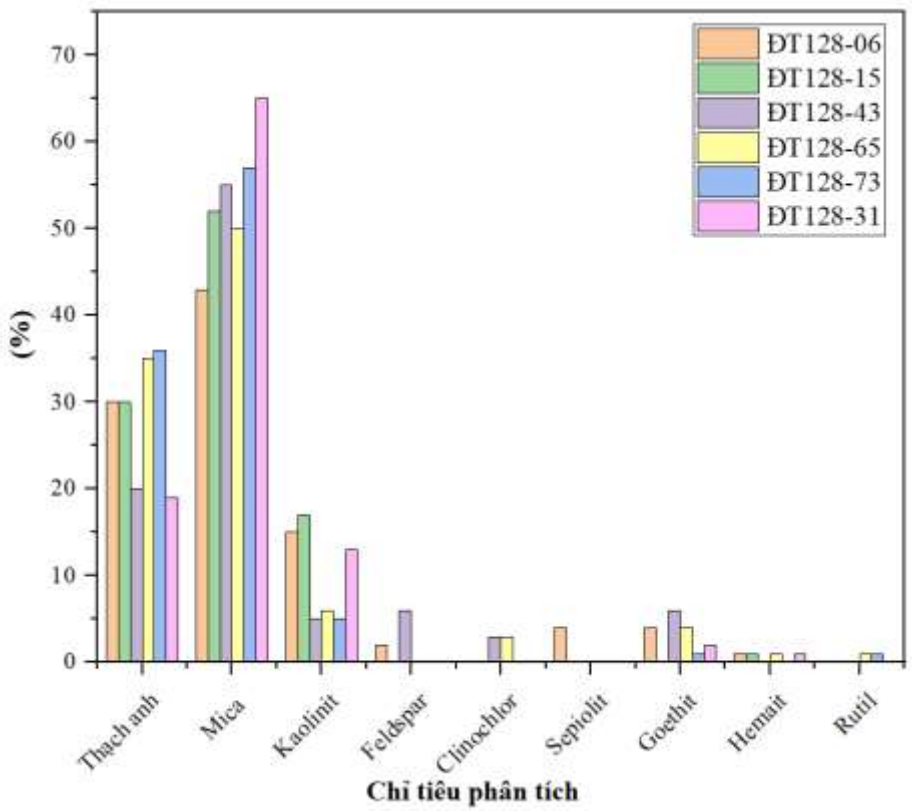
Đoạn tuyến ĐT128 lựa chọn nghiên cứu chi tiết theo kết quả phân cấp các vùng có nguy cơ trượt đất tại Mục 3.2 cắt qua các hệ tầng địa chất Bến Khế, Nậm Pìa và đặc biệt là Bó Hiềng. Thành phần thạch học chủ đạo bao gồm đá vôi, sét vôi, đá phiến sét, cát kết và bột kết, là các loại đá rất dễ phong hóa trong điều kiện khí hậu ẩm đặc trưng vùng Tây Bắc. Từ 69 điểm TĐN được khảo sát, 32 điểm được lựa chọn lấy mẫu đất tầng phủ thí nghiệm xác định một số chỉ tiêu cơ lý (xem Phụ lục 5). Trong số này, có 06 vị trí đại diện cho các hệ tầng địa chất tiến hành thí nghiệm xác định thành phần hóa học (Phụ lục 8) và thành phần khoáng vật của đất tầng phủ (Phụ lục 9).

Kết quả khảo sát và phân tích cho thấy, đất đá tầng phủ chủ yếu gồm sét, sét pha, lẫn mảnh vụn đá sét bột kết hay đá phiến phong hóa và dăm sạn, trạng thái cứng đến nửa cứng, bề dày khá lớn. Nguồn gốc phổ biến tàn tích, có chỗ sườn tích. Vật liệu tầng phủ có cấu trúc phân lớp không rõ ràng, không đồng nhất theo phương đứng và phương dọc tuyến, là một yếu tố bất lợi cho ổn định sườn dốc.

3.3.3.1. Vai trò thành phần vật chất tầng phủ phong hóa

Trong nghiên cứu này, thành phần khoáng vật và hóa học đất tầng phủ tại một số điểm TĐN điển hình được tiến hành phân tích nhằm xác định mối quan hệ sự xuất hiện trượt, đặc điểm hình thái và sự lặp lại trượt.

Phạm vi nghiên cứu, các khoáng vật xác định được rất đa dạng, gồm có: thạch anh; mica (muscovit+illit+phlogophit); kaolinit; feldspar; amphibol; clinochlor; sepiolit; goethit; hemait; rutil; gibbsit. Kết quả phân tích thành phần khoáng vật cho thấy: mica (muscovit+ illit+ phlogophit) chiếm hàm lượng lớn nhất (43–65)%, cao hơn đáng kể so với các khoáng vật sau đó; thạch anh (quartz) là khoáng vật chủ yếu thứ hai, chiếm hàm lượng (19–36)%; kaolinit chiếm khoảng (5–17)%; các khoáng vật phụ (feldspar, amphibol, clinochlor, sepiolit, goethit, hematit, rutil, gibbsit…) chiếm phần còn lại khá nhỏ (Phụ lục 9, Hình 3.22). Thành phần khoáng vật giàu mica và kaolinit, có mối liên hệ chặt chẽ với đặc điểm thạch học của các hệ tầng phân bố trong khu vực Bó Hiềng, Bến Khế và Nậm Pìa – nơi chủ yếu bao gồm đá phiến sét, sét vôi và cát bột kết phong hóa mạnh.



Hình 3.22. Thành phần khoáng vật đặc trưng đất phạm vi nghiên cứu

Khoáng vật mica trong đất là một nhóm các khoáng vật silicat phổ biến, có cấu trúc tinh thể dạng lớp, chứa các ion như kali, magiê, sắt và nhôm, và kém bề về độ cứng và độ ổn định với nước. Cấu trúc lớp của khoáng vật mica làm giảm ma sát, giảm liên kết giữa các lớp hạt đất, trực tiếp liên quan độ bền của đất hay chính là sức chống cắt của đất.

Một số nghiên cứu của Shi và nnk (2022) [159], Mu và nnk (2023) [131], Zhang và nnk (2019) [196] cũng đã xác nhận rằng, hàm lượng khoáng vật mica có mối quan hệ tỷ lệ nghịch với cường độ chống cắt của đất, chúng không chỉ làm giảm sức chống cắt của đất mà còn làm tăng tính tan rã và dễ xói mòn của đất. Ảnh hưởng của hàm lượng mica đến các tham số cường độ chống cắt là không đồng đều. Khi hàm lượng mica tăng, lực dính đơn vị (c) giảm mạnh theo hàm số mũ, góc ma sát trong (φ) chịu ảnh hưởng không đáng kể. Theo Shi và nnk (2022) [159], Mu và nnk (2023) [131], khi hàm lượng mica trong đất đạt mức (5–10)% thì đã bắt đầu ảnh hưởng giảm sức chống cắt của đất, và trên (10–20)% thì ảnh hưởng này rất rõ rệt, nhất là trong điều kiện đất bão hòa nước.

Những phân tích trên cho thấy, hiện tượng trượt phổ biến trong tầng phủ có mặt nhóm khoáng vật này tại các vị trí ĐT128-06, ĐT128-15, ĐT128-31, ĐT128-43, ĐT128-65, ĐT128-73 có liên hệ trực tiếp hàm lượng khoáng vật mica đã xác định được (43–65)%, phù hợp các nghiên cứu đã có, thuộc loại nhạy cảm sụt trượt [159, 131].

Thạch anh (SiO_2) là khoáng vật cứng và bền hóa học, nó cung cấp các hạt có kích thước lớn hơn (hạt cát và hạt bột), đóng vai trò là "bộ khung" giúp đất duy trì sức kháng cắt và độ bền cơ học ban đầu cho khối đất đá. Tuy nhiên, sự hiện diện của hàm lượng SiO_2 cao (44,5-61,8)% trong tầng đất phong hóa thường đi kèm với đặc tính thấm cao và khả năng liên kết hạt kém, tạo điều kiện cho quá trình thâm nhập nước diễn ra nhanh chóng. Khi nước xâm nhập, áp lực nước lỗ rỗng tăng cao làm suy giảm trực tiếp sức kháng cắt và ứng suất hiệu dụng, từ đó kích hoạt các biến dạng trượt đất đá [159]. Kết quả phân tích cũng xác nhận được rằng, tại các vị trí có hàm lượng SiO_2 cao, hiện tượng tái hoạt động trượt diễn ra thường xuyên hơn – đặc biệt tại các khu vực phân bố tầng phủ mỏng, giàu thạch anh, thuộc hệ tầng Bó Hiềng.

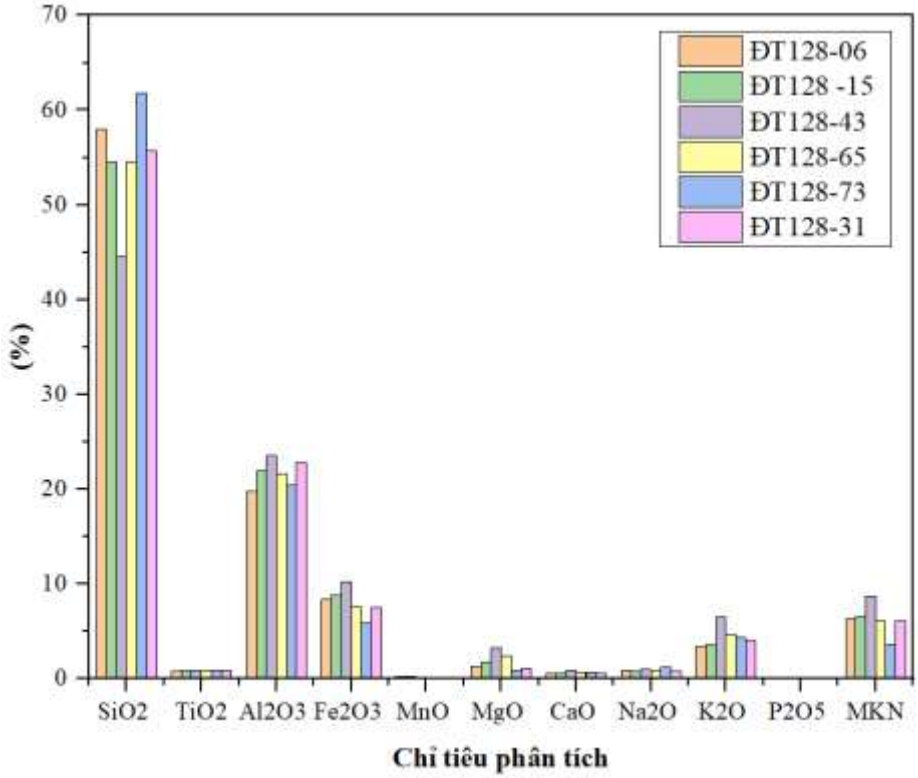
Quá trình phong hóa các đá giàu silic gắn liền sự hình thành nên các khoáng vật sét như kaolinit và illit [159]. Mặc dù kaolinit chỉ chiếm một phần trong thành phần hạt mịn, nhưng do kích thước hạt nhỏ và diện tích bề mặt riêng lớn, nó quyết định đáng kể đến các giới hạn danh định và khả năng hút nước của đất. Trong điều kiện độ ẩm cao, cấu trúc sét thúc đẩy tính dẻo và tạo lực liên kết tạm thời; tuy nhiên, dưới tác động của trạng thái bão hòa hoặc chu kỳ khô - ướt, lực dính đơn vị (c) bị suy giảm mạnh do sự phá hủy cấu trúc liên kết chuỗi trong hạt đất. Khi đó, các khoáng vật sét này đóng vai trò như một tác nhân bôi trơn tại các mặt trượt tiềm năng, làm giảm ma sát giữa các hạt khung cứng (như thạch anh) và đẩy nhanh tiến trình phá hủy mái dốc [159].

Kết quả phân tích thành phần khoáng vật phạm vi nghiên cứu điển hình phần nào cho thấy sự kết hợp giữa đặc tính giảm lực dính đơn vị của đất liên quan hàm lượng của mica cao, tính thấm mạnh của đất liên quan hàm lượng thạch anh khá lớn và hiệu ứng bôi trơn của kaolinit đã tạo nên một cấu trúc đất nhạy cảm với nước khi mưa.

Tương đồng với khoáng vật, khu vực nghiên cứu điển hình cũng xác định được thành phần hóa học có nhiều điểm đặc trưng với sự có mặt các oxit như SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, T-Fe_2O_3, MnO, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, SO_3, ZrO_2, Nd_2O_3 và MKN. Phân tích hóa học cho thấy SiO_2 chiếm tỷ lệ lớn nhất (44,5-61,8)%, tiếp theo là Al_2O_3 (19,8-23,5)% và Fe_2O_3 (5,9-10,2)%, các oxit còn lại (TiO_2, MgO,…) chiếm rất ít (Phụ lục 8, Hình 3.23).

Oxit silic SiO_2 trong đất, thể hiện sự có mặt phổ biến của khoáng vật thạch anh ảnh hưởng trực tiếp đến độ bền và tính thấm của đất. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm của Solórzano-Blacio và Albuja-Sánchez (2025) [164], Thapa và nnk (2025) [171]) đã chỉ ra rằng, đất có hàm lượng SiO_2 cao thường có cường độ cao ở điều kiện khô nhưng khi đất

bão hòa nước thì sức kháng cắt lại giảm nhanh.



Hình 3.23. Thành phần hóa học đặc trưng đất phạm vi nghiên cứu

Ô xít Al_2O_3 liên quan tới sự có mặt các khoáng aluminasilicat (như kaolinit, illit). Hàm lượng Al_2O_3 cao, đất chứa nhiều kaolinit hay các khoáng sét khác, khi đó làm tăng tính dẻo nhưng cũng tăng khả năng giữ nước. Khi đất giàu alumina bị bão hòa, các lớp kaolinit trượt lên nhau làm giảm sức kháng cắt (tương tự ảnh hưởng của mica) [167].

Oxit sắt (Fe_2O_3) trong đất thường tồn tại dưới dạng hematit, goethit phủ lên hạt khoáng, có tác dụng kết dính tạm thời. Trong điều kiện phong hóa mạnh, các oxit và hydroxit sắt bị hòa tan và rửa trôi dần, làm suy giảm lớp vật liệu gắn kết tự nhiên giữa các hạt đất. Sự suy giảm này dẫn đến mất ổn định cấu trúc đất, làm giảm lực dính kết và tăng tính rời rạc, từ đó làm đất dễ mất ổn định khi chịu tác động của nước [157].

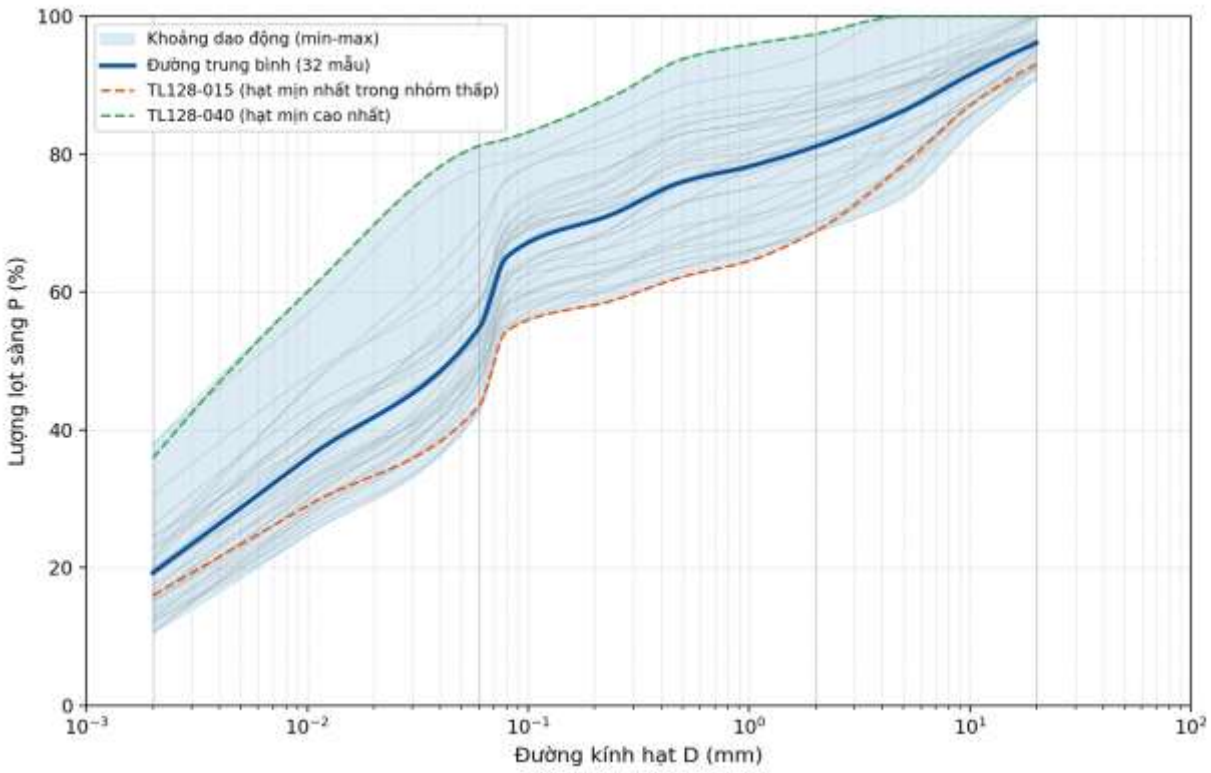
So sánh mật độ và vị trí các điểm trượt đất đã khảo sát (Hình 3.14, Bảng 3.9) cho thấy sự xuất hiện các điểm TĐN tập trung chủ yếu trong khu vực có tầng phủ phong hóa dày phát triển trên các hệ tầng đá gốc giàu silic và aluminosilicat, tương đồng với sự gia tăng hàm lượng các oxit SiO_2, Al_2O_3 và Fe_2O_3 trong thành phần hóa học của đất (Hình 3.22, 3.23 và các phụ lục 8, 9).

3.3.3.2. Đặc trưng vật lý đất tầng phủ

Trong nghiên cứu này, lấy 32 mẫu tại các vị trí TĐN để tiến hành phân tích một số

đặc trưng vật lý của đất, cụ thể gồm: độ ẩm, khối lượng riêng hạt đất, giới hạn chảy, giới hạn dẻo, chỉ số dẻo (Phụ lục 5).

Để làm rõ hơn đặc tính phân bố cỡ hạt của lớp đất tầng phủ, đường cong thành phần hạt của 32 mẫu đất đã thí nghiệm (Phụ lục 5) được tổng hợp và trình bày trên Hình 3.24. Kết quả cho thấy các đường cong có hình dạng và độ dốc tương đối đồng nhất, phản ánh nguồn gốc phong hóa tại chỗ (tàn tích/sườn tích) của vật liệu tầng phủ trên toàn tuyến. Hàm lượng hạt mịn nói chung (D<0,08mm, gồm bụi và sét) dao động (54,4–82,2)% (trung bình 65,1%), trong đó hàm lượng hạt sét (D<0,002mm) dao động trong khoảng (10,6–38,0)% (trung bình 19,3%) và hạt bụi dao động (33,8–56,0)% (trung bình 45,8%). Như vậy vật liệu tầng phủ có cấu trúc phân lớp không rõ ràng, không đồng nhất theo phương dọc tuyến đã nêu ở phần trên. Đặc tính thành phần hạt mịn chiếm ưu thế và biến động mạnh giữa các vị trí liền kề là cơ sở trực tiếp cho việc áp dụng phương pháp dự báo đường cong SWCC từ đường cong thành phần hạt theo mô hình Arya và Paris (1981) đã trình bày ở Chương 2. Kết quả đường cong thành phần hạt tổng hợp tại mục này, cùng các chỉ tiêu cơ lý liên quan, sẽ được sử dụng làm số liệu đầu vào để xây dựng đường cong SWCC và triển khai mô phỏng thấm không bão hòa, phân tích ổn định mái dốc trình bày ở Chương 4.



Hình 3.24. Đường cong thành phần hạt tổng hợp từ 32 mẫu đất tầng phủ dọc tuyến ĐT128 (Phụ lục 5)

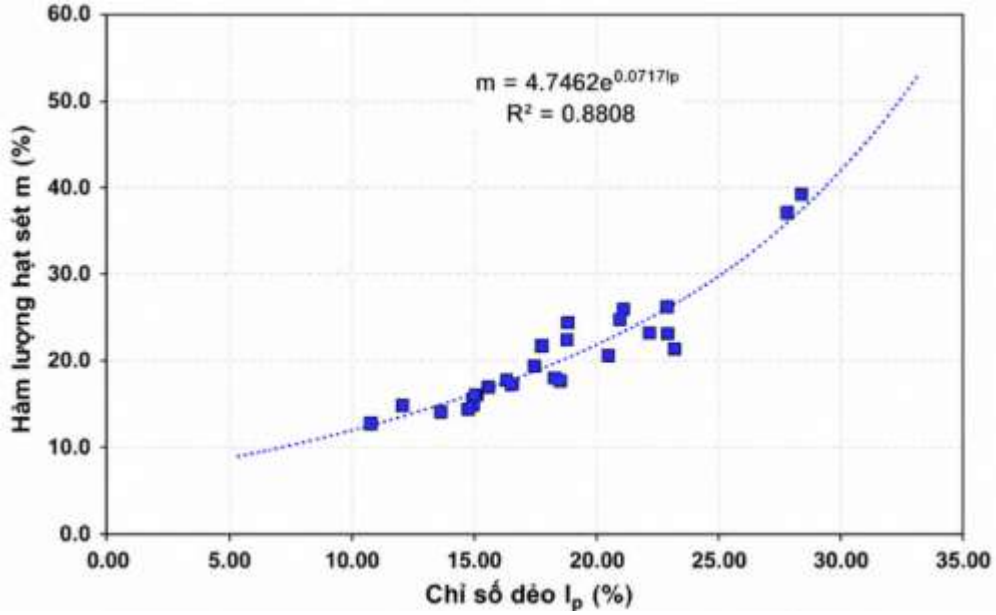
Hệ số thấm bão hòa (K) của lớp đất tầng phủ được xác định thông qua thí nghiệm trong phòng tại 3 vị trí lấy mẫu (ĐT128-22, ĐT128-37, ĐT128-60), với giá trị lần lượt là $1{,}10\times10^{-5}$ m/s, $0{,}97\times10^{-5}$ m/s và $0{,}83\times10^{-5}$ m/s.

Cùng với đó, kết quả xác định các giới hạn Atterberg của các mẫu đất cũng cho thấy sự phân tán khá lớn. Các giới hạn chảy (W_L), giới hạn dẻo (W_P) và chỉ số dẻo (I_P) lần lượt nằm trong khoảng (25-60)%, (14–32)% và (11-28)% (Phụ lục 4).

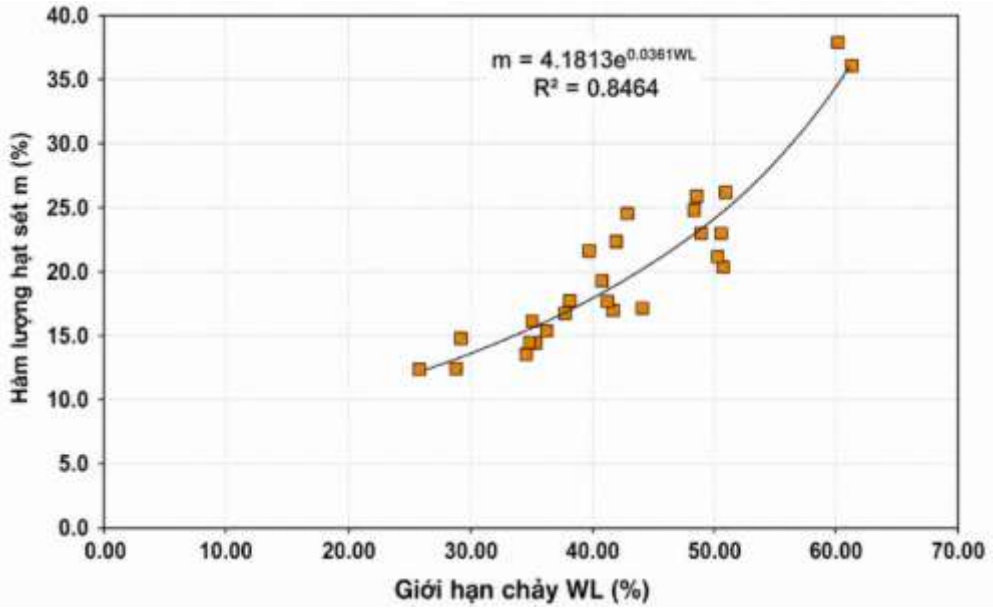
Theo Tzampoglou và nnk (2025) [174], Xu và nnk (2018) [191], hàm lượng sét và các chỉ số Atterberg đóng vai trò quan trọng trong phát sinh và cơ chế TĐN. Đất có hàm lượng sét cao (>25%) và chỉ số dẻo lớn (I_P > 20%) thường có khả năng giữ nước cao, dẫn đến suy giảm cường độ cắt đáng kể khi bão hòa.

Thí nghiệm của Soibam và Mangi (2024) [163], Bhadiyadra và Ong (2024) [45] cũng chỉ ra rằng, đất có hàm lượng hạt mịn tăng từ 20% lên (40-60)% làm giảm khả năng thấm, tăng nguy cơ bão hoà nước, giảm sức chống cắt và thường nhạy cảm với trượt hơn.

Phân tích hồi quy phi tuyến được thực hiện để thiết lập mối quan hệ giữa hàm lượng hạt sét (m%) với Ip và W_L. Các tác giả Zeng và nnk 2020 [195], Spagnoli và nnk 2019 [165] nghiên cứu mối quan hệ giữa tính chất vật lý và cơ học của đất, mô hình hàm mũ được lựa chọn m = A × e^(B×X), trong đó X là Ip hoặc W_L, A và B là hệ số hồi quy. Hệ số xác định R^2 được sử dụng để đánh giá độ phù hợp của mô hình. Kết quả phân tích cho thấy mối tương quan hàm mũ mạnh giữa hàm lượng sét (m), chỉ số dẻo (Ip) (Hình 3.25) và giữa hàm lượng sét (m), giới hạn chảy (W_L) (Hình 3.26).



Hình 3.25. Tương quan giữa hàm lượng hạt sét m và chỉ số dẻo Ip



Hình 3.26. Tương quan giữa hàm lượng hạt sét m và giới hạn chảy W_L

Kết quả phân tích kết hợp với thực trạng khảo sát cho thấy, sự có mặt với mật độ TĐN cao và sự lặp lại trượt nhiều tại các vị trí thuộc hệ tầng Bó Hiềng. Các vị trí này đặc trưng bởi đất phong hóa có hàm lượng hạt mịn cao (54,4–82,2)%, hàm lượng hạt sét chiếm (10,6–38)%, cùng với giới hạn chảy (W_L) dao động trong khoảng (25–60)%. Những đặc điểm này cho thấy vật liệu đất tại các khu vực trên có khả năng giữ nước cao và dễ suy giảm sức kháng cắt khi bão hòa, tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát sinh và phát triển TĐN.

3.4. Tóm tắt chương 3

Kết quả khảo sát một số tuyến QL và ĐT hiện hữu ở một vài tỉnh MNTB ghi nhận 643 điểm trượt đất đá các loại. Mật độ trượt và tỷ lệ số điểm TĐN không đồng nhất giữa các tuyến cũng như giữa các địa phương: mật độ trượt đất đá cao nhất (2,23 điểm/km) tại Lai Châu, thấp nhất tại Lào Cai (0,97 điểm/km), trung bình các tuyến nghiên cứu đạt 1,4 điểm/km; TĐN chiếm tỷ lệ lớn nhất trên các loại hình trượt trên toàn miền khảo sát (88,02%), cao nhất tại Lai Châu (92,73%), tiếp theo là Sơn La (88,0%) và thấp nhất ở Lào Cai (83,35%). Trong đó, tuyến ĐT128 tại Lai Châu có đặc điểm địa hình, địa chất, cấu trúc kiến tạo và thảm thực vật đặc trưng cho MNTB, đạt mật độ trượt (3,27 điểm/km) và tỷ lệ TĐN (96,6%) cao nhất trong các tuyến được điều tra, khảo sát được lựa chọn là tuyến nghiên cứu điển hình.

Từ nguồn dữ liệu 294 điểm trượt và 13 yếu tố liên quan (độ cao địa hình, hướng dốc, độ dốc, độ cong, chỉ số độ ẩm địa hình, chỉ số sức mạnh dòng chảy, tích lũy dòng chảy, địa chất, chỉ số thực vật, lượng mưa trung bình năm, lượng mưa lớn nhất, khoảng cách tới đứt

gãy, khoảng cách tới sông suối), sử dụng 4 mô hình học sâu CNN, RNN, DNN và LSTM dự báo thành công nguy cơ trượt đất đá trên tuyến ĐT128 được lựa chọn nghiên cứu điển hình. Kết quả dự báo của cả 4 mô hình lựa chọn nghiên cứu đều cho hiệu suất tốt cả giai đoạn đào tạo và xác thực, trong đó CNN là mô hình có hiệu suất cao nhất (AUC ≈ 0,92 giai đoạn đào tạo và AUC ≈ 0,88 giai đoạn xác thực). Từ kết quả dự báo, bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá được thành lập bằng mô hình CNN với độ chính xác chung cao nhất (80%), phân chia thành 5 cấp độ nhạy cảm trượt gồm rất thấp, thấp, trung bình, cao và rất cao. Kết quả phân tích bản đồ cho thấy khoảng 42% chiều dài tuyến nằm trong vùng có mức độ nhạy cảm trượt rất thấp, và lần lượt có 29%, 11%, 10% và 8% tuyến ở các mức nhạy cảm thấp, trung bình, cao và rất cao. Trên cơ sở đó, đoạn tuyến Chăn Nưa – Sìn Hồ (dài 20 km) cắt qua vùng địa hình chia cắt mạnh, sườn dốc lớn, với các hệ tầng địa chất Bến Khế, Bó Hiềng và Nậm Pìa nằm trong vùng nhạy cảm trượt cao và rất cao được lựa chọn để phân tích đặc điểm TĐN và đánh giá ảnh hưởng trực tiếp, gián tiếp của loại hình trượt này tới ổn định nền đường giao thông hiện hữu.

Khảo sát chi tiết đoạn tuyến Chăn Nưa – Sìn Hồ kết hợp thu thập số liệu bổ sung ghi nhận 74 điểm trượt đất đá, trong đó có 69 điểm TĐN (mặt trượt <5 m), 3 điểm trượt sâu và 2 điểm trượt bề mặt (mặt trượt <1 m). TĐN xuất hiện hầu hết trong các thành tạo địa chất có mặt trên tuyến đường cắt qua (93,25%), song tập trung chính ở hệ tầng Bó Hiềng (49,3%, 34/69 điểm), tiếp theo là hệ tầng Bến Khế - Phụ hệ tầng dưới (26,1%, 18/69 điểm), các hệ tầng địa chất còn lại chiếm số lượng điểm TĐN không đáng kể. Về quy mô và hình thái, đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ có 50,7% điểm trượt quy mô trung bình; phần lớn các điểm TĐN có chiều cao khối trượt trên 10 m (66,7%); tập trung nhiều ở các sườn dốc $(30\text{-}40)^0$ (58,0% số điểm TĐN); hình thái mặt TĐN chủ yếu dạng lõm hoặc gần phẳng (76,81%); hình dạng phổ biến của khối trượt là vòng cung (68,1%) với vật liệu đất kèm các mảnh vụn đặc trưng tầng phủ phong hóa trong khu vực.

Khu vực nghiên cứu có nhiều đặc trưng địa chất tầng phủ làm gia tăng nguy cơ TĐN. Đất tầng phủ chủ yếu là đất sét phong hóa giàu mica (43–65)%, có tỷ lệ SiO2 tương đối cao (44,5–61,8)% và hàm lượng hạt mịn chiếm ưu thế (54,4–82,2)%, trong đó hạt sét đạt (10,6–38)%. Các chỉ tiêu Atterberg cho thấy đất có tính dẻo từ trung bình đến khá cao (WL: (25–60)%, WP: (14–32)%, IP: (11–28)%), phản ánh khả năng giữ nước lớn và dễ suy giảm sức kháng cắt khi bão hòa, tạo điều kiện thuận lợi cho sự phát sinh TĐN.

CHƯƠNG 4

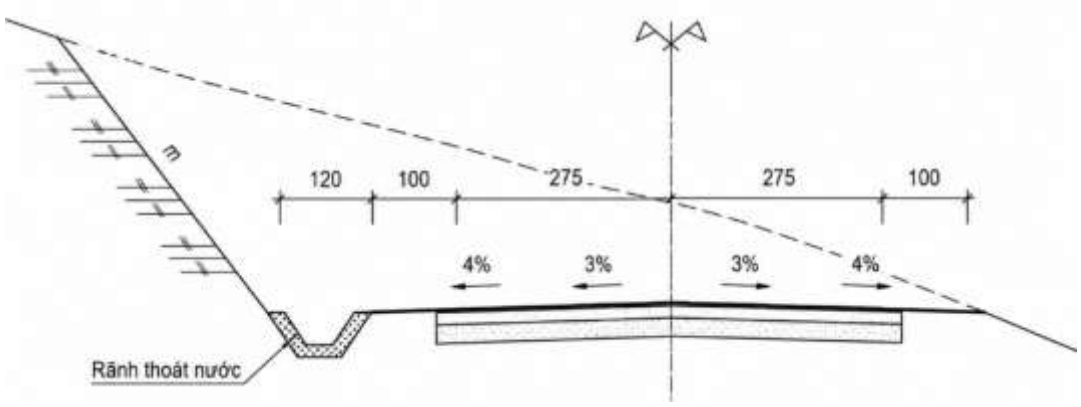
TRƯỢT ĐẤT NÔNG VỚI ỔN ĐỊNH NỀN ĐƯỜNG ĐOẠN TUYẾN NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH

Đoạn tuyến lựa chọn nghiên cứu có địa hình và sự phân cắt bởi khe cạn cắt ngang đường đặc trưng, không phải hiếm gặp ở MNTB. Chương này tập trung phân tích hiện tượng hư hỏng hay phá hủy nền đường hiện hữu từ những ảnh hưởng trực tiếp TĐN ta luy dương và tác động gián tiếp bởi TĐN tới cường độ dòng chảy mặt trên lòng khe cạn đoạn tuyến nghiên cứu. Ngoài ra, sử dụng phân tích mô hình số mặt cắt đặc trưng để phân tích cơ chế TĐN, xác định đặc điểm và quy mô TĐN làm cơ sở đề xuất giải pháp kỹ thuật nhằm giảm thiểu nguy cơ phá hủy nền đường do tác động trực tiếp và gián tiếp từ TĐN.

4.1. Hiện trạng tuyến ĐT128 đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ

4.1.1. Kết cấu mặt đường

Tuyến ĐT128 đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ, tỉnh Lai Châu, có chiều dài 20 km hiện là đường cấp IV miền núi [27] theo TCVN 4054-2005, có bề rộng nền đường 7,5 m, mặt đường 5,5 m và lề đường tối thiểu 1,0 m, mái đường đào tùy theo loại và tính chất của đất đá được thiết kế hệ số mái dốc m=0,75 và m=1. Mặt đường chủ yếu láng nhựa trên nền cấp phối đá dăm, đảm bảo khả năng chịu tải và độ bền (Hình 4.1). Thực tế, lưu lượng xe lưu thông trên tuyến thuộc diện không lớn.



Hình 4.1. Mặt cắt ngang điển hình ĐT128 (Nguồn Sở GTVT cũ, tỉnh Lai Châu)

Qua thời gian khai thác, nhiều đoạn đã bị hư hỏng nghiêm trọng dưới tác động kết hợp của tải trọng xe, thời tiết cực đoan, thời gian sử dụng và đặc biệt một số vị trí có liên quan trực tiếp với điểm có xuất hiện TĐN. Các dạng hư hỏng chủ yếu bao gồm: lún võng cục bộ; bong bật lớp mặt tại các đoạn có nước đọng lâu ngày; nứt mặt đường xuất hiện tại rìa taluy dương và xói lở taluy âm, có chỗ mở rộng làm sụt lún nền mặt đường.

4.1.2. Hệ thống thoát nước

Hệ thống thoát nước hiện trạng gồm rãnh dọc, hố thu và cống thoát nước ngang đường. Rãnh dọc kết cấu bê tông (Hình 4.2a) hoặc đá xây (Hình 4.2b), được bố trí ở chân taluy dương với chức năng thu gom nước mưa từ ta luy dương và mặt đường, ngăn chặn nước chảy tràn qua mặt đường. Nước thu gom chảy dẫn vào các hố thu nước, thoát qua cống ngang đường về ta luy âm (Hình 4.2c). Tại các vị trí khe tụ thủy sử dụng cống thoát nước ngang đường hình chữ nhật (1,5x1,5) m tại vị trí km14+100 và km11+800 (Hình 4.2d).



(a) Rãnh dọc bê tông



(b) Rãnh dọc đá xây



(c) Hố thu nước



(d) Cống thoát nước ngang đường

Hình 4.2. Hệ thống thoát nước trên ĐT128 (chụp 3/2024)

Hiện trạng thực tế cho thấy hệ thống này tồn tại nhiều hạn chế: bồi lấp rãnh do đất đá trượt từ mái dốc, đặc biệt trong mùa mưa; gãy vỡ rãnh hoặc cống, làm mất kết nối dòng chảy mặt và gây thấm vào nền đường; tắc nghẽn cửa cống ngang, dẫn đến tràn nước qua mặt đường, xói lở taluy âm và tạo dòng tự do không kiểm soát.

4.1.3. Các giải pháp xử lý đã thực hiện

Để khắc phục tình trạng sụt trượt và hư hỏng công trình, một số giải pháp kỹ thuật đã được áp dụng tại các vị trí trọng yếu dọc tuyến:

- Xây dựng tường chắn rọ đá tại chân taluy dương và taluy âm tại km17+250;

- Nạo vét rãnh thoát nước dọc tuyến: Công tác nạo vét được thực hiện chủ yếu tại các đoạn rãnh bị bồi lấp do vật liệu trượt;

- Sửa chữa rãnh dọc: Tại một số vị trí, rãnh đá xây bị vỡ do dòng trượt đã được thay thế bằng rãnh bê tông, rãnh bê tông bị vỡ được thay bằng rãnh bê tông mới, thường tiến hành tại các vị trí liên quan TĐN.

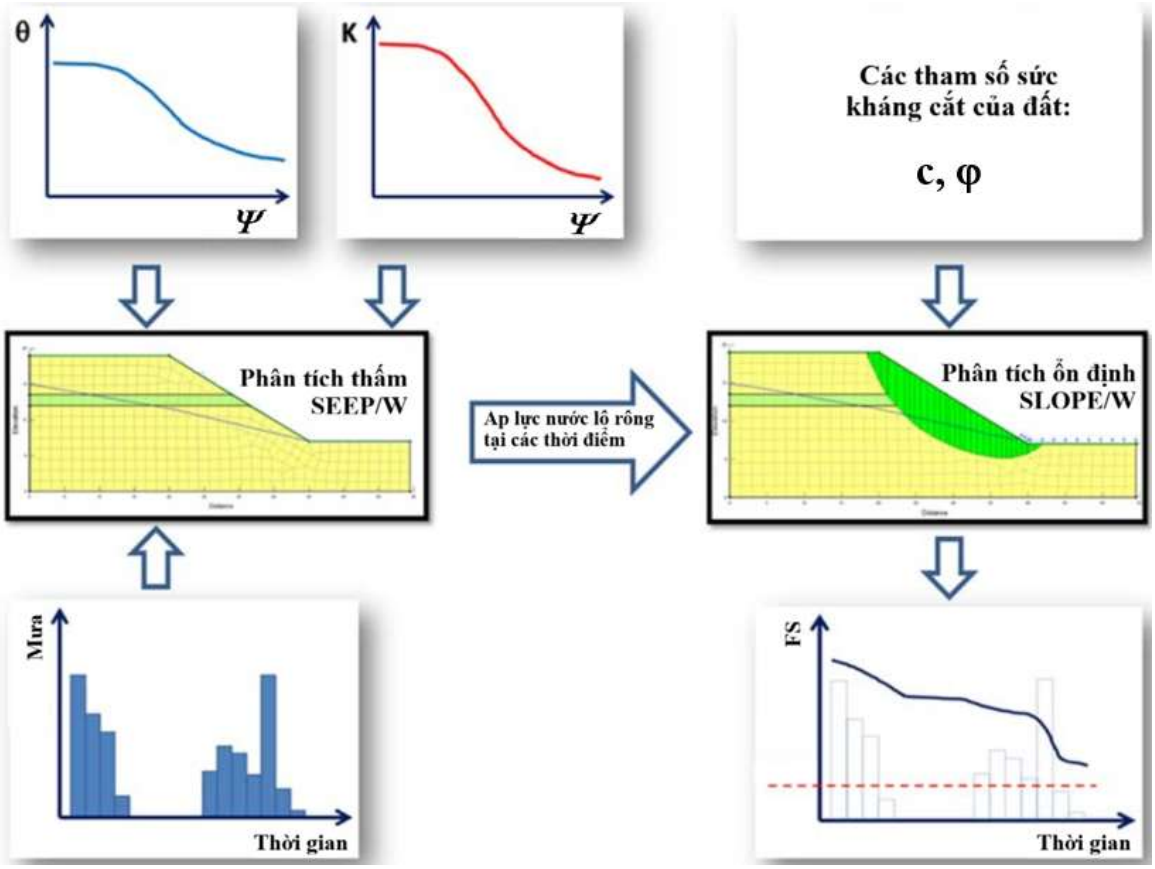
- Trám vá các đoạn mặt đường bị bong tróc: Những vị trí mặt đường bị bong bật lớp nhựa do nước thấm hoặc biến dạng nền được xử lý bằng cách bóc bỏ lớp hư hỏng, sau đó vá lại bằng lớp bê tông nhựa hoặc láng nhựa.

Nhìn chung, các giải pháp xử lý hiện tại chỉ dừng ở mức khôi phục trước mắt nhằm đảm bảo lưu thông trong mùa mưa hoặc sau thiên tai, chưa đủ điều kiện đảm bảo ổn định lâu dài cho nền đường và các công trình phụ trợ.

4.2. Phân tích trượt đất nông bằng mô phỏng số

4.2.1. Các bước thực hiện mô phỏng khi kết hợp SEEP/W và SLOPE/W

Trình tự các bước thực hiện mô phỏng khi kết hợp SEEP/W và SLOPE/W được thể hiện trên Hình 4.3.



Hình 4.3. Trình tự các bước mô phỏng khi kết hợp SEEP/W và SLOPE/W

4.2.2. Số liệu cần thiết để tính toán

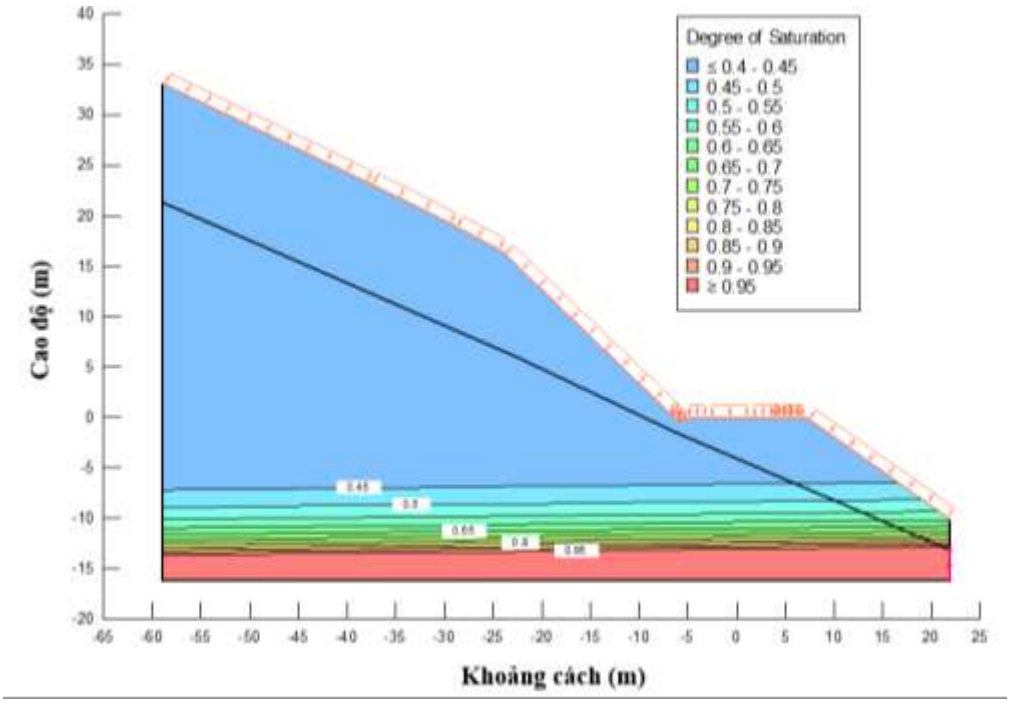
Từ các điểm TĐN đã khảo sát chi tiết tại Mục 3.3, ba vị trí ĐT128-22, ĐT128-37 và ĐT128-60 được lựa chọn để phân tích cơ chế. Các vị trí này đại diện cho những điều kiện địa chất – địa kỹ thuật đặc trưng của hệ tầng Bó Hiềng và Bến Khế, có số liệu khảo sát hình thái, địa hình UAV và mẫu đất phục vụ xác định các tham số đầu vào của mô hình. Đồng thời, các vị trí này cũng nằm trong khu vực được bản đồ phân vùng ở Mục 3.2 xác định có mức nhạy cảm cao hoặc rất cao, qua đó cung cấp thêm cơ sở đối chiếu giữa kết quả phân vùng không gian và phân tích cơ chế ở quy mô mặt cắt.

Mặt cắt tính toán các vị trí này xây dựng trên cơ sở dữ liệu mô hình số độ cao (DEM) thu nhận từ chụp ảnh bằng UAV. Dữ liệu địa hình được xử lý và trích xuất theo các tuyến vuông góc với phương dốc nhằm xác định chính xác hình dạng mái taluy. Mô hình thiết lập với kích thước đủ lớn đủ bao trùm toàn bộ vùng ảnh hưởng của quá trình thấm và ổn định, đảm bảo phản ánh đúng điều kiện làm việc thực tế của mái dốc.

Khảo sát hiện trường tại các mặt cắt lựa chọn, địa chất khu vực đặc trưng bởi hai lớp chính, lớp 1 - lớp phủ tàn tích phía trên và lớp 2 - lớp đá phía dưới. Phân tích các điểm trượt đã xảy ra trong khu vực nghiên cứu và vùng lân cận cho thấy chiều dày tầng phủ dao động trong khoảng (6–8) m. Giá trị này được sử dụng để thiết lập mặt cắt địa chất và xác định vùng trượt tiềm năng trong quá trình phân tích.

Trên cơ sở đó, mặt cắt 2D được xây dựng, kết hợp với các thông số địa chất tạo thành dữ liệu đầu vào cho bài toán mô phỏng số (Hình 4.4).

Do luận án chưa có kết quả thí nghiệm xác định trực tiếp các thông số sức kháng cắt hiệu dụng (c', φ'), các giá trị (c, φ) thu được từ thí nghiệm cắt phẳng được sử dụng làm thông số sức kháng cắt đại diện trong mô hình. Đây là một giả thiết đơn giản hóa của nghiên cứu và có thể ảnh hưởng đến giá trị tuyệt đối của hệ số ổn định FS; vì vậy kết quả mô phỏng được sử dụng chủ yếu để phân tích xu thế biến đổi ổn định mái dốc dưới tác động của mưa. Bên cạnh đó, các thông số vật lý khác như trọng lượng đơn vị thể tích của đất (γ), hệ số thấm bão hòa (K) cũng được xác định thông qua thí nghiệm trong phòng. Các tham số sức kháng cắt của lớp 2 được lựa chọn tham khảo mục 4.6.4 Phần 10 TCVN 11823-2017. Các lớp vật liệu được giả thiết là đồng nhất và ở trạng thái không bão hòa/ bão hòa với các giá trị đặc trưng được tổng hợp trong Bảng 4.1.

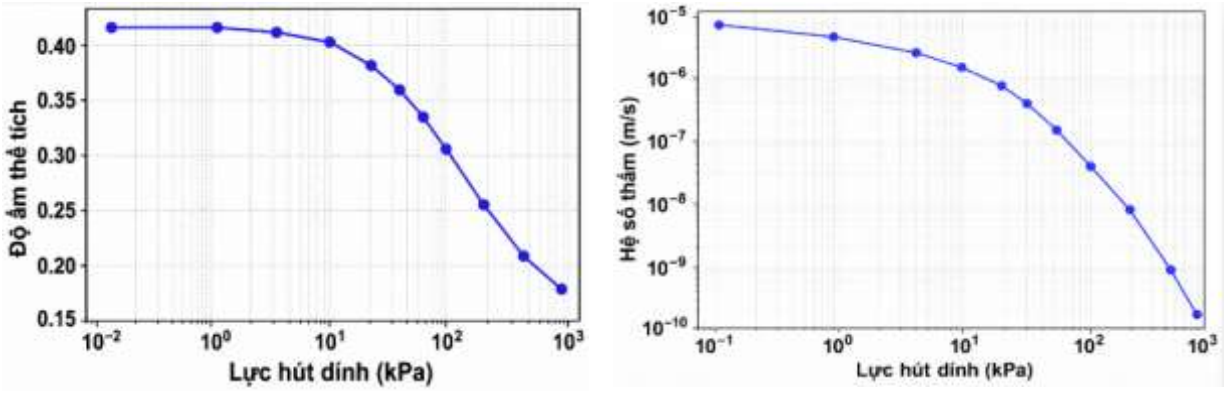


Hình 4.4. Mặt cắt ngang điển hình dùng trong phân tích

Bảng 4.1. Tổng hợp các chỉ tiêu cơ lý của đất dùng trong tính toán

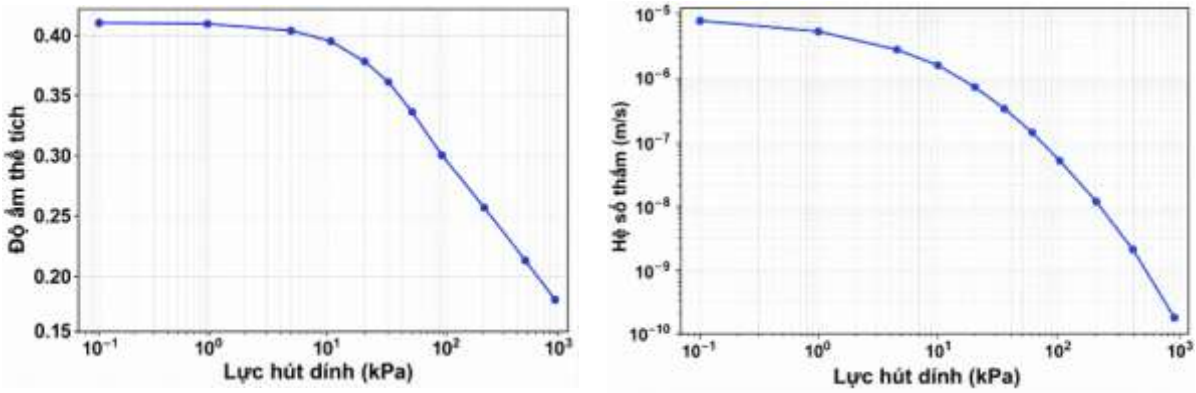
Mặt cắt	Lớp đất	γ (kN/m^3)	c (kPa)	φ (^{0})	K (m/s)
ĐT128-22	Lớp 1	18	5,0	35,0	1,10 x 10^{-5}
	Lớp 2	25	50	18,8	
ĐT128-37	Lớp 1	17	5,0	34,0	0,97 x 10^{-5}
	Lớp 2	25	50	18,8	
ĐT128-60	Lớp 1	17,5	10	26,0	0,83 x 10^{-5}
	Lớp 2	25	50	18,8	

Đường cong SWCC được xác định gián tiếp từ đường cong thành phần hạt. Trên cơ sở đường cong SWCC đã thiết lập, hàm hệ số thấm không bão hòa K(ψ) được xác định. Các đường cong SWCC và hàm thấm được xây dựng riêng cho từng vị trí tính toán, phù hợp với đặc trưng thành phần hạt và điều kiện địa chất tại khu vực nghiên cứu, theo cơ sở lý thuyết trình bày tại mục 2.3.2, chương 2.



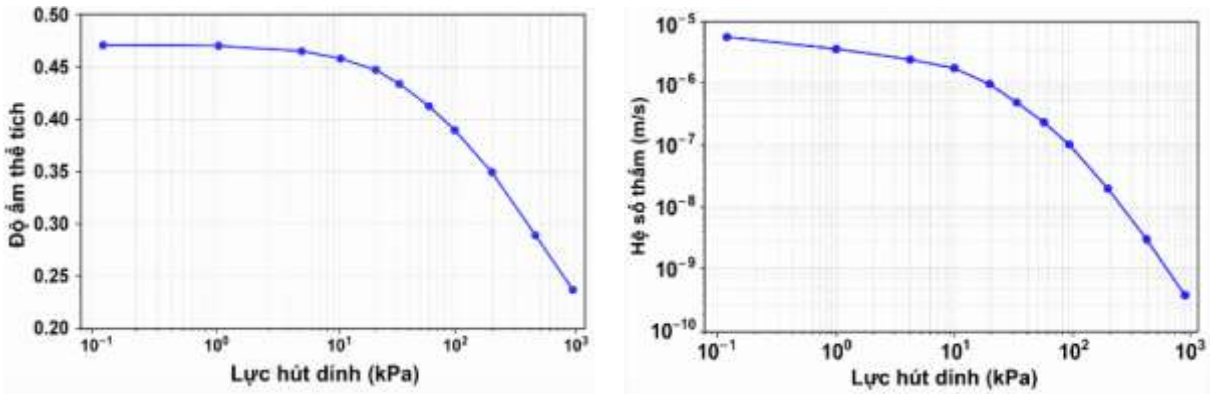
(a) Đường cong SWCC (b) Hàm thấm

Hình 4.5. Đường cong SWCC (a) và Hàm thấm (b) của lớp 1 mặt cắt ĐT128-22



(a) Đường cong SWCC (b) Hàm thấm

Hình 4.6. Đường cong SWCC (a) và Hàm thấm (b) của lớp 1 mặt cắt ĐT128-37

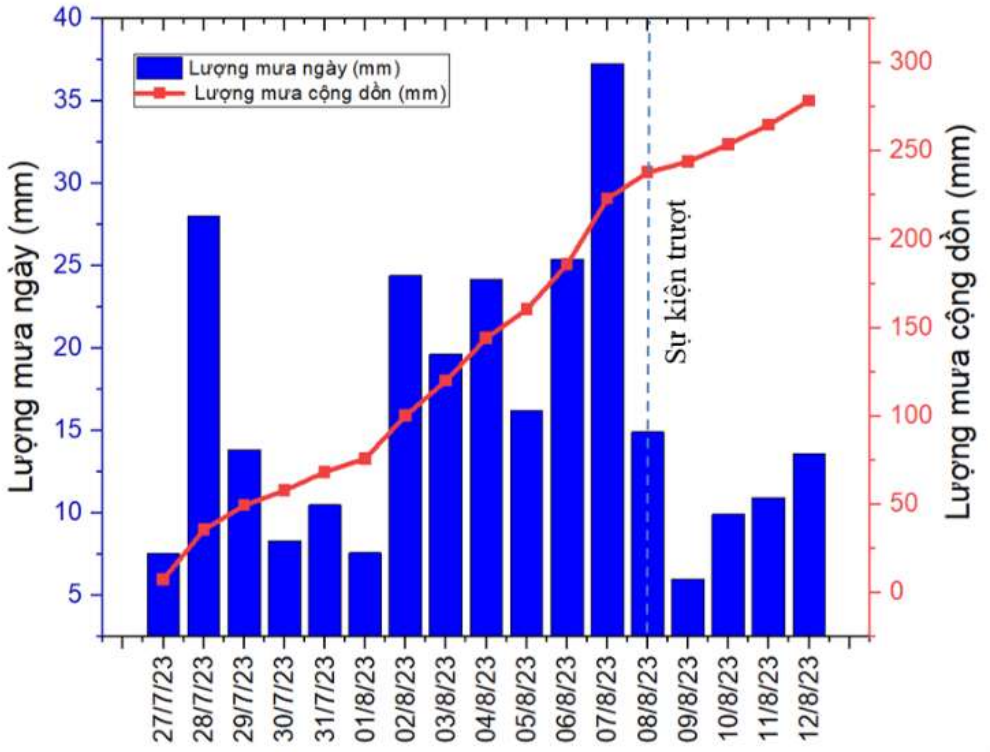


(a) Đường cong SWCC (b) Hàm thấm

Hình 4.7. Đường cong SWCC (a) và hàm thấm (b) của lớp 1 mặt cắt ĐT128-60

Do không có số liệu quan trắc mực nước ngầm thực tế tại khu vực nghiên cứu, mực nước ngầm ban đầu khi chưa có mưa trong mô hình được giả thiết ở vị trí sâu, gần đáy mặt cắt tính toán (tương ứng trạng thái mùa khô, ít mưa), phản ánh điều kiện nền trước khi xảy ra chuỗi mưa gây trượt. Giả thiết này phù hợp với đặc điểm địa hình sườn dốc thoát nước tốt và tính chất thấm của lớp đất tầng phủ, khiến nước khó tích tụ hình thành mực nước ngầm nông trong điều kiện không mưa kéo dài. Vị trí đường mực nước ngầm ban đầu (ranh giới áp lực nước lỗ rỗng bằng 0 kPa) được thể hiện trên Hình 4.9, 4.10 và các hình tương ứng tại Phụ lục 10.

Các điểm trượt được ghi nhận xảy ra vào ngày 08/8/2023. Dữ liệu mưa tại thời điểm trước, trong và sau sự kiện thu thập từ nguồn mưa vệ tinh GPM của Nasa Power. Theo diễn biến mưa trên Hình 4.8, chuỗi mưa liên tục từ ngày 02/8/2023 đến ngày 07/8/2023 được lựa chọn làm điều kiện biên đầu vào cho mô hình thấm. Đây là giai đoạn xuất hiện mưa kéo dài trước thời điểm xảy ra trượt, với lượng mưa ngày dao động trong khoảng (16-37) mm/ngày, làm cho lượng mưa cộng dồn tăng nhanh ngay trước thời điểm mất ổn định.



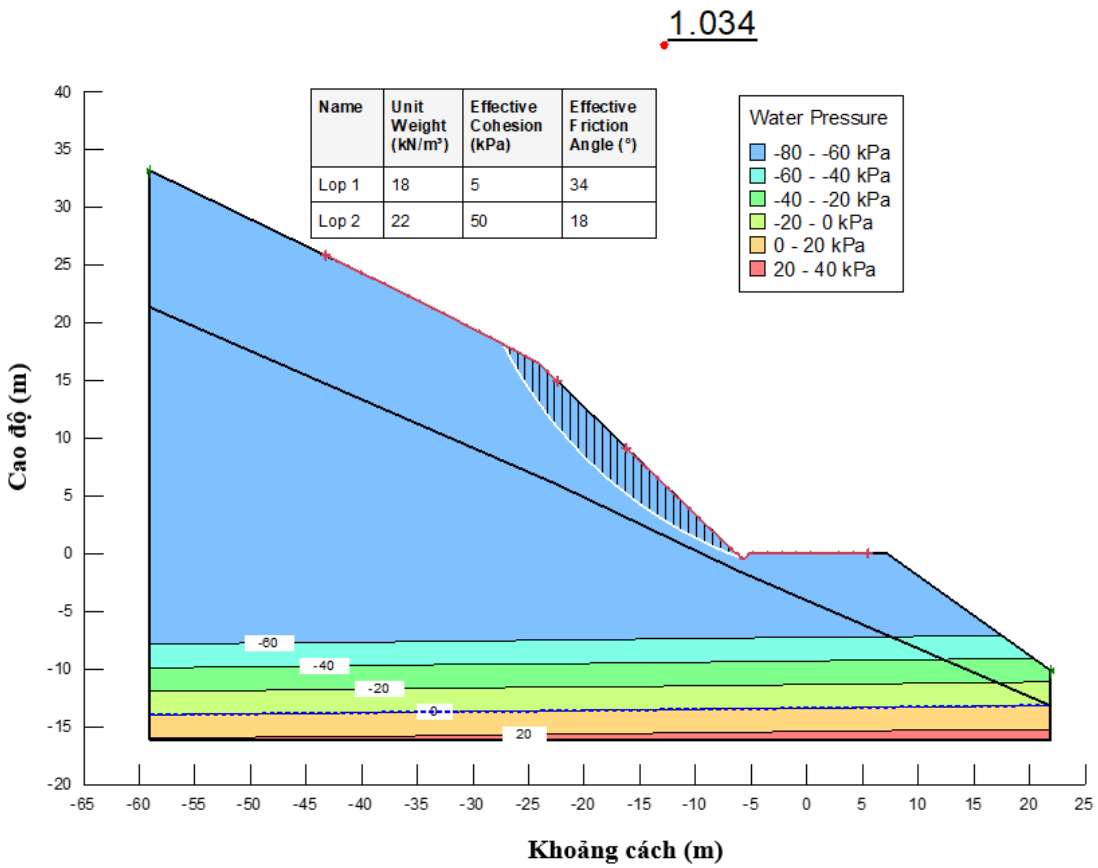
Hình 4.8. Số liệu mưa theo dữ liệu vệ tinh GPM thời điểm trượt đất

4.2.3. Kết quả tính toán

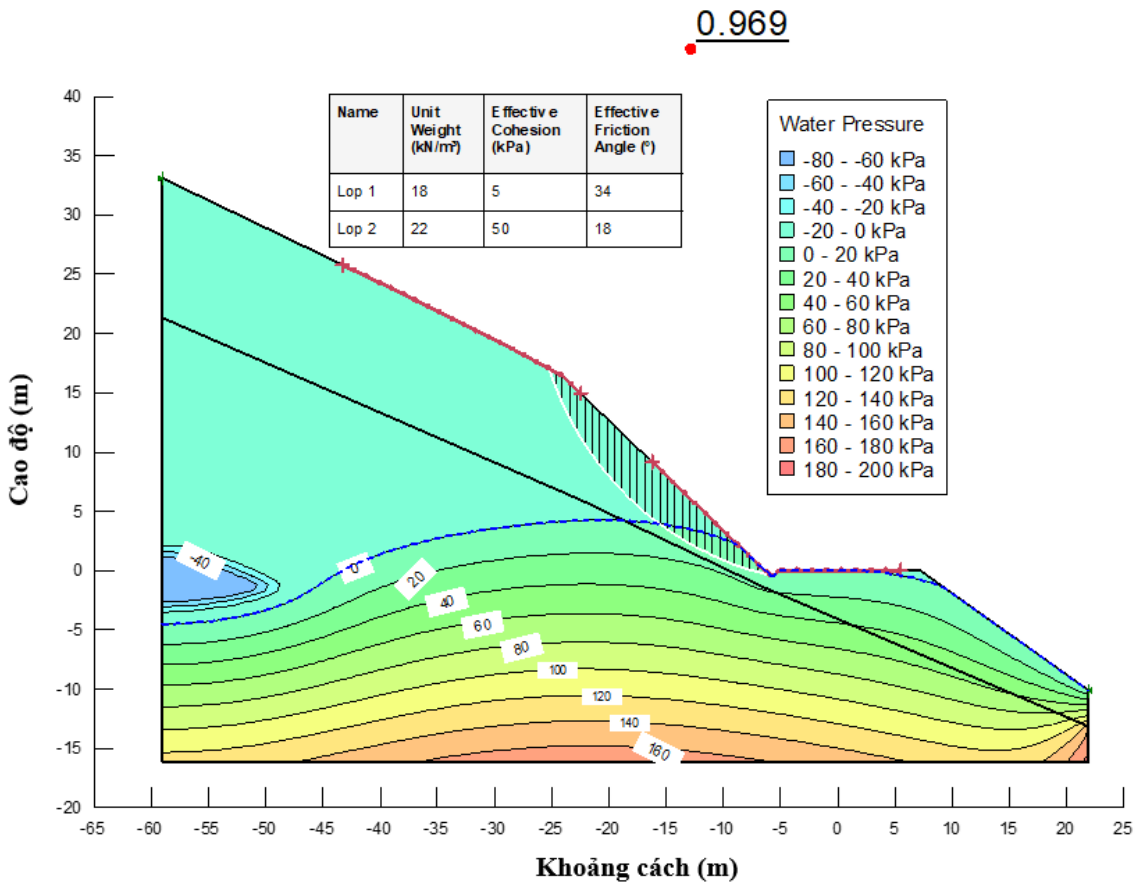
Tính toán ổn định mái dốc thực hiện theo hai kịch bản điều kiện thủy văn: điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa - tại thời điểm chưa xảy ra mưa; và điều kiện sau chuỗi mưa - sau khi đất chịu tác động của chuỗi mưa liên tục 6 ngày (từ 02/8/2023 đến 07/8/2023, lượng mưa (16–37) mm/ngày), là giai đoạn mưa kéo dài ngay trước thời điểm ghi nhận trượt thực tế (08/8/2023). Kết quả tính toán hệ số ổn định cho hai trường hợp được tổng hợp trong Bảng 4.2. Kết quả tính toán điển hình đối với mặt cắt ĐT128-37 được trình bày trên Hình 4.9, Hình 4.10, trong khi các kết quả tính toán chi tiết được trình bày trong Phụ lục 10.

Bảng 4.2. Tổng hợp kết quả tính toán

Mặt cắt	Trường hợp	FS	Đánh giá
ĐT128-22	Điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa	1,038	Ổn định
	Điều kiện sau chuỗi mưa	0,941	Không ổn định
ĐT128-37	Điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa	1,034	Ổn định
	Điều kiện sau chuỗi mưa	0,969	Không ổn định
ĐT128-60	Điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa	1,048	Ổn định
	Điều kiện sau chuỗi mưa	0,991	Không ổn định



Hình 4.9. Hệ số ổn định ở điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa, mặt cắt ĐT128-37



Hình 4.10. Hệ số ổn định ở điều kiện sau chuỗi mưa, mặt cắt ĐT128-37

Kết quả mô phỏng thấm không bão hòa bằng SEEP/W (chi tiết tại Phụ lục 10) cho thấy trạng thái thủy lực của mái dốc thay đổi rõ rệt dưới tác động của chuỗi mưa kéo dài trước thời điểm xảy ra trượt. Ở điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa, lớp phủ phong hóa (Lớp 1) chủ yếu ở trạng thái không bão hòa với độ bão hòa S_r phổ biến trong khoảng (0,4–0,6) (Hình PL10.1, PL10.7, PL10.13), trong khi các khu vực sâu hơn phía dưới mặt cắt có độ bão hòa cao hơn, $S_r > 0,9$. Áp lực nước lỗ rỗng u_w trong phần lớn lớp đất phủ có giá trị âm, phổ biến trong khoảng (−80 ÷ 0) kPa, thể hiện rõ tại mặt cắt ĐT128-37 (Hình 4.9). Trong điều kiện đất không bão hòa, với giả thiết áp suất khí lỗ rỗng u_a xấp xỉ áp suất khí quyển, các giá trị $u_w<0$ tương ứng với lực hút dính $\psi=u_a-u_w > 0$. Do đó, khoảng áp lực nước lỗ rỗng (−80÷0) kPa tương ứng với lực hút dính khoảng (0–80) kPa, đây chính là lực hút dính ban đầu góp phần duy trì sức kháng cắt và ổn định của lớp đất phủ trước khi chịu tác động của chuỗi mưa.

Sau quá trình mưa liên tục từ ngày 02/8/2023 đến 07/8/2023 với lượng mưa ngày khoảng (16-37) mm/ngày, nước thấm vào mái dốc làm trạng thái thủy lực của lớp phủ phong hóa thay đổi đáng kể. Độ bão hòa tăng từ mức ban đầu S_r = (0,4–0,6) lên phổ biến khoảng S_r = (0,90–0,98), tại một số khu vực $S_r \geq 0,995$, tức gần bão hòa hoàn toàn. Đồng thời, trường áp lực nước lỗ rỗng dịch chuyển theo xu hướng tăng: vùng có $u_w<0$ thu hẹp, trị tuyệt đối của áp lực nước lỗ rỗng âm giảm và ranh giới $u_w=0$ dịch chuyển lên phía trên mái dốc; trong các vùng sâu hơn, áp lực nước lỗ rỗng dương gia tăng rõ rệt, tại mặt cắt ĐT128-37 có khu vực đạt khoảng (160–180) kPa (Hình 4.10). Kết quả này cho thấy sau chuỗi mưa, mái dốc không chuyển đồng nhất sang trạng thái bão hòa hoàn toàn mà tồn tại đồng thời vùng đất không bão hòa, vùng gần bão hòa và vùng có áp lực nước lỗ rỗng dương.

Sự gia tăng u_w trong quá trình thấm đồng nghĩa với sự suy giảm lực hút dính ψ trong vùng đất không bão hòa. Khi lực hút dính giảm, phần sức kháng cắt được duy trì bởi trạng thái không bão hòa của đất cũng suy giảm; đồng thời, tại những vùng u_w chuyển sang giá trị dương, ứng suất hữu hiệu giảm, làm điều kiện ổn định của mái dốc trở nên bất lợi hơn. Kết quả phân tích bằng SLOPE/W cho thấy hệ số ổn định của các mặt cắt giảm rõ rệt từ điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa FS = (1,034–1,048) xuống FS = (0,941–0,991) sau chuỗi mưa. Riêng tại mặt cắt ĐT128-37, hệ số ổn định giảm từ FS=1,034 (Hình 4.9) xuống FS=0,969 (Hình 4.10). Mặt trượt nguy hiểm phát triển chủ yếu trong lớp phủ phong hóa với chiều sâu khoảng (2–5) m, tương đồng với đặc điểm TĐN quan sát được ngoài thực địa.

Đáng chú ý, kết quả mô phỏng cho thấy mất ổn định mái dốc không nhất thiết chỉ xảy ra khi toàn bộ lớp đất phủ đạt trạng thái bão hòa hoàn toàn. Tại các mặt cắt ĐT128-22 và ĐT128-37, khi FS giảm xuống dưới 1, độ bão hòa trong lớp phủ phổ biến mới đạt khoảng

Sr = (0,95–0,98), trong khi một phần đất vẫn ở trạng thái không bão hòa. Điều này cho thấy chuỗi mưa 6 ngày đã làm áp lực nước lỗ rỗng tăng và lực hút dính suy giảm đến mức làm giảm đáng kể sức kháng cắt của đất, dẫn tới mất ổn định trước khi toàn bộ lớp phủ đạt bão hòa hoàn toàn. Xu hướng này phù hợp với nhận định của Brand (1981) [49] và Johnson và Sitar (1990) [106] về vai trò của trạng thái thủy lực ban đầu và sự suy giảm lực hút dính đối với quá trình kích hoạt TĐN do mưa.

Đối với mặt cắt ĐT128-60, tại thời điểm FS<1, một số vùng trong lớp phủ đạt Sr≥0,995, cho thấy trạng thái thủy lực tại thời điểm mất ổn định có sự khác biệt so với hai mặt cắt ĐT128-22 và ĐT128-37. Mặt cắt ĐT128-60 có taluy thoải hơn (Phụ lục 10), vì vậy sự khác biệt về hình học mái dốc có thể góp phần làm thay đổi quá trình thấm và phân bố độ bão hòa. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng hiện tại chưa đủ cơ sở để khẳng định riêng độ dốc nhỏ hơn là nguyên nhân làm nước mưa thấm thẳng đứng nhiều hơn thay vì chảy tràn bề mặt. Kết quả của ba mặt cắt cho thấy mức độ biến đổi áp lực nước lỗ rỗng, lực hút dính và độ bão hòa trước khi mất ổn định phụ thuộc vào điều kiện thủy lực và hình học cụ thể của từng mái dốc. Nhìn chung, kết quả mô phỏng phù hợp với các nghiên cứu của Lương Nguyễn Hoàng Phương và nnk (2023) [24] và Huỳnh Thanh Bình (2023) [2] về cơ chế phát sinh TĐN dưới tác động của mưa kéo dài tại khu vực miền núi Việt Nam.

4.3. Ảnh hưởng trượt đất nông tới chất lượng mặt đường và hệ thống thoát nước

4.3.1. Ảnh hưởng trượt đất nông tới chất lượng mặt đường

Khi trượt gây tràn lấp đất lên mặt đường, chặn dòng chảy trên rãnh dọc, gây hiện tượng tràn hay đọng nước trên mặt đường, trực tiếp làm hư hỏng kết cấu mặt đường dưới tác động tải trọng giao thông. Kết quả điều tra thực địa ghi nhận các biểu hiện hư hỏng mặt đường tại các vị trí xuất hiện trượt đất rõ nét. Tổng số có 45 vị trí hư hỏng mặt đường được ghi nhận tương ứng 69 vị trí TĐN đã xác định.

Một số biểu hiện hư hỏng mặt đường gồm: Lún võng cục bộ tại vị trí tim tuyến đường, phía taluy dương và taluy âm tương đối nguyên vẹn, một số vị trí trên mặt đường bị bong bật lớp mặt (Hình 4.11a). Mặt đường thể hiện đồng thời ba dạng hư hỏng: lún võng, bong bật lớp mặt và nứt mép mặt đường (dễ dàng quan sát các mảng bong tróc lớp nhựa, bề mặt không còn bằng phẳng liên tục); ở rìa taluy âm, các vết nứt nhỏ kéo dài song song với mép đường; đồng thời, bong bật lớp mặt xảy ra do nước mưa tích tụ từ khối trượt ngấm vào lớp móng làm giảm dính kết với lớp nhựa, kết hợp với tải trọng động làm bật từng mảng lớp mặt theo thời gian (Hình 4.11b); và biểu hiện nữa là sự xuất hiện lún võng cục bộ và bong bật lớp mặt cục bộ ở một khu vực hoặc trên toàn bộ mặt đường (Hình 4.11c và 4.11d).



(a) Điểm trượt ĐT128-08



(b) Điểm trượt ĐT128-34



(c) Điểm trượt ĐT128-23



(d) Điểm trượt ĐT128-18

Hình 4.11. Ảnh hưởng TĐN tới chất lượng mặt đường (chụp 3/2024)

Kết quả thống kê tại 69 điểm TĐN cho thấy, tác động trực tiếp tới chất lượng mặt đường (Phụ lục 4) có 2 vị trí gây lún võng mặt đường (chiếm 2,9%); 2 điểm TĐN gây nứt mép (2,9%) và 45 điểm TĐN gây bong bật lớp mặt đường (chiếm 65,2%).

4.3.2. Ảnh hưởng trượt đất nông tới hệ thống thoát nước

Cơ chế hư hỏng do tác động của TĐN tới hệ thống thoát nước và nền đường thể hiện khi: rãnh dọc bị lấp đầy đất từ ta luy dương, nước tập trung tại 1 hoặc cả 2 bên rãnh dọc tại chân mái dốc, gây xói lở cục bộ và rửa trôi vật liệu nền phần ta luy âm khi có dòng chảy tràn qua mặt đường; cống ngang bị tắc, nước dồn lại ở thượng lưu, tạo áp lực thủy lực lớn, dẫn đến hiện tượng xói ngầm, biến dạng thậm chí sụt lún hoặc trượt nền đường; trường hợp dòng nước trượt có vận tốc cao do tắc nghẽn đất đá và tạo thế năng khe cạn lớn, hoặc tác động động lực khi dòng chảy có thêm vật liệu rời từ TĐN phía trên dòng chảy đủ khả năng làm nứt vỡ hoặc lệch kết cấu cống, phá hủy cống ngang và nền đường. Hiện tượng này tạo thành chuỗi tác động liên hoàn: TĐN làm mất hiệu quả thoát nước dọc đường, tạo thế năng làm gia tăng động năng dòng chảy hoặc làm chảy tràn nước qua mặt đường, gây hư hỏng hệ thống thoát nước, gây hư hỏng hay phá hủy mặt đường và nền đường, thậm chí làm phát sinh trượt đất phần ta luy âm, gây hư hỏng thậm chí chia cắt tuyến đường.

Kết quả điều tra hiện trường tháng 3/2024 cho thấy, TĐN tác động lớn đến hệ thống

thoát nước dọc tuyến. Tại các vị trí TĐN và lân cận, không khó để nhận biết được hiện tượng đất đá gây vùi lấp rãnh thoát nước dọc và ngang tuyến, các dấu hiệu hư hỏng kết cấu, thay đổi hình dạng rãnh thoát nước, nghiêm trọng hơn gây phá hủy kết cấu rãnh thoát nước dọc như kết cấu bê tông bị vỡ, kết cấu đá xây bị phá hủy hoàn toàn, làm suy giảm đáng kể chức năng tiêu thoát nước mặt, hay hư hỏng và phá hủy nền đường (Hình 4.12).



(a) Điểm trượt ĐT128-55



(b) Điểm trượt ĐT128-60



(c) Điểm trượt ĐT128-61



(d) Điểm trượt ĐT128-65

Hình 4.12. Ảnh hưởng TĐN tới hệ thống thoát nước (chụp 3/2024)

Hệ thống rãnh dọc bằng bê tông tại một số vị trí dọc tuyến bị phá hủy kết cấu cục bộ do đất đá từ mái taluy dương trượt xuống. Hư hỏng này dẫn đến hiện tượng nước tràn lên mặt đường, trực tiếp gây hư hỏng kết cấu mặt đường, nền đường do thấm ướt kéo dài kết hợp tải trọng giao thông, thậm chí còn làm tăng nguy cơ tái trượt mái dốc do nước không được thoát kịp (Hình 4.12a).

Một dạng khác, TĐN gây tình trạng rãnh dọc bị hư hỏng và đứt gãy, kết hợp với trượt mái taluy dương có dấu hiệu tái hoạt động. Dòng nước bị chặn hoặc đổi hướng do lớp đất đá tràn xuống đã phá hủy cục bộ rãnh thoát nước, dẫn đến xói nền và tạo dòng rãnh tự phát, gây mất ổn định chân mái và nền đường tại khu vực tiếp giáp. Đoạn rãnh thoát nước bị chặn do tác động TĐN, kết cấu rãnh bị phá hủy hoàn toàn, gây xói và trượt ta luy âm (Hình 4.12b).

Một biểu hiện khác được nhận diện tại hiện trường, trượt đất làm vật liệu tràn lấp toàn

bộ rãnh dọc và một phần lề đường, làm bít tắc hệ thống tiêu thoát nước mặt, khiến nước tích tụ gây phá hoại mái và tràn qua mặt đường. Sự mất kiểm soát dòng chảy trong trường hợp này có thể tiếp tục kích hoạt các chu kỳ trượt mới, làm mất dần sức kháng cắt của đất nền, gây mất ổn định nền hay ta luy âm (Hình 4.12c).

Hình 4.12d ghi nhận hiện trạng kết cấu hệ thống thoát nước bị phá hủy hoàn toàn, đất đá tràn lấp hoàn toàn trên suốt chiều dài rãnh dọc gây tắc nghẽn hệ thống tiêu thoát nước mặt trên đoạn đường này. Điều đáng lưu ý nguy cơ tái trượt cao tại khu vực này làm hệ thống thoát nước bị ảnh hưởng trầm trọng hơn và phát sinh lún sụt hay trượt nền phần ta luy âm.

Kết quả điều tra và đánh giá hiện trạng nền đường và rãnh dọc lân cận tại vị trí 69 điểm TĐN (Phụ lục 4) cho thấy, 100% các điểm TĐN gây vùi lấp rãnh thoát nước dọc, có 35 điểm TĐN gây hỏng kết cấu rãnh thoát nước dọc tuyến (chiếm 50,7%). Có thể thấy, hệ thống thoát nước dọc tuyến là một trong số hạng mục công trình trên tuyến GTMN dễ bị hư hỏng dưới tác động của TĐN. Tình trạng này làm giảm đáng kể khả năng bảo vệ mặt đường và mái dốc và phần ta luy dương và âm, đồng thời tạo điều kiện cho hiện tượng thấm nước, mất ổn định cục bộ tiếp diễn. Việc tăng cường kiểm soát dòng chảy mặt, nạo vét định kỳ và thiết kế rãnh có khả năng chịu áp lực dòng trượt là cần thiết để đảm bảo hiệu quả lâu dài của hệ thống tiêu thoát nước trên các tuyến GTMN chịu ảnh hưởng của TĐN.

Kết quả nghiên cứu cho thấy TĐN không chỉ gây hư hại trực tiếp hệ thống thoát nước mà còn làm thay đổi hướng dòng chảy mặt sau sự cố, khiến nước tập trung bất lợi tại những vị trí không được gia cố. Đây chính là tác nhân kích hoạt thêm các dạng hư hỏng thứ cấp như xói hàm ếch chân taluy âm, ngập úng cục bộ trên mặt đường và giảm tuổi thọ kết cấu áo đường. Vì vậy, nghiên cứu ảnh hưởng của TĐN tới hệ thống thoát nước không chỉ nhằm hiểu cơ chế hư hỏng, mà còn là cơ sở khoa học đề xuất giải pháp thiết kế và quản lý duy tu thích hợp, đặc biệt trong điều kiện tuyến giao thông MNTB vốn có địa hình dốc, lưu vực hứng nước lớn và có nhiều khe cạn cắt ngang tuyến tạo dòng chảy qua đường khi mưa lớn.

4.4. Mô phỏng số dòng chảy mặt trên khe cạn khi có vật liệu rời từ trượt đất nông

4.4.1. Đặc điểm khe cạn trên tuyến nghiên cứu điển hình

Đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ, tuyến ĐT128 cắt qua khe cạn tại 4 vị trí (03 vị trí nền đường, 01 vị trí nền đường bị phá hủy và được thay thế bằng cầu từ 2021 (km 10+300)) (Hình 4.13). Lưu vực khe cạn rộng, độ dốc dọc cũng như độ dốc ngang lưu vực lớn, với thảm thực vật thưa hoặc không có. Dọc lưu vực này từ trên xuống liên tiếp có nhiều vị trí (trên 10 vị trí) đã và có nguy cơ tiếp tục bị trượt đất đá với diện tích bề mặt rộng (Hình 4.14).



Hình 4.13. Địa hình phần tuyến nghiên cứu điển hình (ảnh UAV 1/2024)



Hình 4.14. Địa hình phần khe cạn và vị trí một số điểm TĐN tạo vật liệu rời phạm vi nghiên cứu (ảnh UAV 11/2024)

Đặc điểm này, dễ nhận thấy lưu vực phạm vi nghiên cứu có lưu lượng nước lớn, đặc biệt khi mưa lớn. Với những dấu vết trượt đất, dấu vết xói mòn dọc theo lưu vực, những đợt hư hỏng nền đường cắt qua khe cạn, hay các tảng hoặc cuội dăm còn đọng lại lòng lưu vực dọc khe cạn đã chứng tỏ khi mưa lớn, dòng chảy tạm thường kèm hoặc cuốn trôi cùng dòng chảy nhiều tảng cũng như vật liệu rời từ nguồn TĐN dọc theo lòng lưu vực, sau đó đổ dồn về các vị trí khe cạn cắt qua tuyến đường, tiếp tục đổ xuống chân núi.

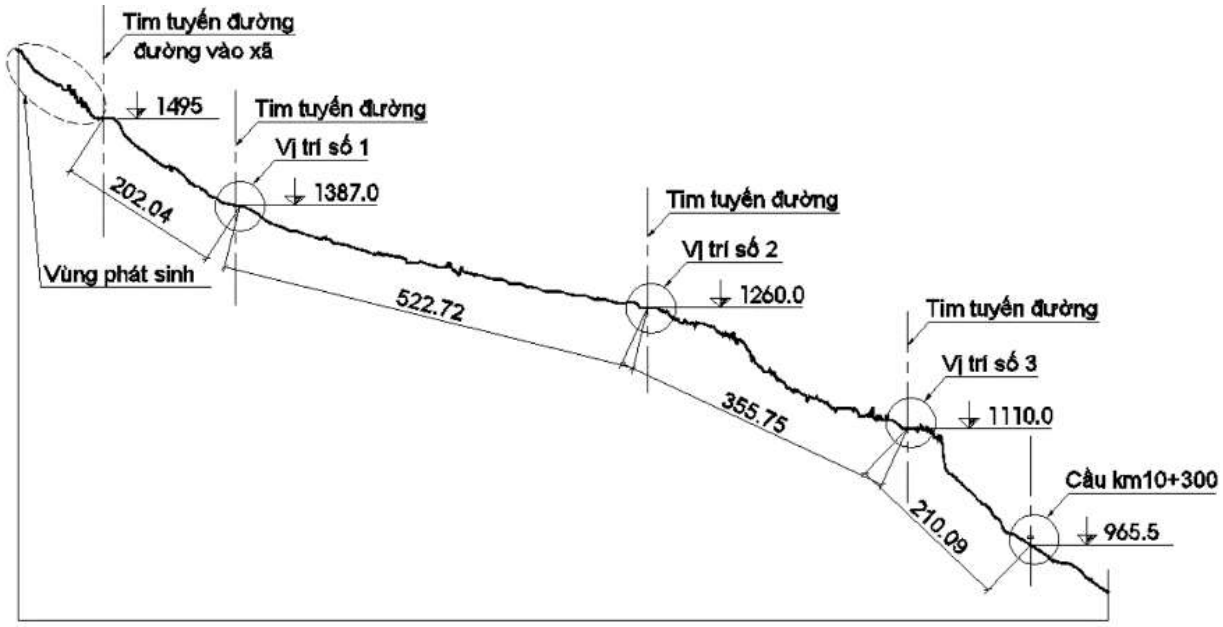
Từ đỉnh của khe cạn tới vị trí cầu km10+300 có tổng chiều dài đoạn lòng khe khoảng 1,29 km, cao độ giảm từ (1495 - 965,5) m. Khe cạn cắt tuyến ĐT128 tại vị trí số 1 (km17+250), vị trí số 2 (km14+100), vị trí số 3 (km11+800) và vị trí số 4 (vị trí cầu - km10+300). Có thể chia lòng khe cạn thành các phân đoạn như sau (Hình 4.14, Hình 4.15):

- Phân đoạn 1, bắt đầu từ đường vào xã tới vị trí số 1 có chiều dài 202,04 m, chênh cao 108 m, độ dốc trung bình 65%;

- Phân đoạn 2, được nối tiếp từ vị trí số 1 tới vị trí 2 dọc theo ĐT128 và có chiều dài 522,72 m, chênh cao 127 m, độ dốc trung bình 25%.

- Phân đoạn 3, nối tiếp từ vị trí số 2 tới vị trí số 3, có chiều dài 355,75 m, chênh cao 150 m, độ dốc trung bình 50%.

- Phân đoạn 4, thuộc đoạn tuyến từ vị trí số 3 tới vị trí cầu có chiều dài 210,09 m, chênh cao 144,5 m, độ dốc trung bình 98%.



Hình 4.15. Cắt dọc lòng khe cạn cắt ngang tuyến ĐT128 tại 4 vị trí

4.4.2. Mưa lớn và trượt đất nông dọc lưu vực khe cạn nghiên cứu

Dọc lưu vực khe cạn cắt qua ĐT128 tại 04 vị trí đã và còn nhiều nguy cơ rất cao xảy

ra TĐN mạnh mẽ, trực tiếp dồn vật liệu rời xuống lòng khe cạn và có thể bị cuốn trôi theo dòng chảy khi cường độ dòng đủ lớn. Các điểm TĐN dọc lưu vực khe cạn xảy ra với quy mô khác nhau và mật độ khá dày, không chỉ trực tiếp gây ảnh hưởng hoặc phá hủy nền mặt đường các vị trí lòng khe cắt qua hoặc lân cận mà còn là nguồn "tích vật liệu rời" dọc khe (Hình 4.14). Các điểm TĐN thượng nguồn khe cạn (quanh phần đường vào xã - km17+250 của ĐT128) được xem là nguồn phát sinh vật liệu rời trong phân tích mô phỏng số. Các sự kiện mưa lớn gây trượt tại thượng nguồn khe cạn cũng như tạo dòng chảy tạm cường độ khác nhau và liên tục diễn ra từ tháng V tới tháng IX hàng năm. Một số sự kiện TĐN tại km17+250 gắn với mưa giai đoạn (2019-2024) trình bày trong Bảng 4.3 [12-14, 26]. Đáng chú ý, các sự kiện mưa lớn và TĐN cung cấp vật liệu rời cho dòng chảy tạm trên lòng khe cạn, trực tiếp gia tăng động năng và cường độ dòng chảy và trùng hợp với các sự kiện hư hỏng nền đường tại các vị trí số 1, 2, 3 và đặc biệt vị trí km10+300 (Hình 4.14) mà sau đó tới năm 2020 buộc phải đầu tư xây dựng cầu thay thế nền đường bị phá hủy hoàn toàn.

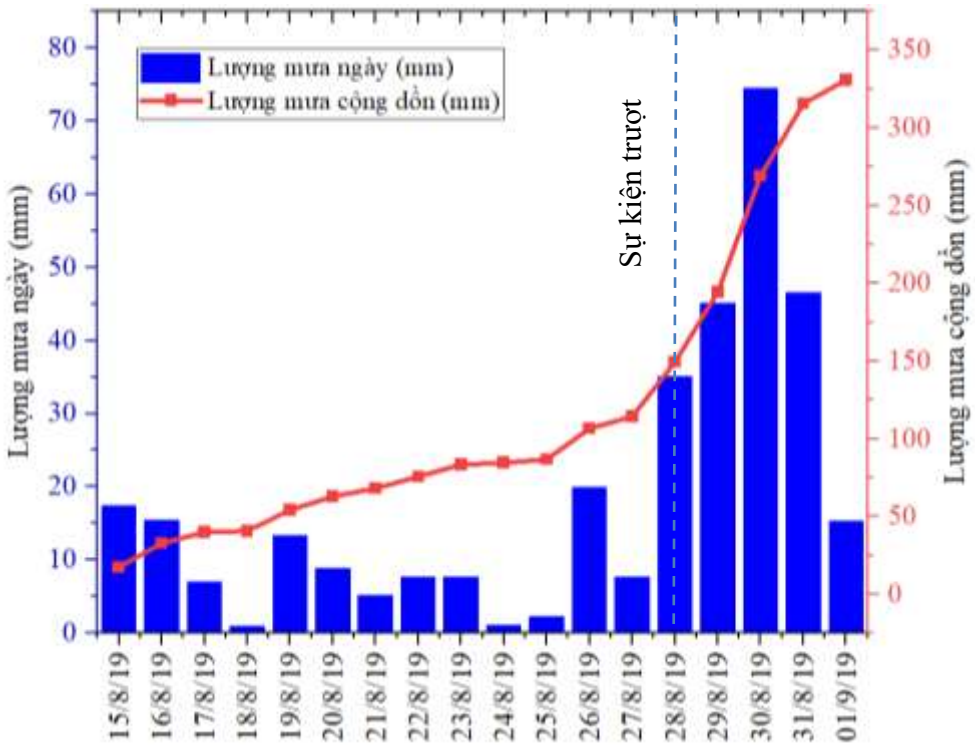
Bảng 4.3. Tổng hợp các trận mưa gây ra trượt km17+250 vài năm gần đây

Thời gian	Sự kiện và đặc điểm trượt đất	Hình ảnh minh họa
28/8/2019	Mưa lớn khiến đất đá ta luy dương TĐN tràn lấp mặt đường gây ách tắc giao thông, hỏng mặt đường, xói lở nền đường, phá hủy ta luy âm vị trí 1. Tạo dòng tạm thời phá hủy nền đường km10+300 và hư hỏng nền đường vị trí 2, 3.	
17/8/2020	Mưa lớn làm TĐN taluy dương, đất đá tràn lấp mặt đường (lần 10) gây ách tắc giao thông, xói lở nền đường, phá hủy ta luy âm vị trí 1. Tạo dòng tạm thời tiếp tục phá hủy nền đường km10+300 (khi đang xây cầu) và hư hỏng nền đường vị trí 2, 3.	
05/5/2021	Mưa lớn, TĐN làm đất đá lấp mặt đường, gây ách tắc giao thông, phá hủy ta luy âm vị trí 1. Tạo dòng tạm thời tiếp tục phá hủy nền đường km10+300 (khi xây cầu) và hư hỏng nền đường vị trí 2, 3.	

08/8/2023	Mưa lũ lớn làm đất đá trên ta luy dương thường xuyên chảy tràn ra mặt đường (TĐN) gây tắc đường, xói lở ta luy âm vị trí 1, mép sụt ăn sâu vào nền mặt đường láng nhựa. Tạo dòng tạm thời tiếp tục phá hủy nền đường km10+300 (khi xây cầu) và hư hỏng nền đường vị trí 2, 3.	

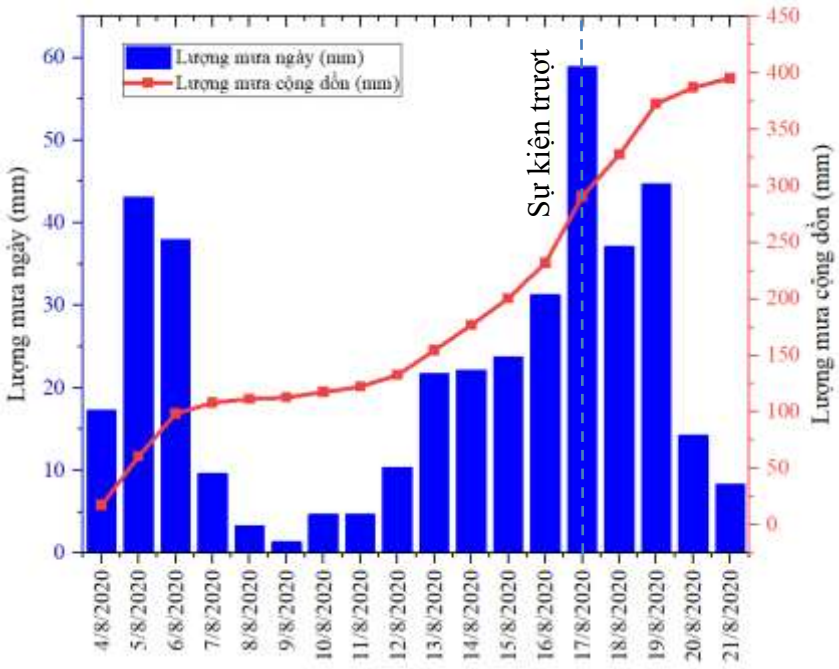
Dữ liệu mưa được điều tra kiểm chứng với các sự kiện trượt đất sử dụng tài liệu trạm thủy văn Nậm Giàng, đài khí tượng thủy văn Lai Châu và trạm khí tượng thủy văn Sìn Hồ. Vì các vị trí các trạm đo cách tương đối xa đỉnh khe cạn (km17+250), nên nghiên cứu này còn sử dụng số liệu mưa vệ tinh GPM theo Nasa Power. Kết quả so sánh cho thấy, lượng mưa từ nguồn Nasa Power các năm phản ánh tương đối chính xác so với lượng mưa tại các trạm thủy văn trong vùng nghiên cứu. Vậy nên, đã lựa chọn dữ liệu mưa vệ tinh GPM để xác định lượng mưa ngày ứng với thời gian mưa làm số liệu mô phỏng số. Xem xét biểu đồ mưa gắn với sự kiện TĐN tại khu vực thượng nguồn khe cạn trong phạm vi nghiên cứu cho thấy, một tháng trước thời điểm xảy ra trượt, diễn biến mưa tại khu vực này như sau:

- Với sự kiện trượt đất ngày 28/8/2019: Mưa nhỏ kéo dài trong 13 ngày liên tục, với tổng lượng mưa tích lũy lớn hơn 150 mm, sau đó xuất hiện mưa lớn ngay trước thời điểm ghi nhận trượt đất xảy ra (Hình 4.16).



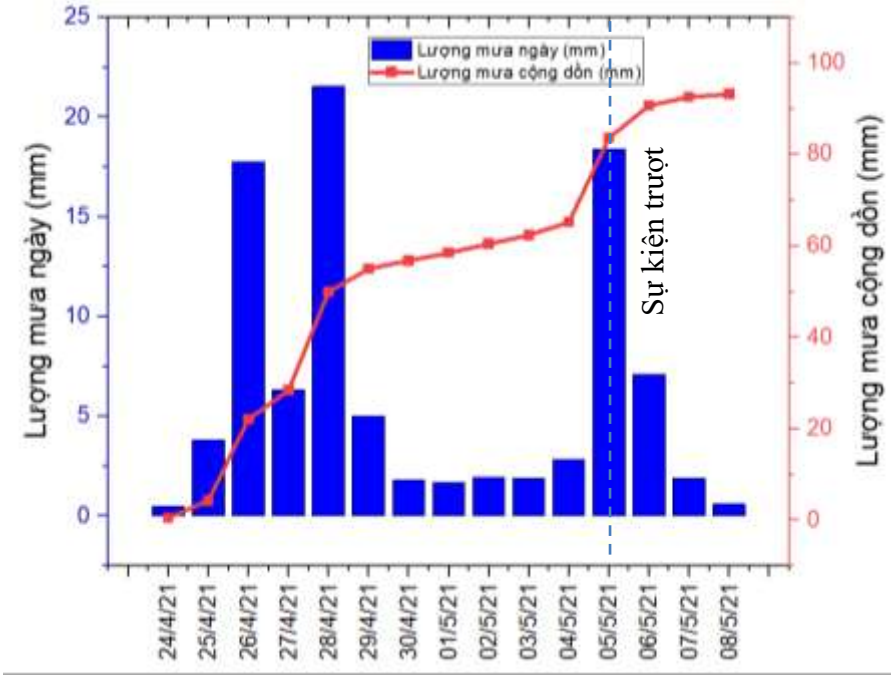
Hình 4.16. Lượng mưa cộng dồn liên quan sự kiện trượt đất ngày 28/8/2019

- Sự kiện TĐN ngày 17/8/2020: Mưa diễn biến phức tạp hơn, mưa lớn sau đó mưa nhỏ và lại mưa lớn kéo dài gần 2 tuần, kèm theo mưa rất lớn đột ngột xuất hiện đúng ngày (thời điểm) ghi nhận xảy ra trượt đất đá với lượng mưa tích lũy gần 300 mm (Hình 4.17).



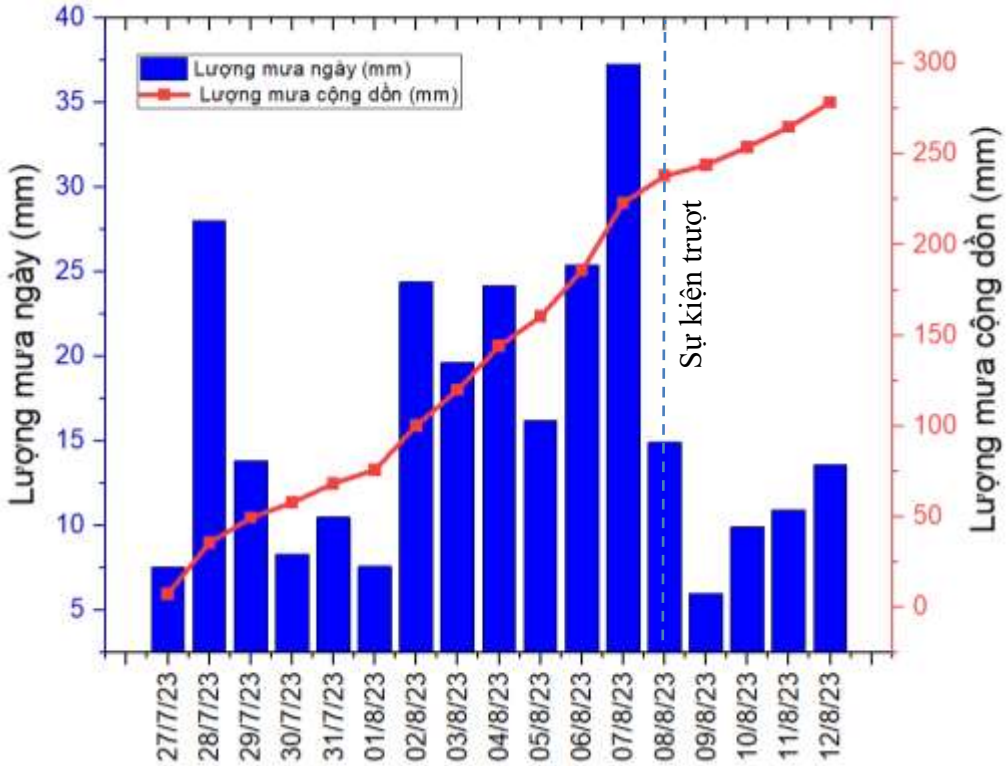
Hình 4.17. Lượng mưa cộng dồn liên quan sự kiện trượt đất ngày 17/8/2020

- Sự kiện TĐN ngày 05/05/2021: Mưa nhỏ kèm theo mưa lớn đột ngột trong 5 ngày đầu, sau đó mưa nhỏ kéo dài thêm 5 ngày liên tiếp rồi xuất hiện mưa lớn đột ngột đúng ngày xảy ra trượt đất (Hình 4.18). Lượng mưa tại thời điểm phát sinh sự kiện trượt đất lần này không lớn nhưng trước đó đã mưa lớn.



Hình 4.18. Lượng mưa cộng dồn liên quan sự kiện trượt đất ngày 05/05/2021

- Sự kiện trượt ngày 08/08/2023: Mưa lớn, mưa vừa kéo dài kèm theo mưa lớn đột ngột (lượng mưa tích lũy lớn hơn 200 mm) xuất hiện trước thời điểm xảy ra trượt đất (Hình 4.19).



Hình 4.19. Lượng mưa cộng dồn liên quan sự kiện trượt đất ngày 08/08/2023

Từ dữ liệu mưa Hình 4.16–4.19, cho thấy về vai trò của mưa tiền định đối với TĐN tại khu vực nghiên cứu. Sự kiện 28/8/2019 (Hình 4.16) thể hiện mô hình hai giai đoạn rõ rệt: một chuỗi mưa nhỏ kéo dài 13 ngày đóng vai trò tích lũy, làm tăng dần độ bão hòa nền đất, tiếp theo là một trận mưa lớn đóng vai trò kích hoạt trực tiếp sự kiện trượt. Sự kiện 17/8/2020 (Hình 4.17) có thời gian mưa tiền định dài nhất (gần 2 tuần) và lượng mưa tích lũy lớn nhất trong 4 sự kiện được phân tích (~300mm). Ngược lại, sự kiện 05/5/2021 (Hình 4.18), với thời gian mưa tiền định ngắn hơn (5 ngày). Sự kiện 08/8/2023 (Hình 4.19) tiếp tục thể hiện đúng mô hình mưa kéo dài kèm mưa lớn đột ngột, với tổng lượng mưa tích lũy hơn 200mm.

Tổng hợp cả 4 sự kiện cho thấy điểm chung "kích hoạt" trượt đất khi tổng lượng mưa tích lũy đạt khoảng (80–300) mm, thời gian thường kéo dài trên (12–14) ngày và đặc biệt đều xảy ra đúng thời điểm ngày hoặc ngay sau ngày mưa đột xuất lớn. Điều này được giải thích, quá trình mưa kéo dài làm tăng dần độ bão hòa của lớp đất phong hóa, làm giảm lực hút dính và sức kháng cắt của đất. Khi xuất hiện thêm một trận mưa có cường độ lớn, nước mưa thấm nhanh vào khối đất, làm tăng áp lực nước lỗ rỗng và giảm ứng suất hữu hiệu đột ngột, từ đó làm giảm đáng kể sức kháng cắt của đất, phá vỡ cấu trúc khối đất tầng phủ. Không có sự kiện nào trong 4 sự kiện chỉ xảy ra do mưa lớn đơn lẻ mà không có giai đoạn mưa tiền

định trước đó, cho thấy mưa tiền định có vai trò đáng kể đối với các sự kiện TĐN được phân tích, phù hợp với nhận định của Rahimi và nnk (2011) [151] về vai trò của mưa tiền định trong cơ chế trượt đất do mưa.

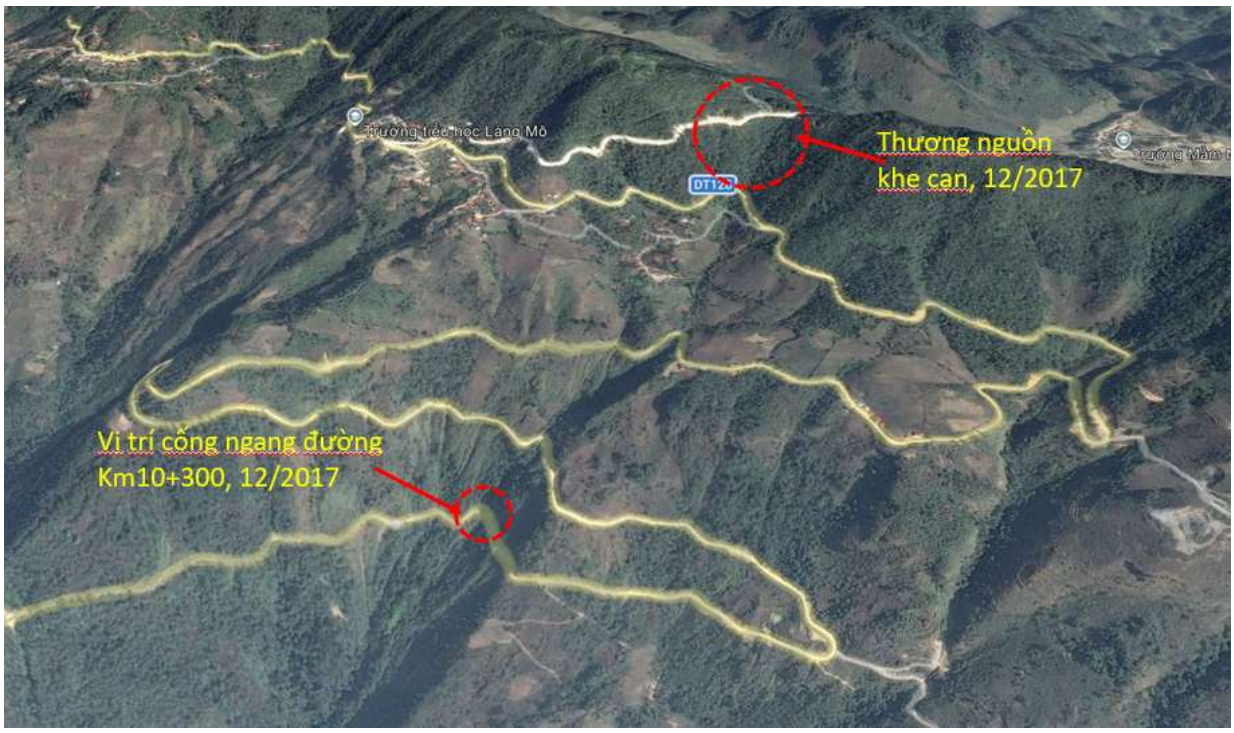
Kết quả này phù hợp và củng cố thêm cơ chế suy giảm lực hút dính ban đầu đã phân tích bằng mô phỏng số SEEP/W tại 3 mặt cắt tính toán (Mục 4.2, Chương 4): sự kiện trượt ngày 08/8/2023 (Hình 4.19) chính là sự kiện được sử dụng làm điều kiện biên mô phỏng, với chuỗi mưa tiền định 02–07/8/2023 ((16–37) mm/ngày, 6 ngày liên tục) làm giảm lực hút dính ban đầu của đất tầng phủ, dẫn đến FS<1 tại cả 3 mặt cắt tính toán. Như vậy, cả phân tích thống kê chuỗi mưa lịch sử (khe cạn km17+250) và mô phỏng số định lượng (3 mặt cắt SEEP/W) đều cho thấy xu hướng nhất quán rằng: mưa nhỏ kéo dài nhiều ngày trước đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành TĐN tại khu vực nghiên cứu, không chỉ riêng lượng mưa lớn tập trung mới là yếu tố nguy hiểm.

Từ kết quả phân tích thành phần hạt (Hình 3.23), thành phần khoáng vật đất tầng phủ (mục 3.3.3.1) và diễn biến mưa tiền định (Hình 4.16–4.19), có thể rút ra nhận định về cơ chế phát sinh TĐN tại khu vực nghiên cứu là kết quả tương tác giữa (i) đặc tính vật liệu tầng phủ không đồng nhất về thành phần hạt và khoáng vật theo cả phương đứng và phương dọc tuyến, (ii) khả năng giữ nước và tốc độ suy giảm lực hút dính của lớp đất tầng phủ dưới tác động của mưa, và (iii) chế độ mưa tích lũy kéo dài kết hợp mưa kích hoạt cường độ lớn. Sự không đồng nhất của vật liệu tầng phủ là một trong các yếu tố cần được xem xét khi lý giải mức độ khác biệt về diễn biến mất ổn định quan sát được giữa các vị trí dọc tuyến, dù cùng chịu tác động của điều kiện mưa tương tự.

4.4.3. Lịch sử mất ổn định nền đường tại km10+300 trên dòng chảy khe cạn

Vị trí nền đường tại km10+300 trên ĐT128 là vị trí số 4 mà khe cạn cắt ngang đường trong phạm vi nghiên cứu (vị trí cầu trên Hình 4.13, 4.14 và 4.15). Trước 2006, vị trí này là nền đường đào. Sau đó được bổ sung cống thoát nước ngang thuộc dự án "Cải tạo, nâng cấp ĐT128", hoàn thành và đưa vào khai thác cuối năm 2006 (Hình 4.20). Giai đoạn từ 2006 đến 12/2017 (hơn 10 năm), khi thảm thực vật còn khá dày, ít mưa lũ cực đoan, dọc lưu vực khe cạn vùng thượng lưu ít xuất hiện trượt đất, đặc biệt chưa xuất hiện điểm TĐN km17+250, nền đường và cống thoát nước ngang tại vị trí km10+300 được khai thác sử dụng bình thường, chưa bị hư hỏng và phá hủy nền đường (Phụ lục 11). Lần đầu tiên ghi nhận từ đợt mưa lũ cực đoan và bất thường năm 2018, phía thượng lưu khe cạn và dọc lưu vực này bắt đầu ghi nhận TĐN, cùng với đó lớp phủ thực vật khi này giảm, dòng vật liệu đất đá theo khe

cạn làm tăng động năng dòng chảy tác động và phá hủy nền đường nghiêm trọng vị trí cống tại km10+300, sụt trượt ta luy âm, nền đường hẹp, không đảm bảo an toàn khai thác và chia cắt giao thông. Phương án xây dựng cầu BTCT vượt khe tại đây được xem xét; sau đó tới mùa mưa 2019 tác động từ TĐN trên thượng lưu và dòng chảy tạm thời có cường độ gia tăng do vật liệu rời lòng khe cạn đã chia cắt hoàn toàn đoạn tuyến km10+300 và cầu vượt qua vị trí khe cạn này đã được triển khai thực hiện.



Hình 4.20. Hiện trạng vị trí cống km10+300 (nguồn Google Earth, 12/2017)

4.4.4. Phân tích ổn định nền đường trên dòng chảy khe cạn khi có vật liệu rời từ trượt đất nông bằng mô phỏng số

4.4.4.1. Trình tự các bước thực hiện mô phỏng trong mô hình RAMMS

Trong nghiên cứu này, sử dụng mô hình RAMMS là phần mềm do viện nghiên cứu tuyết và lở tuyết Thụy Sĩ phát triển, được sử dụng để mô phỏng quá trình lan truyền của dòng trượt đất đá, theo lý thuyết động lực học chất lưu Salm [154].

Trình tự các bước chính thực hiện mô phỏng tuân theo quy trình từ chuẩn bị số liệu đầu vào, xử lý số liệu đến phân tích kết quả, bao gồm 6 bước (Hình 4.21).

- Bước 1 - Chuẩn bị dữ liệu địa hình. Sử dụng bản đồ DEM có độ phân giải 2,0 m được bay chụp bằng UAV vào tháng 1/2024.

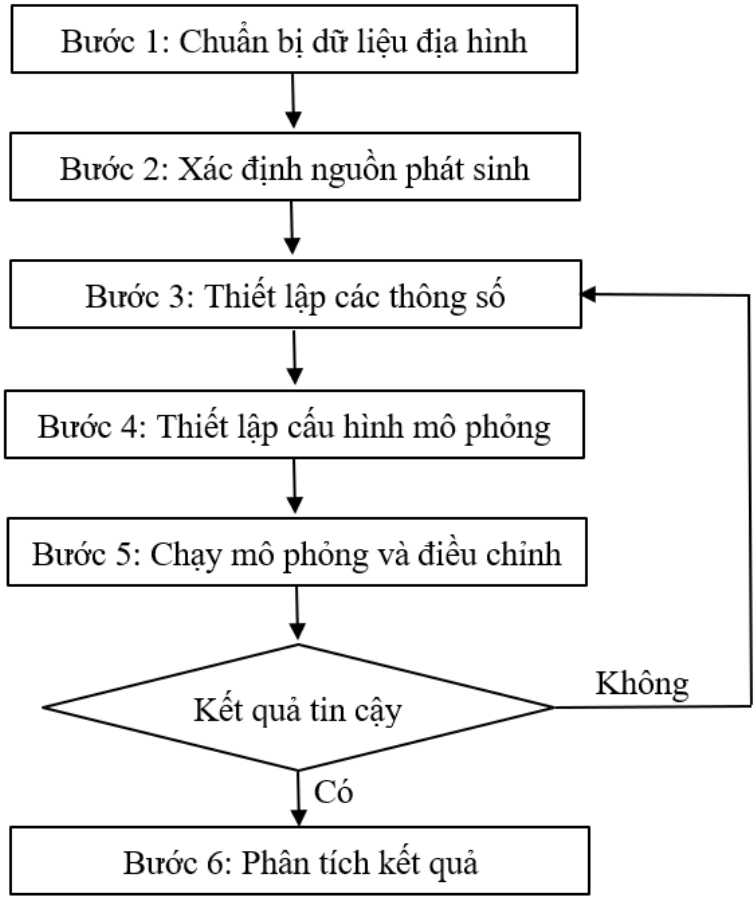
- Bước 2 - Xác định nguồn phát sinh vật liệu rời từ TĐN. Vùng phát sinh được vẽ trực tiếp trên bản đồ và chỉ định độ dày của lớp vật liệu trượt.

- Bước 3 - Thiết lập các thông số mô hình. Các thông số như khối lượng riêng hỗn hợp nước – vật liệu rời (ρ); hệ số ma sát đáy (μ) và hệ số ma sát rối – nhớt (ξ).

- Bước 4 - Thiết lập cấu hình mô phỏng, thời gian chạy, thời gian dừng tính toán.

- Bước 5 - Chạy mô phỏng và điều chỉnh kết quả. Tính toán chiều cao và vận tốc dòng chảy tại từng điểm lưới, so sánh kết quả mô phỏng với các sự kiện thực tế trong quá khứ để điều chỉnh thông số μ và ξ cho phù hợp với thực tế hiện trạng phá hủy nền, vật liệu lòng khe và TĐN thượng nguồn.

- Bước 6 - Phân tích kết quả. Sau khi hoàn thành, mô hình cung cấp các kết quả gồm chiều cao bối lắng lớn nhất (xác định phạm vi ngập lụt); vận tốc dòng trượt cực đại (đánh giá mức độ tàn phá của dòng đất đá); áp lực cực đại (hỗ trợ thiết kế các công trình bảo vệ); đồ thị biến thiên theo dõi sự thay đổi lưu lượng và thể tích theo thời gian.



Hình 4.21. Trình tự các bước mô phỏng trong mô hình RAMMS

4.4.4.2. Xác định vùng phát sinh và chiều dày của lớp vật liệu từ trượt đất nông

Trong mô hình RAMMS, vùng phát sinh được định nghĩa là khu vực ban đầu chứa vật liệu rời tham gia chuyển động. Vùng phát sinh trong nghiên cứu này được xác định theo quan điểm vùng hội tụ vật liệu thay vì chỉ giới hạn tại một vị trí TĐN đơn lẻ. Cụ thể, vùng

phát sinh được coi là phạm vi mà vật liệu từ quá trình TĐN xảy ra liên tiếp trên sườn dốc dồn tụ và tập trung trước khi hình thành dòng chảy chính.

Đỉnh khe cạn với độ dốc lớn 45^0, cho thấy đây là vùng có điều kiện tự nhiên bất lợi cho ổn định mái dốc. Trước tháng 2/2018, thông qua phân tích ảnh vệ tinh độ phân giải cao, toàn bộ sườn dốc vẫn còn được bao phủ bởi thảm thực vật, rừng còn khá dày đặc và liên tục. Không ghi nhận dấu hiệu hoạt động trượt hay xói mòn đáng kể trên bề mặt như Hình 4.22a và Phụ lục 11. Điều này cho thấy khu vực vẫn đang duy trì trạng thái ổn định. Tuy nhiên, từ năm 2018, dưới ảnh hưởng của các đợt mưa lớn bất thường có cường độ cao và kéo dài, một số vị trí đã xuất hiện TĐN khởi phát, đánh dấu giai đoạn mất ổn định ban đầu của khu vực. Các vụ TĐN liên tiếp ngày càng mở rộng tại vị trí đỉnh khe cạn, đã tạo ra một vùng trượt với diện tích lớn hình rẻ quạt điển hình đã hình thành, kéo dài từ phần đỉnh sườn (1495–1580) m xuống tới chân tuyến đường vào xã. Sau đó, do mất ổn định taluy âm tuyến đường vào xã – chính là ta luy dương ĐT128 tại km17+250, khối trượt tiếp tục lan rộng xuống chân dốc và tiếp xúc trực tiếp với tuyến ĐT128 (Hình 4.22b). Đến năm 2019, quá trình mở rộng trượt và tái hoạt động cục bộ trở nên rõ rệt. Hình thái trượt không còn đơn tuyến mà đã phát triển thành hệ thống trượt phân nhánh, với nhiều nhánh trượt phụ xuất hiện ở hai bên sườn trái và phải. Đáng chú ý, các rãnh xói sâu xuất hiện rõ nét trong lòng khối trượt chính, chứng tỏ dòng nước mưa bề mặt đã tham gia trực tiếp vào quá trình hoạt động trượt (Hình 4.22c). Giai đoạn 2023–2024, TĐN có xu hướng diễn biến phức tạp hơn, thể hiện qua sự biến đổi rõ rệt về hình thái và cơ chế chuyển dịch khối trượt. Mặt trượt chính tiếp tục xói sâu do tác động của mưa lớn, đồng thời xuất hiện nhiều vết trượt phụ có xu hướng phân nhánh lan tỏa, phát triển đồng thời theo phương ngang và phương dọc mái dốc. Bề mặt trượt bị chia cắt mạnh bởi hệ thống các rãnh xói nhỏ, có mật độ cao, kéo dài liên tục từ thượng lưu xuống đến chân dốc. Các đặc điểm địa hình này cho thấy sự hoạt động mạnh của TĐN, trong đó vật liệu rời từ tầng đất phong hóa được giải phóng và cuốn theo dòng chảy mặt hình thành dòng đất đá. Nước mưa đóng vai trò tích cực không chỉ trong việc gây bão hòa tầng đất phủ mái dốc mà còn tham gia tích cực vào quá trình vận chuyển và xói mòn khối vật liệu rời từ trượt. Đặc biệt, động năng và cường độ dòng chảy tạm trên khe cạn gia tăng khi chúng có thêm vận liệu hạt rời từ nguồn TĐN trước đó, khiến chúng có tính nguy hiểm cao hơn và trực tiếp gây phá hủy nền đường không chỉ tại vị trí số 1 mà còn các vị trí số 2, 3 và cầu km10+300 (Hình 4.22d và 4.14, 4.15). Dựa trên tổ hợp các bằng chứng địa hình, dấu tích hình thái hiện trạng các giai đoạn, có thể thấy đỉnh khe cạn và một số vị trí trên lưu vực khe cạn phát

sinh TĐN đã cung cấp vật liệu rời cho dòng chảy tạm trên lòng khe khi mưa lớn.



a) Ảnh Google Earth tháng 2/2017



b) Ảnh Google Earth tháng 2/2018



c) Ảnh Google Earth tháng 2/2020



d) Ảnh Google Earth tháng 1/2023

Hình 4.22. Hiện trạng vùng phát sinh trượt giai đoạn 2018 - 2023

Chiều dày của lớp vật liệu trượt tham gia chuyển động là điều kiện đầu vào quan trọng quyết định thể tích ban đầu, động lượng và cường độ dòng chảy. Tại vùng phát sinh chiều dày lớp vật liệu trượt được hiểu là chiều dày tổng của khối vật liệu đã tích lũy tại vùng hội tụ trước khi hình thành dòng chảy có chứa vật liệu đất đá. Dựa vào các quan sát

và điều tra thực địa, nghiên cứu sử dụng hai kịch bản để mô phỏng là 10 m và 15 m.

4.4.4.3. Thiết lập các thông số cho mô hình RAMMS

Trong mô hình RAMMS, hai hệ số quan trọng chi phối quá trình lan truyền và va đập của dòng trượt đất đá là hệ số ma sát đáy μ và hệ số ma sát rối – nhớt ξ. Đây là các tham số đầu vào bắt buộc cần được hiệu chỉnh để phù hợp với đặc tính vật liệu dòng trượt tại khu vực nghiên cứu.

Hệ số μ phản ánh đặc tính ma sát đáy giữa dòng vật liệu và địa hình. Trong quá trình hiệu chỉnh mô hình, giá trị ban đầu của μ có thể được ước lượng gần đúng theo quan hệ $\mu \approx \tan(\alpha)$, trong đó α là góc dốc trung bình tại vùng lắng đọng vật liệu. Khu vực lắng đọng có độ dốc khoảng 6^0, tương ứng với $\mu \approx 0{,}105$. Theo RAMMS dải giá trị khả thi của μ thường từ 0,05 – 0,4, với giá trị lớn hơn 0,4 hiếm khi đem lại kết quả mô phỏng thực tế. Do đó, lựa chọn $\mu = 0{,}1$ là giá trị ban đầu để phân tích mô phỏng.

Hệ số ξ, giá trị này phụ thuộc chủ yếu vào thành phần vật liệu. Theo khuyến nghị trong tài liệu RAMMS, ξ từ (100 – 200) m/s^2 với dòng hạt rời, ξ từ (200 – 1000) m/s^2 khi dòng sệt chứa nhiều bùn và nước. Kết quả nghiên cứu đặc trưng đất tầng phủ phong hóa (mục 3.3, chương 3) cho thấy hàm lượng hạt mịn (sét, bụi) chiếm tỷ lệ đáng kể, đặc trưng cho dòng trượt dạng sệt – bùn. Vì vậy, $\xi = 200$ m/s^2 được lựa chọn làm giá trị ban đầu hợp lý dùng cho quá trình mô phỏng.

Như vậy, quá trình mô phỏng hiện tượng TĐN kết hợp dòng chảy mưa tại lưu vực khe cạn, cặp giá trị ban đầu được lựa chọn là $\mu = 0{,}10$ và $\xi = 200$ m/s^2. Sau đó, các giá trị này được hiệu chỉnh theo phương pháp lưới thử nghiệm, với mục tiêu tối ưu hóa sự tương đồng giữa kết quả mô phỏng và dấu vết thực địa.

Quy trình hiệu chuẩn được thực hiện như sau:

- Bước 1: Giá trị ban đầu $\mu = 0{,}1$ và $\xi = 200$ m/s^2

- Bước 2: Thử dần các giá trị $\mu \pm 0{,}05$ và $\xi \pm 50$ m/s^2 so với giá trị ban đầu.

- Bước 3: So sánh kết quả mô phỏng với các quan sát thực địa về chiều cao bồi lắng tại các vị trí kiểm tra (Vị trí số 3 khoảng (3-4) m; vị trí cầu khoảng (2-3) m))

- Bước 4: Tinh chỉnh dần quanh các giá trị phù hợp nhất, lựa chọn tổ hợp thông số mô phỏng cho kết quả sát nhất với hiện trường.

Cặp thông số μ và ξ được xác định là phù hợp nhất trong khu vực mô phỏng được trình bày trong Bảng 4.4.

Bảng 4.4. Thông số μ và ξ phù hợp nhất sử dụng tính toán trong mô hình RAMMS

Các thông số đầu vào	Giá trị	
	Kịch bản 1 (H=10 m)	**Kịch bản 2 (H=15 m)**
μ	0,15	0,2
ξ (m/s^2)	200	250

Để đánh giá mức độ ổn định của kết quả tính toán, phân tích độ nhạy được thực hiện bằng cách thay đổi hệ số ma sát đáy μ = (0,10–0,25) và hệ số ma sát rối–nhớt ξ = (200-350) m/s^2, giữ cố định chiều dày vật liệu H=10m. Kết quả vận tốc và áp lực cực đại của dòng trượt tại vị trí cầu (Km10+300) được tổng hợp tại Bảng 4.5.

Bảng 4.5. Kết quả phân tích độ nhạy vận tốc và áp lực dòng trượt tại vị trí cầu (Km10+300) theo cặp thông số μ, ξ (kịch bản H=10m)

ξ (m/s^2)	**Chỉ tiêu**	**Đơn vị**	**μ**			
			0,1	**0,15**	**0,2**	**0,25**
200	Vận tốc	m/s	8,2	8	7,7	7,5
	Áp lực	kPa	206	200	195	190
250	Vận tốc	m/s	8,5	8,3	8	7,8
	Áp lực	kPa	211	204	199	194
300	Vận tốc	m/s	8,8	8,6	8,3	8,1
	Áp lực	kPa	215	209	204	198
350	Vận tốc	m/s	9,1	8,8	8,5	8,3
	Áp lực	kPa	221	215	209	203

Kết quả cho thấy vận tốc dao động trong khoảng (7,5–9,1) m/s (biên độ ~17,6%) và áp lực dao động trong khoảng (190–221) kPa (biên độ ~14,0%). Xét ảnh hưởng riêng từng thông số, μ và ξ có mức ảnh hưởng khác nhau tùy đại lượng: đối với vận tốc, μ tăng từ 0,10 lên 0,25, vận tốc giảm 8,5%, trong khi ξ tăng từ 200 lên 350 m/s^2 làm vận tốc tăng 10,0%, cho thấy ξ có ảnh hưởng lớn hơn μ. Đối với áp lực, mức biến đổi tương ứng là -7,8% và +7,5%, cho thấy ảnh hưởng của μ và ξ gần tương đương.

Như vậy, trên toàn miền khảo sát, mức biến động của vận tốc và áp lực đạt khoảng (14,0-17,6)%, cho thấy kết quả mô phỏng có độ nhạy nhất định đối với μ và ξ. Tuy nhiên trong lân cận bộ thông số hiệu chỉnh (μ=0,15, ξ=200 m/s²), mức biến động chỉ khoảng (2,0–3,8)% khi thay đổi μ hoặc ξ lần lượt trong khoảng ±0,05 và ±50 m/s². Kết quả cho thấy mô hình tương đối ổn định trong lân cận bộ thông số được lựa chọn.

4.4.4.4. Kết quả phân tích mô phỏng

Kết quả tính toán chi tiết cho kịch bản 1 được trình bày ở Phụ lục 12, kịch bản 2 ở Phụ lục 13. Tổng hợp kết quả tính toán mô phỏng số được thể hiện tại Bảng 4.6.

Bảng 4.6. Tổng hợp kết quả tính toán mô phỏng số trên RAMMS

Chỉ tiêu	Đơn vị	Vị trí số 1		Vị trí số 2		Vị trí số 3		Vị trí cầu (số 4)	
		H=10m	H=15m	H=10m	H=15m	H=10m	H=15m	H=10m	H=15m
Chiều cao bồi lắng lớn nhất	m	8	10	5,6	8,5	3,5	4,5	2,5	3,5
Vận tốc dòng trượt cực đại	m/s	18	16,5	7,5	4,6	10	6	8	7,5
Áp lực cực đại	kPa	674	560	70	30	161	130	200	184
Thời gian	s	15	15	70	75	135	170	175	210

Nhiều nghiên cứu gần đây đã phân tích ngưỡng áp lực tác động của dòng chảy chứa vật liệu rời (bùn đất, đá) có khả năng gây hư hại nghiêm trọng đến nền đường, đặc biệt tại các tuyến đường miền núi không có kết cấu gia cố bảo vệ.

Theo Nieto và nnk (2022) [137], nền đường bắt đầu có biểu hiện hư hỏng khi chịu áp lực từ 30 kPa trở lên, trong đó áp lực trên 50 kPa đã làm tăng đáng kể xác suất phá hủy cục bộ lề đường và nền đường. Kết quả thí nghiệm máng trượt của Zheng và nnk (2022) [200] cho thấy với vận tốc từ (5–10) m/s, áp lực tại chân dốc có thể lên tới (200–400) kPa, vượt xa giới hạn chịu lực của các tuyến đường cấp thấp và đề xuất ngưỡng phá hủy cho nền đường không có biện pháp bảo vệ là 100 kPa.

Các nghiên cứu gần đây hơn như của Baggio và nnk (2024) [42] và He và nnk (2024) [92] đều thống nhất rằng, đường không có biện pháp bảo vệ không nên thiết kế để chịu áp lực quá (80–100) kPa. Trong khi Li và nnk (2024) [114] thông qua khảo sát hiện trường cho thấy nền đường bị hư hại hoàn toàn thường xảy ra khi áp lực vượt 120 kPa. Đối với các kết cấu kiên cố như đường bê tông, cống hộp hoặc mố cầu, Wahab và nnk (2025) [182] xác định 100 kPa là ngưỡng tới hạn gây tổn hại nghiêm trọng về mặt kết cấu.

Từ các phân tích trên, có thể rút ra kết luận ngưỡng áp lực khoảng 100 kPa là mốc nguy hiểm đối với kết cấu nền đường không được bảo vệ, đặc biệt là trong điều kiện địa hình dốc và xuất hiện dòng trượt sau mưa lớn. Bảng 4.7 dưới đây tổng hợp chi tiết các mức áp lực gây hư hỏng nền đường từ các nghiên cứu nêu trên, làm cơ sở tham chiếu cho việc đánh giá kết quả mô phỏng tại khu vực nghiên cứu.

Bảng 4.7. Tổng hợp ngưỡng áp lực gây hư hỏng đường giao thông

Ngưỡng áp lực, kPa	Mức độ tác động	Mô tả tác động
< 30	Nhẹ	Xói trôi rãnh, trôi đất lề, không phá hoại kết cấu chính.
(30 – 50)	Trung bình	Gây xói chân mái ta luy, xói móng, có thể bật tấm gia cố mái.
(50 – 80)	Cao	Lún móng và nền đường, bong bật lớp mặt, hư hỏng rãnh thoát nước.
(80 – 100)	Nguy hiểm	Mặt đường không được bảo vệ có thể phá hủy cục bộ.
> (100 – 150)	Rất nguy hiểm	Mặt đường không được bảo vệ có thể phá hủy diện rộng, hoặc phá hủy hoàn toàn nền đường.

Kết quả mô phỏng RAMMS (Bảng 4.6) cho thấy áp lực cực đại tác động từ dòng trượt đất đá tại các vị trí phân tích có khác biệt đáng kể, dao động từ (30 – 674) kPa. Khi đối chiếu với ngưỡng áp lực gây hư hại mặt và nền đường đã trình bày trong Bảng 4.7, có thể phân tích chi tiết mức độ nguy cơ và cơ chế phá hủy tại các vị trí như sau:

- Vị trí số 1 - Kết quả mô phỏng ghi nhận chiều dày bồi lắng đạt 8,0 m (kịch bản 1) và 10,0 m (kịch bản 2), phản ánh rõ lượng vật liệu tích tụ lớn ngay tại vùng khởi phát. Vận tốc dòng trượt cực đại tới 18 m/s và 16,5 m/s cho hai kịch bản, áp lực cực đại lần lượt là 674 kPa và 560 kPa tại thời điểm t = 15 s. Đây là vị trí có động năng cao nhất, dòng chảy hình thành nhanh, áp lực lớn vượt xa ngưỡng nguy hiểm thuộc ngưỡng gây phá hủy hoàn toàn nền mặt đường. Quan sát hiện trạng (Hình 4.23a) cho thấy khu vực này đã từng bị phá hủy nhiều lần trong giai đoạn 2018–nay, hoàn toàn phù hợp với kết quả mô phỏng.

- Vị trí số 2 – Chiều cao bồi lắng dao động 5,6 m (kịch bản 1) đến 8,5 m (kịch bản 2), cho thấy vật liệu rời tích tụ tiếp tục gia tăng theo chiều sâu khối trượt. Tuy nhiên, áp lực cực đại chỉ nằm trong khoảng (30–70) kPa, thuộc ngưỡng trung bình, không vượt quá mức gây hư hại nghiêm trọng đối với nền đường không gia cố. Thực địa (Hình 4.23b) cho thấy vị trí số 2 ít bị ảnh hưởng hơn bởi dòng chảy có chứa vật liệu rời, đoạn từ vị trí 1 tới vị trí 2 đóng vai trò phân tán động năng dòng trượt. Tuy không phải vùng nguy hiểm nhất, nhưng vẫn có đợt dòng bùn đất lấp đầy mặt đường, gây hư hỏng mặt đường, nên cần thực hiện các biện pháp giúp ổn định mái dốc lưu vực dọc khe cạn, ngăn giữ vật liệu rời và thoát nước hợp lý nhằm giảm thiểu dòng chảy tích lũy vật liệu tại khu vực này.

- Vị trí số 3 - Áp lực mô phỏng đạt 161 kPa (kịch bản 1) và 130 kPa (kịch bản 2), áp lực này nằm trong ngưỡng gây hư hại nghiêm trọng cho nền đường. Thực tế (Hình 4.23c) ghi nhận dòng chảy đất đá gây tắc toàn bộ hệ thống thoát nước ngang, hư hỏng một phần

nền đường và lấp đầy mặt đường. Vị trí số 3 là vị trí có động năng lớn thứ hai sau khu vực khởi phát, trước vị trí số 3 ngoài việc cắt nguồn vật liệu rời (ngăn chặn trượt hay xói mòn) cần có các giải pháp ngăn giữ vật liệu đất đá trên dòng chảy nhằm giảm động năng của dòng, giảm nguy cơ phá hủy nền mặt đường.



(a) Vị trí số 1



(b) Vị trí số 2



(c) Vị trí số 3



(d) Vị trí số 4 (cầu km10+300)

Hình 4.23. Hiện trạng các vị trí khe cạn cắt qua ĐT128 (UAV chụp 1/2024)

- Vị trí số 4 – vị trí cầu (km10+300). Chiều dày bồi lắng 2,5 m (kịch bản 1) và 3,5 m (kịch bản 2), cho thấy nguy cơ bồi lấp phần trũng lòng khe dưới gầm cầu. Vận tốc dòng chảy dao động từ (7,5–8) m/s, với áp lực cực đại 200 kPa và 184 kPa cho 2 kịch bản đủ khả năng phá hủy lớp đất đá bảo vệ móng của mố và trụ cầu hoặc xói mòn lòng khe cạn. Thực trạng (Hình 4.23d) cho thấy, tuyến đường bị phá hủy giai đoạn 2018 – 2020 và được thay thế bằng cầu BTCT vào năm 2021; tuy nhiên từ năm 2022 – nay vẫn tiếp tục xảy ra xói mòn hay phá hủy kết cấu bảo vệ mố M1, trụ T1 và lòng khe cạn dưới gầm cầu, phù hợp với kết quả mô phỏng.

4.4.5. Trượt đất nông và dòng chảy tạm trên khe cạn khi mưa lớn với ổn định công trình cầu km10+300

Cầu cạn km10+300 được xây dựng mới, hoàn thành và đưa vào sử dụng từ tháng 12/2021, thay thế đoạn nền đường thường xuyên bị phá hủy giai đoạn 2018 - 2020. Trước

và trong thời gian xây dựng, vị trí này thường xuyên bị xói hay phá hủy nền do dòng chảy chứa vật liệu rời theo lòng khe cạn tràn xuống, trực tiếp tác động tới mái dốc hay nền đường ở đây. Đặc biệt các sự kiện TĐN ngày 28/8/2019, 17/8/2020, 05/05/2021 tại đỉnh lưu vực khe cạn (km17+250), trùng khớp với sự kiện phá hủy nghiêm trọng nền đường tại vị trí km10+300. Sau khi đưa cầu vào vận hành, từ 2022 hay đặc biệt ngày 08/08/2023 sau những trận mưa lớn kéo dài, điểm TĐN km17+250 tái trượt với lượng vật liệu rời lớn, tiếp tục trực tiếp cung cấp nguồn vật liệu cho dòng chảy lòng khe cạn. Dòng chảy có động năng cao do kéo theo nhiều vụn đất đá dồn tới vị trí cầu, gây xói mòn và sụt trượt mái dốc lòng cầu, taluy âm hạ lưu cầu, hư hỏng kết cấu bảo vệ mố cầu M1, nứt tách và phá hủy nền đất đặt móng mố M1 cũng như trụ T1, gây chuyển vị ngang dầm và mố cầu. Xói mòn lòng khe gây tác động "lan truyền" và "lôi kéo" hình thành khối trượt ta luy âm và gây dịch chuyển nền đường dẫn sau mố M1, thể hiển bởi các dấu hiệu lún và nứt mặt đường sau mố M1 (Hình 4.24).



Hình 4.24. Dấu hiệu mất ổn định khối đất đá ta luy âm sau mố M1 (chụp 1/2024)

Sau mưa lũ tháng 8-9/2024 xuất hiện nhiều diễn biến mới, tác động dòng chảy với vật liệu rời từ TĐN trên lưu vực khe cạn tiếp tục mở rộng và đào sâu lòng khe dưới gầm cầu, làm chuyển vị mái dốc sau mố M1 và nền trụ T1 biên độ lớn hơn. Theo đó, phần nền đường dẫn sau mố M1 bị biến dạng (lún, dịch chuyển ngang) nghiêm trọng hơn, mặt đường nhựa hư hỏng nặng hơn so với thời điểm tháng 01/2024 (Hình 4.25 và 4.26).



(a) Xói lòng khe dưới gầm cầu (chụp 1/2024) (b) Chuyển vị đường sau mố M1 (chụp 11/2024)

Hình 4.25. Phá hủy lòng khe dưới cầu do dòng chảy chứa vật liệu rời từ TĐN

Kết quả khảo sát tháng 11/2024, sau đợt mưa lũ tháng 8-9/2024 lòng khe cạn dưới cầu xói và trượt đất nghiêm trọng hơn nhiều so với thời điểm tháng 1/2024. Theo đó, lòng khe cạn bị xói sâu, gây trượt đất đá ở nền vị trí móng và trụ T1, sau đó kéo theo trượt nền phạm vi mố M1. Xói và trượt làm lộ đáy móng tường chắn phản áp trước mố M1, lộ bệ móng trụ T1 và đặc biệt còn xuất hiện vết nứt ngang cọc nhồi trụ T1 (Hình 4.27).



Hình 4.26. Phá hủy lòng khe và vật liệu lắng đọng dưới cầu (chụp 1/2024)



Hình 4.27. Xói và dịch chuyển khối đất đá làm lộ bệ móng tường chắn trước mố M1 và nứt ngang cọc nhồi trụ T1 (chụp 11/2024)

4.5. Phân tích thiệt hại công trình điển hình liên quan đến dòng chảy tạm thời chứa vật liệu rời từ trượt đất nông phạm vi nghiên cứu

4.5.1. Thiệt hại đối với hạ tầng giao thông

Việc đánh giá thiệt hại đối với hạ tầng giao thông thực hiện dựa trên các thông tin thu được từ thực tế các sự kiện thiệt hại đã xảy ra, phù hợp với nghiên cứu của Nieto và nnk (2022) [137]. Ở đây đánh giá thiệt hại liên quan một vị trí TĐN (km17+250), tạo nguồn vật liệu rời trong dòng chảy tạm thời trên lòng khe cạn khi mưa lớn, trực tiếp làm hư hỏng hay phá hủy nền mặt đường ĐT128 tại các vị trí các giao cắt khe cạn từ sau khi hoàn thành cầu (từ 2023 đến 2025).

Kết quả mô phỏng tác động của dòng chảy trên lòng khe cạn khi cuốn theo vật liệu rời từ nguồn TĐN dọc lưu vực khe cạn kết hợp thực tế điều tra, đã xác định được mức độ

ảnh hưởng tới các vị trí 1, 2, 3 và 4 (km10+300) (Hình 4.14). Sử dụng kết quả khảo sát hiện trạng để đánh giá thiệt hại liên quan hạ tầng giao thông, cụ thể như sau:

- Vị trí 1 - Nền đường bị trượt và đứt gãy gần như hoàn toàn. Một lượng lớn vật liệu đất đá tràn lên mặt và phủ kín đường. Chiều dài đoạn nền mặt đường bị phá hủy và lấp đất khoảng 60 m, với lượng đất đá cần phải bốc xúc, dọn dẹp khoảng 10.000 m^3.

- Vị trí 2 - Nền đường ít bị ảnh hưởng, có một lượng khá lớn đất đá từ TĐN phía trên dồn xuống bồi lấp cống thoát nước và tràn lên mặt đường. Khối lượng đất đá cần bốc xúc, dọn dẹp khoảng 3.000 m^3.

- Vị trí 3 – Mặt đường bị bị bong bật lớp mặt, một lượng lớn đất đá từ dòng chảy khe cạn bồi lấp cống thoát nước, tràn lấp mặt đường. Khối lượng đất đá bốc xúc, dọn dẹp khoảng 2.000 m^3.

- Vị trí cầu - Hiện trạng và các kết quả tính toán xác định vị trí cầu km10+300 khó có khả năng sửa chữa cải tạo vì chi phí tương đương xây dựng mới, cần phải tiến hành thay thế bằng phương án cầu mới với bổ sung 2 km đường dẫn tránh xa phạm vi ảnh hưởng hoặc thay đổi sang vị trí tuyến mới dài (15 – 17) km.

Để xác định mức thiệt hại và chi phí thay thế các hạng mục công trình, việc tính toán được thực hiện dựa trên các quy định hiện hành về quản lý chi phí đầu tư xây dựng công trình, cụ thể như sau:

- Chi phí xây dựng và thiết bị được tính toán theo suất vốn đầu tư xây dựng công trình ban hành kèm theo Quyết định số 816/QĐ-BXD ngày 22/8/2024 của Bộ Xây dựng, đồng thời tham khảo suất đầu tư của các đoạn tuyến tương tự đang thi công trong khu vực miền núi;

- Chi phí quản lý dự án, tư vấn và chi phí khác được xác định theo quy định trong các Nghị định và Thông tư hướng dẫn của Bộ Xây dựng;

- Chi phí đền bù giải phóng mặt bằng và tái định cư (GPMB và TĐC) được lấy tạm tính trên cơ sở diện tích đất ảnh hưởng và đơn giá bồi thường tại địa phương;

- Chi phí dự phòng lấy giá trị 15% theo quy định, trong đó bao gồm 10% dự phòng khối lượng và 5% dự phòng trượt giá, phù hợp với các hướng dẫn trong công tác lập và quản lý chi phí đầu tư xây dựng.

Với cách tiếp cận này, thiệt hại do TĐN đối với hạ tầng giao thông được lượng hóa dưới dạng thiệt hại tài sản, thể hiện thông qua chi phí phục hồi hoặc thay thế công trình.

Tổng hợp kết quả tính toán được trình bày trong Bảng 4.8, tổng thiệt hại ước tính

khoảng 180 tỷ đồng. Trong đó, chi phí xây dựng chiếm tỷ trọng lớn nhất (153,6 tỷ đồng), phản ánh mức độ hư hỏng nghiêm trọng của nền mặt đường và các công trình trên tuyến. Các khoản chi phí còn lại bao gồm chi phí đền bù giải phóng mặt bằng, chi phí quản lý dự án, chi phí tư vấn đầu tư xây dựng, chi phí khác và dự phòng phí chiếm tỷ trọng không đáng kể. Như vậy, một vị trí TĐN ở thượng lưu khe cạn gây ra thiệt hại rất lớn đối với hạ tầng giao thông khi kết hợp với các trận mưa lớn, do dòng chảy chứa vật liệu rời di chuyển theo lòng khe và tác động trực tiếp đến các vị trí giao cắt với tuyến đường. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc nhận diện sớm các khu vực có nguy cơ phát sinh TĐN trong các lưu vực khe tụ thủy phía trên tuyến giao thông tương tự, nhằm đề xuất các giải pháp phòng tránh và giảm thiểu thiệt hại đối với hạ tầng GTMN.

Bảng 4.8. Tổng hợp thiệt hại tính toán cơ bản

STT	Hạng mục chi phí	Ký hiệu	Giá trị (triệu đồng)
1	Chi phí xây dựng	GXD	153.600
2	Chi phí đền bù giải phóng mặt bằng	Ggpmb	4.000
3	Chi phí quản lý dự án	Gqlda	2.409
4	Chi phí tư vấn đầu tư xây dựng	Gtv	5.832
5	Chi phí khác	Gk	1.262
6	Chi phí dự phòng	Gdp	12.897
Tổng cộng		**TMĐT**	**180.000**

4.5.2. Thiệt hại đối với người và các phương tiện tham gia giao thông

Dựa trên kết quả mô phỏng lan truyền dòng trượt đất đá trong lòng khe cạn, khu vực bị ảnh hưởng trực tiếp bởi dòng chảy vật liệu rời không có sự xuất hiện của nhà dân hay khu dân cư sinh sống. Toàn bộ các điểm phát sinh trượt đất, đặc biệt tại khu vực km17+250, và các vị trí dòng trượt cắt qua khe cạn đều nằm trong khu vực địa hình dốc, rừng đầu nguồn, không có dân cư cư trú. Ngược lại, nhà ở và dân cư sinh sống phân bố tập trung tại các khu vực bằng phẳng, cách xa vị trí trượt phát sinh và hành lang khe cạn, nên trong giai đoạn nghiên cứu từ 2023–2025, không ghi nhận tác động trực tiếp đến tài sản, tính mạng người dân trong phạm vi nghiên cứu.

Các thiệt hại liên quan "đóng" đường và tạm dừng giao thông hướng Chăn Nưa đi Sìn Hồ các đợt bị chia cắt hay đất đá lấp đầy mặt đường do trượt không xem xét trong nghiên cứu này. Ngoài ra, từ tháng 02/2024, cầu tại km10+300 bắt đầu hạn chế lưu thông vào mùa mưa bão do nguy cơ xói lở móng và hư hỏng kết cấu bảo vệ. Đặc biệt, từ tháng 08/2025 đến nay, theo thông báo Sở GTVT Lai Châu tuyến cầu đã cấm hoàn toàn phương

tiện ô tô lưu thông, chỉ cho phép xe máy và người đi bộ qua cầu để bảo đảm an toàn. Do đó, trong phạm vi luận án này, các thiệt hại trực tiếp đến người và phương tiện tham gia giao thông cũng không được xem xét.

4.6. Đề xuất giải pháp giảm thiểu tác động trượt đất nông tới ổn định nền đường miền núi có địa hình chia cắt đặc trưng

Đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ, tuyến ĐT128 có nền đường đào qua vùng địa hình dốc, khe cạn, ta luy dương cắt và đổ về phần đường giao thông, một đặc trưng phổ biến mạng lưới giao thông khu vực MNTB. Ngoài tác động trực tiếp làm chia cắt giao thông, hư hỏng mặt hay nền đường và hệ thống thoát nước bởi TĐN từ ta luy dương nền đào như đã phân tích ở trên, khi có TĐN lưu vực khe cạn kết hợp dòng chảy tạm thời còn có thể gây phá hủy nền đường nghiêm trọng hơn. Từ những phân tích định tính và định lượng, nghiên cứu đề xuất một số giải pháp kỹ thuật phòng chống TĐN nhằm giảm thiểu tác động trực tiếp tới an toàn khai thác hay hư hỏng nền mặt đường và giải pháp trực tiếp tác động nhằm giảm thiểu động năng dòng chảy tạm trên khe cạn có khả năng gây mất an toàn giao thông cũng như phá hủy đường.

4.6.1. Nhóm giải pháp phòng chống trượt đất nông

4.6.1.1. Cơ sở đề xuất giải pháp

Kết quả phân tích mô phỏng trong mục 4.2 cho thấy, cơ chế mất ổn định mái dốc tại khu vực nghiên cứu được xác định là do sự gia tăng áp lực nước lỗ rỗng kết hợp với sự suy giảm lực hút dính trong điều kiện bão hòa sau mưa lớn giữ vai trò quyết định. Do đó, việc lựa chọn giải pháp phòng chống cần được thực hiện theo hướng kết hợp đồng bộ biện pháp thoát nước, gia cố sâu và bảo vệ bề mặt. Cụ thể, việc điều tiết hay cắt nước bề mặt và thoát nước ngầm đóng vai trò kiểm soát nguồn gây xói, thấm và mực nước trong đất, duy trì áp lực nước lỗ rỗng ở mức an toàn, góp phần ổn định sườn dốc; giải pháp gia cố sâu đảm bảo ổn định tổng thể của khối đất đá; lớp phủ bề mặt có tác dụng bảo vệ lớp đất phong hóa nông – khu vực dễ bị xói, suy giảm lực hút dính sau mưa.

4.6.1.2. Nhóm giải pháp gia cố sâu kết hợp chống xói bề mặt bằng kết cấu truyền thống

a) Đinh đất kết hợp khung BTCT và che phủ chống xói bề mặt bằng đá xây

Gia cố mái dốc kết hợp đinh đất, khung BTCT và che phủ bề mặt bằng đá xây là một trong những biện pháp truyền thống được sử dụng trong phòng chống TĐN. Trong hệ kết cấu này, các thanh đinh đất là các thanh thép được khoan cắm sâu vào lớp đất phong hóa đóng vai trò tăng cường khả năng chịu kéo và cải thiện trạng thái ứng suất trong khối đất.

Khung BTCT được xây dựng trên bề mặt mái dốc có vai trò tạo thành hệ kết cấu khung cứng liên kết với đầu các thanh đinh, giúp phân bố đều lực giữ và ổn định bề mặt mái dốc. Lớp đá xây có nhiệm vụ bảo vệ bề mặt mái dốc khỏi tác động trực tiếp của nước mưa và dòng chảy mặt, qua đó ngăn xói mòn và rửa trôi lớp đất phong hóa.

Trước khi thi công giải pháp này, mái dốc nền đào được sửa lại về hệ số mái nghiêng, chiều cao mỗi cơ, bề rộng bậc cơ, … theo giới hạn trên tương ứng cấp đất đá được quy định trong tiêu chuẩn thiết kế đường giao thông hiện hành (TCVN4054).

Các lỗ khoan đinh đất được thi công bằng máy khoan chuyên dụng với đường kính khoảng 110 mm. Thanh đinh sử dụng thép gân đường kính (25–40) mm và bơm vữa xi măng để tạo liên kết với môi trường đất xung quanh. Chiều dài đinh thiết kế 7,5 m, được xác định từ kết quả mô phỏng nhằm đảm bảo phần neo nằm sâu trong vùng đất ổn định phía sau mặt trượt tiềm năng. Hệ khung BTCT được bố trí dạng lưới với kích thước ô phổ biến từ (2×2) m đến (3×3) m. Tiết diện dầm khoảng (20×30) cm hoặc (30×40) cm tùy theo chiều cao mái dốc và điều kiện địa chất. Đá xây thường là đá hộc hoặc đá chẻ có cường độ cao, chống phong hóa tốt. Chiều dày lớp đá xây thường dao động từ (20–30) cm tùy thuộc kích thước đá và điều kiện ổn định của mái dốc.

Ngoài ra, nhóm giải pháp kiểm soát hệ thống tiêu thoát thoát nước được bố trí đồng bộ nhằm kiểm soát điều kiện thủy lực trong khối đất. Thoát nước mặt được thực hiện bằng rãnh đỉnh và các bậc nước trên mái dốc, trong khi thoát nước sâu được bố trí bằng các lỗ khoan nghiêng trong thân dốc nhằm giảm áp lực nước lỗ rỗng.

Giải pháp này có ưu điểm chống xói, bảo vệ bề mặt mái dốc tốt và độ bền lâu dài cao. Tuy nhiên, nhược điểm là thời gian thi công dài và chi phí xây dựng lớn. Do đó chỉ phù hợp với các mái dốc cao, khu vực có nguy cơ xói mạnh hoặc điều kiện mưa lớn kéo dài.

b) Đinh đất kết hợp khung BTCT và che phủ chống xói bề mặt bằng bê tông phun

Trong trường hợp mái dốc có độ dốc lớn hoặc yêu cầu thi công nhanh, lớp bảo vệ bề mặt có thể được thay thế bằng bê tông phun. Giải pháp này vẫn sử dụng hệ đinh đất, khung BTCT và hệ thống thoát nước để gia cố, trong khi lớp bê tông phun được thi công phủ trên bề mặt mái dốc trong các ô khung, tạo thành lớp bảo vệ liên tục giúp chống xói và ổn định lớp đất phong hóa nông. Lớp bê tông phun có chiều dày phổ biến từ (5–10) cm, hỗn hợp bê tông phun thường bao gồm xi măng, cát, nước và các phụ gia tăng cường độ bám dính hoặc rút ngắn thời gian đông kết.

Ưu điểm của phương án này là khả năng chống xói cao, thi công nhanh và tạo lớp bảo vệ bề mặt đồng nhất. Tuy nhiên, khả năng thoát nước phía sau lớp bê tông phun bị hạn chế nếu hệ thống tiêu thoát nước không được bố trí hợp lý, vì vậy cần kết hợp với các lỗ thoát nước hoặc hệ thống thoát nước ngầm phù hợp. Giải pháp này thường được áp dụng cho các mái dốc có độ dốc lớn hoặc khu vực yêu cầu ổn định bề mặt nhanh sau thi công.

c) Đinh đất kết hợp khung BTCT và che phủ chống xói bề mặt bằng tấm bê tông đúc sẵn có hoặc không có lỗ trồng cỏ

Khi chiều cao mái dốc không lớn nhưng cần rút ngắn thời gian thi công, lớp bảo vệ bề mặt được thay thế bằng tấm bê tông đúc sẵn. Các tấm bê tông này được bố trí trong các ô khung BTCT tạo thành lớp phủ giúp bảo vệ lớp đất phong hóa khỏi tác động trực tiếp của nước mưa, dòng chảy mặt, đồng thời hạn chế sự hình thành rãnh xói trên bề mặt mái dốc.

Tấm bê tông cốt thép đúc sẵn là các cấu kiện bê tông được chế tạo sẵn tại nhà máy hoặc bãi đúc và sau đó lắp đặt trên bề mặt mái dốc. Nó có dạng hình vuông hoặc hình chữ nhật với kích thước phổ biến từ (0,5–1,0) m và chiều dày từ (8–12) cm. Trong một số trường hợp, tấm bê tông được thiết kế có lỗ trồng cỏ hoặc khe hở nhằm tăng khả năng thoát nước và tạo điều kiện phát triển thảm thực vật.

Giải pháp này có ưu điểm thi công nhanh, chất lượng dễ kiểm soát và tuổi thọ kết cấu cao, tuy nhiên khả năng thích nghi với địa hình phức tạp hạn chế, đặc biệt đối với các mái dốc có hình dạng không đều. Giải pháp này thường được áp dụng với mái dốc có chiều cao không quá lớn.

d) Đinh đất kết hợp khung BTCT và chống xói bề mặt bằng trồng cỏ truyền thống

Trong điều kiện mái dốc có độ dốc trung bình và nguy cơ xói mòn không lớn, lớp bảo vệ bề mặt được thay thế bằng thảm thực vật trồng cỏ truyền thống trong các ô khung BTCT. Phương pháp này sử dụng các giống cỏ có khả năng phát triển nhanh và hệ rễ mạnh như cỏ Vetiver, cỏ lá gừng hoặc cỏ đậu. Lớp thảm cỏ giúp giảm tác động trực tiếp của mưa lên bề mặt đất, giảm tốc độ dòng chảy và tăng cường liên kết lớp đất nông thông qua hệ rễ cây.

Ưu điểm của giải pháp là chi phí thấp, thân thiện với môi trường và cải thiện cảnh quan, tuy nhiên khả năng chống xói kém hơn so với các lớp phủ cứng, đặc biệt trong điều kiện mưa lớn kéo dài. Vì vậy, giải pháp này phù hợp với các mái dốc có độ ổn định tương đối và mức độ xói mòn thấp đến trung bình.

4.6.1.3. Nhóm giải pháp gia cố sâu kết hợp chống xói bề mặt bằng biện pháp sinh thái công nghiệp mới

a) Đinh đất kết hợp khung BTCT, có/ hoặc không có lưới thép và che phủ chống xói bề mặt bằng phun bùn kết hợp hạt cỏ

Giải pháp này sử dụng hệ đinh đất và khung BTCT tương tự các phương án truyền thống, có thể bổ sung lưới thép gia cường bề mặt khi cần thiết. Lớp chống xói được tạo bằng biện pháp phun bùn kết hợp hạt cỏ, bao gồm hỗn hợp đất mịn, chất kết dính, phân bón và hạt giống được phun trực tiếp lên bề mặt mái dốc. Sau khi thi công, lớp phủ tạo môi trường thuận lợi cho hạt cỏ nảy mầm và phát triển thành thảm thực vật phủ kín bề mặt. Thảm cỏ giúp giảm tác động của mưa, giảm tốc độ dòng chảy mặt và tăng liên kết lớp đất nông thông qua hệ rễ (Hình 4.28).

Giải pháp này có ưu điểm thân thiện môi trường, tăng khả năng che phủ bề mặt và cải thiện cảnh quan, tuy nhiên hiệu quả chống xói trong giai đoạn đầu còn hạn chế và phụ thuộc vào điều kiện sinh trưởng của thảm thực vật và thời gian phát triển của lớp cỏ.



Hình 4.28. Giải pháp kết hợp đinh đất với khung BTCT và trồng cỏ cao tốc Bắc Giang – Lạng Sơn km45+100 - km108+500

b) Đinh đất kết hợp khung BTCT, có/ hoặc không có lưới thép và che phủ chống xói bề mặt bằng phun hóa chất kết hợp hạt cỏ (Hydroseeding)

Hydroseeding là kỹ thuật phủ xanh và chống (kiểm soát) xói mòn đất bằng cách phun đều hỗn hợp hạt giống, nước, phân bón, chất giữ ẩm, chất kết dính và lớp phủ trực tiếp lên mặt đất. Chất kết dính hóa học thường là các polyme tổng hợp hoặc polyme sinh học hòa tan trong nước (như polyacrylamide, latex polyme hoặc lignin). Lớp phun tạo thành một màng liên kết tạm thời giúp ổn định lớp đất bề mặt trong giai đoạn đầu sau thi công, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho sự nảy mầm và phát triển của thảm thực vật.

Ưu điểm của giải pháp là thi công nhanh, khả năng che phủ bề mặt tốt và hiệu quả chống xói ban đầu cao, hạt giống nảy mầm nhanh, phát triển mạnh và hiệu quả trên các

khu vực rộng lớn hoặc sườn dốc. Tuy nhiên, hiệu quả lâu dài vẫn phụ thuộc vào sự phát triển của thảm thực vật và điều kiện môi trường tại khu vực mái dốc.

c) Đinh đất kết hợp khung BTCT và lưới thép, lưới chống xói mòn đất kiểu 3D polime tổng hợp độ bền cao

Trong giải pháp này, hệ đinh đất và khung BTCT được kết hợp với lưới thép và lưới chống xói mòn đất dạng 3D bằng polime tổng hợp (HDPE hoặc PP) có cấu trúc không gian ba chiều, cho phép giữ đất và tạo môi trường thuận lợi cho sự phát triển của thảm thực vật. Lưới có chiều dày khoảng (10–20) mm, khối lượng riêng (200–600) g/m² và cường độ kéo từ (1–3) kN/m. Nhờ cấu trúc rỗng và khả năng ổn định tia UV, vật liệu này có tuổi thọ cao.

Lưới 3D giúp giảm vận tốc dòng chảy mặt, hạn chế rửa trôi đất và tăng cường liên kết lớp đất nông thông qua sự phát triển của hệ rễ cây. Đồng thời, hệ rễ cây phát triển trong lớp lưới giúp tăng cường liên kết đất nông. Giải pháp có ưu điểm chống xói tốt, thích nghi với biến dạng của mái dốc và hỗ trợ phát triển thảm thực vật, tuy nhiên chi phí vật liệu tương đối cao và yêu cầu thi công đúng kỹ thuật.

d) Đinh đất kết hợp lưới thép cường độ cao/ hoặc lưới thép kết cấu cường độ cao tích hợp lưới chống xói mòn đất kiểu 3D polime tổng hợp độ bền cao

Giải pháp này thay thế khung BTCT bằng lưới thép cường độ cao hoặc lưới thép kết cấu, liên kết trực tiếp với đầu các thanh đinh đất. Trên lớp lưới thép bố trí lưới chống xói 3D bằng vật liệu polime nhằm giữ đất và tạo môi trường cho thảm thực vật phát triển.

Lưới thép cường độ cao được chế tạo từ thép chịu kéo cao, thường có cường độ kéo từ (1500–1770) MPa và được bảo vệ bằng lớp mạ kẽm hoặc hợp kim chống ăn mòn. Lưới có đường kính dây (3–8) mm với kích thước mắt lưới phổ biến từ (65–80) mm. Nhờ khả năng chịu lực lớn và thích nghi tốt với biến dạng của mái dốc, lưới thép cường độ cao được sử dụng để phân bố lực giữ của các thanh đinh đất và ổn định lớp đất bề mặt, đặc biệt khi kết hợp với các giải pháp chống xói như lưới polyme 3D hoặc thảm thực vật (Hình 4.29).

Ưu điểm của phương án là khả năng thích nghi tốt với biến dạng của mái dốc, chống xói hiệu quả. Tuy nhiên, chi phí vật liệu cao và yêu cầu kiểm soát chặt chẽ trong quá trình thi công để đảm bảo hiệu quả liên kết giữa đinh đất và hệ lưới gia cường.



Hình 4.29. Giải pháp đinh đất kết hợp lưới thép cường độ cao và lưới chống xói mòn 3D polime tổng hợp độ bền cao (nguồn Internet)

4.6.2. Nhóm giải pháp ngăn giữ vật liệu rời liên quan TĐN trên lưu vực khe cạn nhằm giảm động năng dòng chảy tạm

Khe cạn không chỉ chia cắt địa hình, còn là "con đường" hay "cửa" đưa vật liệu đất đá từ nguồn do xói mòn hay TĐN từ đỉnh hay sườn địa hình xuống mặt đường giao thông vùng đồi núi, đặc biệt phổ biến như MNTB. Nhiều sự cố thực tế đã cho thấy sự nguy hiểm của dòng trượt đất đá qua khe cạn, tiêu biểu như đợt mưa lũ năm 2018 tại km74 tuyến QL4D [29]; hay mưa lũ 2024 làm phá hủy nền đường tại km173+600 đến km175, km80+600 trên QL279 [21] và đoạn km269+750 tuyến QL32 [3]. Hiện tượng này, có đặc trưng gần tương tự như phân tích ổn định nền đường liên quan dòng chảy khe cạn trong nghiên cứu điển hình ĐT128.

4.6.2.1. Ngăn giữ vật liệu rời bằng kết cấu tường rọ đá có cửa thoát nước

Tường rọ đá có cửa thoát nước được phát triển trên cơ sở nguyên lý kiểm soát vật liệu rời, đồng thời được điều chỉnh để phù hợp với đặc điểm địa hình, vật liệu và khả năng đầu tư tại các khu vực miền núi. Công trình có kết cấu dạng hở, sử dụng thân đập bằng rọ đá kết hợp các khe thoát đứng, cho phép phân tách dòng chảy theo kích thước hạt (Hình 4.30). Rọ đá dùng thép mạ nhôm kẽm bọc nhựa PVC và xoắn 3, liên kết rọ thành khối bằng bọc giữ bởi lưới thép cùng loại chống cuốn trôi. Các tầng rọ đá bố trí không liên tục, cứ 2 mét bố trí khoảng hở 50 cm để nước chảy và ngăn giữ hạt thô. Giải pháp này có ưu điểm là kết cấu đơn giản, chi phí xây dựng thấp, tận dụng vật liệu tại chỗ. Nhờ đó, công trình đặc biệt phù hợp với điều kiện đầu tư còn hạn chế tại các tỉnh miền núi, đồng thời vẫn đảm bảo khả năng kiểm soát vật liệu rời phát sinh từ các khối TĐN trên sườn dốc.



Hình 4.30. Ngăn giữ vật liệu bằng tường rọ đá có cửa thoát nước khe cạn ĐT128

Kết quả sử dụng kết cấu này tại các phân đoạn 2 và phân đoạn 3 phạm vi nghiên cứu điển hình được triển khai từ 10/2024, bước đầu đã chứng minh được hiệu quả rõ rệt trong giảm thiểu tác động dòng chảy lòng khe tới phá hủy nền đường ở đây. Từ đó biện pháp này đã được triển khai áp dụng đại trà trên địa bàn Lai Châu theo chỉ đạo của lãnh đạo tỉnh, nhằm tăng cường ổn định nền đường, giảm tác động dòng chảy tạm phá hủy nền mặt đường giao thông có các khe cạn và hiện tượng trượt đất đá tạo nguồn vật liệu rời tương tự ĐT128.

4.6.2.2. Ngăn giữ vật liệu rời bằng kết cấu hàng rào lưới thép cường độ cao

Lưới thép cường độ cao được cấu tạo từ thép độ bền kéo đứt tối thiểu 1770 MPa, có lớp bảo vệ chống ăn mòn đặc biệt với mắt lưới dạng kim cương hoặc dạng vòng lưới, kết hợp vòng hãm, vòng kết nối di động trên cáp trợ giúp phần đỉnh lưới, néo cáp hình xoắn ốc, cột thép có thể di động (Hình 4.31). Lưới thép được neo xuống dưới nền, cáp được neo vào hai bên thành khe cạn.



Hình 4.31. Ngăn giữ vật liệu bằng lưới thép cường độ cao

Lưới thép cường độ cao được thiết kế để làm chậm và ngăn các vật liệu có kích thước lớn nhờ sự biến dạng lớn của hệ thống lưới thép cường độ cao và các bộ phận cấu thành dưới tác động vật liệu rời. Lưới thép cường độ cao có cấu trúc linh hoạt, có thể thiết kế tự do theo các loại hình phù hợp với đặc điểm hoạt động của vật liệu ngăn giữ, thực tế bố trí và mục

đích bảo vệ. Tại vị trí khe cạn ĐT128, lưới thép cường độ cao được áp dụng tại vị trí sau đập tường rọ đá, để ngăn giữ vật liệu có kích thước nhỏ hơn đi qua.

4.7. Tóm tắt chương 4

Kết quả mô phỏng kết hợp giữa SEEP/W và SLOPE/W cho thấy cơ chế phát sinh TĐN tại khu vực nghiên cứu do quá trình mưa tích lũy kéo dài làm giảm lực hút dính, gia tăng độ bão hòa và áp lực nước lỗ rỗng trong lớp phủ phong hóa. Quá trình này làm giảm ứng suất hữu hiệu, kéo theo giảm sức kháng cắt của đất, dẫn đến giảm hệ số ổn định mái dốc và kích hoạt TĐN dọc tuyến ĐT128.

Nghiên cứu làm rõ mối liên hệ giữa hiện tượng TĐN với các dạng hư hỏng nền mặt đường, hệ thống thoát nước tuyến ĐT128 đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ. TĐN từ ta luy dương trực tiếp gây lún võng cục bộ, bong bật lớp mặt, nứt mép mặt đường, bồi lấp và phá hủy rãnh hay cống thoát nước, đặc biệt xói và sụt trượt ta luy âm; trong đó, bong bật lớp mặt đường chiếm tỷ lệ cao nhất (65,2%), tràn lấp đất đá lên mặt đường hay rãnh dọc xảy ra ở 100% điểm trượt, và 50,7% điểm trượt gây hư hỏng kết cấu rãnh, cống thoát nước.

Bên cạnh tác động trực tiếp, TĐN trên lưu vực khe cạn dọc tuyến còn là nguồn vật liệu rời làm gia tăng cường độ và động năng dòng chảy khi mưa lớn, gây hư hỏng thậm chí phá hủy nền đường hay kết cấu công trình giao thông trên dòng chảy của chúng. Kết quả mô phỏng RAMMS cho thấy dòng chảy vật liệu rời hình thành từ các điểm TĐN trên sườn dốc nhanh chóng tập trung vào các khe tụ thủy, lan truyền xuống hạ lưu và cắt qua tuyến ĐT128 với vận tốc và áp lực động đáng kể; qua đó giải thích được cơ chế phá hoại nền đường do tác động kết hợp giữa tải trọng của khối đất đá trượt, sự suy giảm khả năng tiêu thoát nước do hệ thống rãnh bị tắc nghẽn, và áp lực động từ dòng chảy có chứa vật liệu rời từ nguồn TĐN sau mưa lớn. Tại vị trí cầu km10+300, áp lực vượt ngưỡng 100 kPa – ngưỡng phá hủy kết cấu nền đường, phù hợp với hiện trạng phá hủy nền đường trong quá khứ và mái dốc cũng như phần nền móng công trình cầu hiện hữu.

Kết quả phân tích kết hợp giữa thấm - ổn định mái dốc (SEEP/W - SLOPE/W) và phân tích lan truyền dòng chảy vật liệu rời (RAMMS) là cơ sở để nhận diện các vị trí có nguy cơ mất ổn định cao, đồng thời làm căn cứ đề xuất các giải pháp công trình phù hợp với đặc điểm địa hình, địa chất và cơ chế phá hoại đặc trưng của tuyến ĐT128. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất tổ hợp 8 giải pháp công trình nhằm giảm thiểu nguy cơ TĐN và hạn chế ảnh hưởng đến ổn định nền đường, đồng thời đề xuất 2 biện pháp công trình theo nguyên lý ngăn giữ vật liệu rời sinh ra từ TĐN nhằm giảm động năng dòng chảy trên các khe cạn, qua đó bảo vệ nền đường và các công trình giao thông trên tuyến ĐT128.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận chính

Qua thống kê 643 điểm trượt trên các tuyến QL và ĐT (397 km) thuộc khu vực MNTB, xác định TĐN là loại hình mất ổn định mái dốc ta luy nền đường đào chủ yếu, chiếm tỷ lệ 88,02%. Tuyến ĐT128 (Lai Châu) có có mật độ và tỷ lệ TĐN cao nhất (3,27 điểm/km; 96,6%), đại diện cho đặc trưng địa hình, địa chất, kiến tạo và thảm thực vật MNTB, được lựa chọn nghiên cứu điển hình.

Trên cơ sở 294 điểm trượt và 13 yếu tố ảnh hưởng dọc tuyến DDT128, 4 mô hình học sâu (CNN, RNN, DNN, LSTM) đã dự báo thành công nguy cơ trượt đất đá, trong đó CNN cho hiệu suất cao nhất (AUC 0,92/0,88; độ chính xác 80%) và được sử dụng lập bản đồ phân vùng nguy cơ. Kết quả xác định 18% chiều dài tuyến đường thuộc mức nhạy cảm cao và rất cao, trong đó đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ dài 20 km được lựa chọn nghiên cứu chi tiết.

Khảo sát đoạn tuyến điển hình ghi nhận 69/74 điểm TĐN (93,25%), tập trung chủ yếu tại hệ tầng Bó Hiềng (49,3%), thể tích khối trượt có quy mô trung bình (50,7%), chiều cao khối trượt phổ biến trên 10m (66,7%), xảy ra trên sườn dốc $(30–40)^0$, hình thái trượt đặc trưng là hơi lõm - dạng gần phẳng (76,81%). Đất tầng phủ là sét phong hóa giàu mica (43–65)%, hàm lượng hạt mịn ưu thế (54,4–82,2)% và tính dẻo cao (IP=(11–28)%).

Kết quả mô phỏng kết hợp SEEP/W và SLOPE/W cho thấy cơ chế TĐN chủ yếu phát sinh do mưa kéo dài làm giảm lực hút dính, gia tăng độ bão hòa và áp lực nước lỗ rỗng trong lớp phủ phong hóa, kéo theo giảm sức kháng cắt và hệ số ổn định mái dốc.

TĐN từ taluy dương vừa gây hư hỏng trực tiếp nền mặt đường (bong bật lớp mặt 65,2%; hư hỏng rãnh, cống 50,7%; tràn lấp đất đá 100% điểm trượt), vừa là nguồn vật liệu rời làm gia tăng động năng dòng chảy trên các khe tụ thủy; kết quả mô phỏng RAMMS cho thấy áp lực dòng chảy tại một số vị trí vượt ngưỡng phá hủy kết cấu nền đường (≥100 kPa), phù hợp với hiện trạng thực tế.

Trên cơ sở đó, luận án đề xuất 8 giải pháp công trình phòng chống TĐN và 2 biện pháp ngăn giữ vật liệu rời, có đủ cơ sở khoa học để mở rộng áp dụng cho các tuyến đường có điều kiện tương tự ĐT128 trên địa bàn MNTB.

2. Những đóng góp mới của luận án

Trên cơ sở bộ dữ liệu trượt đất đá được khảo sát, thống kê trên một số tuyến giao thông quan trọng MNTB, xác định được tỷ lệ trượt của TĐN chiếm từ 83,35% đến 92,73%.

Làm sáng tỏ nguyên nhân, đặc điểm TĐN trong mối quan hệ với yếu tố địa chất và

địa kỹ thuật.

Phân tích những tác động trực tiếp và gián tiếp của TĐN tới hư hỏng mặt và ổn định nền đường, nhất là ĐT128 đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ.

3. Hạn chế của luận án

Luận án nghiên cứu chi tiết trên tuyến ĐT128 (Lai Châu), nên các kết luận mang tính điển hình cho khu vực này. So với các nghiên cứu TĐN do mưa tại vùng núi khí hậu nhiệt đới gió mùa tương đồng (Durmaz và nnk, 2023 – Rize, Thổ Nhĩ Kỳ), cơ chế hai giai đoạn mưa tiền định – mưa kích hoạt tại Chăn Nưa – Sìn Hồ có nét tương đồng, song vật liệu tầng phủ giàu hạt mịn (54,4–82,2%) và không đồng nhất theo tuyến là điểm khác biệt, cho thấy cơ chế TĐN vùng MNTB còn chịu chi phối bởi đặc thù vật liệu phong hóa tại chỗ. Do sự phân hóa địa chất – khí hậu phức tạp trên toàn vùng MNTB, kết quả cần được hiệu chỉnh, kiểm chứng thêm khi áp dụng cho khu vực khác; việc so sánh định lượng với các vùng tương đồng khác được đề xuất là hướng nghiên cứu tiếp theo.

Về dữ liệu đầu vào, mô hình phân vùng nguy cơ bằng AI sử dụng độ phân giải DEM 12,5m và bản đồ địa chất tỷ lệ 1:200.000 chưa phản ánh đầy đủ điều kiện địa hình, địa chất chi tiết dọc hành lang tuyến hẹp; đồng thời cỡ mẫu 294 điểm trên phạm vi 90km còn hạn chế, tiềm ẩn nguy cơ quá khớp cục bộ khi áp dụng cho phạm vi rộng hơn.

Mô hình SEEP/W - SLOPE/W đơn giản hóa địa hình mái dốc theo 2D và sử dụng điều kiện biên mưa theo ngày (chưa có số liệu mưa theo giờ), chưa xét đầy đủ biến động cường độ mưa trong ngày. Thông số sức kháng cắt (c, φ) sử dụng trong tính toán được xác định từ thí nghiệm cắt phẳng nhanh không cố kết (TCVN 4199:1995), phản ánh ứng suất tổng, chưa phải thông số hiệu dụng (c′, φ′) theo đúng lý thuyết Bishop cho đất không bão hòa; việc sử dụng thay thế này dựa trên khuyến nghị chung cho phân tích ổn định mái dốc (TCVN 9363:2012), cần được kiểm chứng bằng thí nghiệm cắt chậm cố kết hoặc ba trục CD trong các nghiên cứu tiếp theo. Do thiếu số liệu quan trắc mực nước ngầm thực tế, vị trí mực nước ngầm ban đầu giả thiết dựa trên đặc điểm địa hình và tính thấm của đất, cần khắc phục bằng việc lắp đặt piezometer tại các mặt cắt đại diện trong nghiên cứu tiếp theo.

Mô hình RAMMS, dù đã được hiệu chỉnh và phân tích độ nhạy cặp thông số μ, ξ cho kết quả tương đối ổn định trong lân cận bộ thông số đã chọn, vẫn dựa trên số lượng vị trí kiểm tra thực địa còn hạn chế (2 vị trí) và giả thiết vật liệu đồng nhất trong toàn khối trượt, chưa xét đến sự phân lớp vật liệu đã ghi nhận ở Chương 3.

Các giải pháp phòng chống TĐN và kiểm soát vật liệu rời trên khe cạn được đề xuất dựa trên kết quả khảo sát thực địa, phân tích địa chất công trình và mô phỏng số, mới dừng lại ở mức đề xuất nguyên lý và xác định cơ sở tải trọng thiết kế, không đi sâu vào thiết kế kỹ thuật chi tiết hay tính toán kiểm toán kết cấu công trình. Hiệu quả của các giải pháp cần được kiểm chứng thêm thông qua thiết kế kỹ thuật chi tiết, thí nghiệm mô hình hoặc theo dõi thực tế sau khi áp dụng.

4. Kiến nghị

Kiến nghị các cơ quan quản lý giao thông tích hợp bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất vào quá trình quy hoạch tuyến và thiết kế đường mới.

Cần xem xét đầy đủ các yếu tố địa chất công trình, đặc điểm tầng phủ phong hóa và các khu vực khe tụ thủy trong quá trình khảo sát, thiết kế và lựa chọn hướng tuyến nhằm giảm thiểu nguy cơ TĐN ảnh hưởng đến nền đường.

Các khu vực có nguy cơ TĐN cao dọc tuyến ĐT128, cần tăng cường kiểm tra, duy tu hệ thống thoát nước, gia cố mái dốc và kiểm soát vật liệu rời tại các khe cạn, đặc biệt trong mùa mưa.

Trên cơ sở diễn biến mưa tiền định kết hợp mưa kích hoạt đã xác định tại khu vực nghiên cứu, kiến nghị cơ quan quản lý xây dựng và áp dụng hệ thống theo dõi, cảnh báo sớm dựa trên lượng mưa tích lũy nhiều ngày tại các khu vực có nguy cơ TĐN cao, làm cơ sở chủ động ứng phó trước khi xảy ra mưa lớn kích hoạt.

Kiến nghị đầu tư nâng cấp cơ sở dữ liệu nền phục vụ công tác quản lý, quy hoạch tuyến đường miền núi, đặc biệt là mô hình số độ cao độ phân giải cao (LiDAR, UAV) và bản đồ địa chất công trình chi tiết, nhằm nâng cao độ tin cậy của các công cụ phân vùng nguy cơ trượt đất áp dụng trong thực tiễn.

5. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Tiếp tục mở rộng phạm vi khảo sát, đánh giá TĐN trên nhiều tuyến GTMN có điều kiện địa chất, địa hình tương tự nhằm kiểm chứng và hoàn thiện kết quả nghiên cứu.

Bổ sung thu thập dữ liệu mưa với độ phân giải thời gian cao hơn (theo giờ) và mở rộng mô phỏng số với nhiều kịch bản cường độ, thời gian mưa khác nhau trên nền mô hình SEEP/W đã xây dựng, nhằm xác lập đường cong ngưỡng cường độ - thời gian mưa đặc trưng cho khu vực nghiên cứu, làm cơ sở khoa học trực tiếp phục vụ công tác cảnh báo sớm rủi ro TĐN.

Bổ sung mô hình số độ cao độ phân giải cao (LiDAR hoặc ảnh bay chụp UAV) và khảo sát, đo vẽ bản đồ địa chất công trình chi tiết ở tỷ lệ lớn hơn dọc hành lang tuyến nghiên cứu, nhằm nâng cao độ tin cậy của bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá bằng AI.

Bổ sung thí nghiệm cắt chậm cố kết hoặc thí nghiệm ba trục CD nhằm xác định trực tiếp thông số sức kháng cắt hiệu dụng (c′, φ′) của đất tầng phủ, thay cho giá trị xấp xỉ từ thí nghiệm cắt nhanh không cố kết hiện nay; đồng thời lắp đặt piezometer hoặc thiết bị quan trắc mực nước ngầm tại các mặt cắt đại diện, làm cơ sở kiểm chứng và nâng cao độ chính xác của mô hình thấm – ổn định mái dốc SEEP/W – SLOPE/W.

Nghiên cứu thử nghiệm hiệu quả thực tế các giải pháp kỹ thuật đã đề xuất, cũng như xem xét tích hợp hệ thống giám sát và cảnh báo sớm TĐN nhằm nâng cao hiệu quả phòng chống và giảm thiểu rủi ro đối với nền đường GTMN.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

1. **Nguyễn Việt Tiệp***, Nguyễn Đức Mạnh, Mai Sỹ Hùng, *Một vài đặc điểm trượt nông mái dốc nền đường đào trên đường ô tô vùng núi Bắc Bộ*, Kỷ yếu hội nghị khoa học toàn quốc VIETGEO 2023, 574-582, 2023
2. **Tiep Nguyen Viet**, Dam Duc Nguyen, Manh Nguyen Duc** , Cong Cao Trong, Mai Sy Hung, Hiep Van Le, Indra Prakash, Binh Thai Pham*, *Exploring deep learning models for roadside landslide prediction: Insights and implications from comparative analysis*, Physics and Chemistry of the Earth, 2024, https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103741
3. Duc-Dam Nguyen, **Nguyen Viet Tiep***, Quynh-Anh Thi Bui, Hiep Van Le, Indra Prakash, Romulus Costache, Manish Pandey, Binh Thai Pham, *Landslide Susceptibility Mapping Using RBFN-Based Ensemble Machine Learning Models*, Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2024, DOI: 10.32604/cmes.2024.056576
4. Dam Duc Nguyen, Manh Duc Nguyen*, **Tiep Viet Nguyen**, Cong Trong Cao, Tran Van Phong, Dao Minh Duc, Tran Xuan Bien, Indra Prakash, Hiep Van Le & Binh Thai Pham*, *Enhanced Landslide Spatial Prediction Using Hybrid Deep Learning Model and SHAP Analysis: A Case Study of the Tuyen Quang-Ha Giang Expressway, Vietnam,* Indian Society of Remote Sensing, 2024, https://doi.org/10.1007/s12524-024-02055-1
5. **Nguyễn Việt Tiệp***, Nguyễn Đức Mạnh, Mai Sỹ Hùng, *Ảnh hưởng trượt nông tới ổn định nền đường giao thông ở vùng núi - nghiên cứu điển hình tuyến ĐT128 đoạn từ Chăn Nưa đi Sìn Hồ, tỉnh Lai Châu*, Kỷ yếu hội nghị khoa học toàn quốc VIETGEO 2025, 145-153, 2025

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Phần Tiếng Việt

1. Lê Đức An (2008), "Một số vấn đề về nghiên cứu trượt lở và dự báo chúng" *Tuyển tập báo cáo khoa học Hội nghị khoa học Địa lí toàn quốc lần thứ 3.*
2. Huỳnh Thanh Bình (2023), *Nghiên cứu đặc điểm trượt đất đá trên đường Hồ Chí Minh đoạn Đakrông – Thạch Mỹ và luận chứng giải pháp xử lý thích hợp*, Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Giao thông Vận tải, Hà Nội.
3. Báo Dân trí (2025), *Thông xe điểm sạt lở lớn nhất trên đèo Khau Phạ***,** https://dantri.com.vn
4. Nguyễn Đức Đảm (2025), *Nghiên cứu đánh giá nguy cơ sụt trượt đất đá dọc tuyến đường ô tô xây dựng mới qua vùng đồi núi bằng mô hình trí tuệ nhân tạo và đề xuất giải pháp giảm thiểu,* Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Công nghệ Giao thông Vận tải, Hà Nội.
5. Đỗ Minh Đức (2020), *Nghiên cứu dự báo nguy cơ tai biến trượt lở mái dốc dọc các tuyến giao thông trọng điểm miền núi tỉnh Quảng Nam và đề xuất giải pháp ứng phó,* Đề tài độc lập cấp Nhà nước mã số ĐTĐL.CN-23/17, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Hà Nội.
6. Đỗ Minh Đức (2022), *Nghiên cứu trượt lở đất đá dọc các tuyến giao thông miền núi tỉnh Quảng Nam,* Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
7. Đào Minh Đức (2023), *Nghiên cứu đặc điểm hình thành và phát triển một số khối trượt lớn ở khu vực miền núi phía Bắc (lấy ví dụ tại huyện Xín Mần, tỉnh Hà Giang),* Luận án Tiến sĩ Địa chất, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội.
8. Lê Thị Thu Hiền, Phạm Hà Linh, Phạm Quang Vinh, Lưu Thế Anh, Vũ Thị Kim Dung, Nguyễn Thanh Bình, Nguyễn Ngọc Thắng (2010), "Nghiên cứu thử nghiệm mô hình lý thuyết dự báo các vùng có nguy cơ trượt lở đất trong điều kiện Việt Nam", *Tuyển tập báo cáo khoa học Hội nghị khoa học Địa lí toàn quốc lần thứ 5.*
9. Trần Trọng Huệ (2004), *Nghiên cứu đánh giá tổng hợp các loại hình tai biến địa chất trên lãnh thổ Việt Nam và các giải pháp phòng tránh (giai đoạn II - Các tỉnh miền núi phía Bắc),* Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Địa chất.

10. Lê Quốc Hùng (2014), *Điều tra và thành lập bản đồ hiện trạng trượt lở đất đá tỷ lệ 1:50.000 khu vực miền núi tỉnh Lai Châu*, Báo cáo khoa học, Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, Hà Nội.

11. Phạm Văn Hùng (2010), *Đánh giá hiện trạng, khoanh vùng cảnh báo chi tiết nguy cơ trượt lở đất làm cơ sở khoa học cho quy hoạch phát triển bền vững kinh tế – xã hội tỉnh Quảng Nam,* Viện Địa chất, Hà Nội.

12. Báo Lai Châu (2019), *Nỗ lực khắc phục sự cố sạt lở gây tắc đường*, https://baolaichau.vn/xa-hoi/.

13. Báo Lai Châu (2020), *Hàng nghìn m³ đất đá sạt lở sau mưa lớn, nhiều tuyến đường ở Lai Châu tê liệt*, https://laichau.gov.vn/

14. Báo Lai Châu (2021), *Lai Châu: Tuyến đường tỉnh 128 bị sạt lở do mưa lớn*, https://baolaichau.vn.

15. Báo Lai Châu (2021), *Tỉnh lộ 128 tiếp tục bị sạt lở ta luy gây tắc đường*, https://baolaichau.vn/xa-hoi/.

16. Nguyễn Đức Lý, Nguyễn Thanh (2010), "Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình trượt lở đất đá trên sườn dốc đường giao thông miền núi tỉnh Quảng Bình", *Tạp chí Khoa học Đại học Huế* (59).

17. Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Hải Hà (2018), "Giải pháp giảm thiểu sụt trượt trên các tuyến đường giao thông xây dựng mới và nâng cấp mở rộng ở vùng núi," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam* (6), 47–50.

18. Nguyễn Đức Mạnh, Nguyễn Hải Hà (2021), "Sụt trượt trên các tuyến giao thông vùng núi khu vực miền Trung và giải pháp giảm thiểu", *Tuyển tập Hội nghị khoa học toàn quốc Cơ học Đá – Những vấn đề đương đại (VIETROCK 2021).*

19. Vũ Cao Minh (1996), *Nghiên cứu dự báo trượt lở, lũ quét - lũ bùn đá và các giải pháp phòng chống (giai đoạn II)*, Đề tài khoa học công nghệ, Viện Địa chất.

20. Vũ Cao Minh (2000), *Nghiên cứu thiên tai trượt lở ở Việt Nam*, Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Địa chất.

21. Tạp chí Môi trường và cuộc sống (2024), *Lai Châu: Mưa lớn, sạt lở khiến giao thông đứt đoạn trên Quốc lộ 279*, https://moitruong.net.vn.

22. Chu Văn Ngợi, Nguyễn Thị Thu Hà (2008), "Đánh giá nguy cơ tai biến trượt lở dọc tuyến đường 4D trên cơ sở nghiên cứu mối quan hệ giữa cấu trúc địa chất và địa hình", *Tạp chí Địa chất*, số 305, 1-8.

23. Lê Thị Nghinh (2004), *Nghiên cứu đánh giá trượt lở các tỉnh miền núi phía Bắc*, Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Địa chất, Hà Nội.

24. Lương Nguyễn Hoàng Phương, Tống Anh Tuấn, Trần Đình Nghiên (2023), "Nghiên cứu ảnh hưởng của mưa lớn kéo dài có xét đến biến đổi khí hậu đến sự ổn định của mái taluy nền đường đắp tại khu vực duyên hải miền Trung: mô phỏng số kết hợp các mô hình SEEP/W và SLOPE/W", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ* (5), 15–19.

25. Mai Thành Tân (2015), *Nghiên cứu đánh giá nguy cơ trượt lở đất khu vực xã Đồng Bảng, huyện Mai Châu, tỉnh Hòa Bình và đề xuất các giải pháp phòng tránh*, Báo cáo tổng kết nhiệm vụ phát sinh địa phương, Viện Địa chất.

26. Báo Tuổi trẻ (2023), *Mưa lớn chia cắt tuyến gần nhất từ Lai Châu đi Sìn Hồ, nhiều đường lớn sụt lún*, https://tuoitre.vn.

27. UBND tỉnh Lai Châu (2024). *Quyết định số 281/QĐ-UBND về công bố tải trọng cầu và khổ giới hạn tuyến địa phương*. https://laichau.gov.vn.

28. Trần Tân Văn (2006), *Nghiên cứu, đánh giá điều kiện địa chất, kiến tạo và các yếu tố liên quan đến tai biến địa chất, môi trường dọc một số đoạn trên tuyến đường Hồ Chí Minh*, Báo cáo tổng kết dự án, Lưu trữ Địa chất, Hà Nội.

29. Báo VOV (2018), *Ảnh: Sạt lở khủng khiếp ở Lai Châu, người dân dầm mưa chờ được về nhà*, https://vov.vn/.

30. Báo VOV (2022), *Mưa lũ gây sạt lở tại gần 450 vị trí trên các tuyến đường ở Lai Châu*, https://vov.vn/.

31. Báo VOV (2023), Mưa lũ ở Lai Châu ghi nhận thêm 2 người mất tích, thiệt hại tăng cao, https://vov.vn/.

32. Nguyễn Trọng Yêm (2006), *Nghiên cứu đánh giá trượt lở, lũ quét và lũ bùn đá một số vùng nguy hiểm miền núi Bắc Bộ, kiến nghị các giải pháp phòng tránh, giảm nhẹ thiên tai*, Viện Địa chất, Hà Nội.

Phần Tiếng Anh

33. Ahmadi-Adli M., Huvaj N., Toker N.K. (2017), “Rainfall-triggered landslides in an unsaturated soil: a laboratory flume study”, *Environmental Earth Sciences* 76, 735. DOI: 10.1007/s12665-017-7049-z.

34. Alonso E.E., Gens A., Josa A. (1990), “A constitutive model for partially saturated soils”, *Géotechnique* 40(3), pp. 405–430.

35. Alqadhi S., Mallick J., Hang H.T., Asmari A.F., Kumari R.S. (2024), “Evaluating the influence of road construction on landslide susceptibility in Saudi Arabia’s mountainous terrain: a Bayesian-optimised deep learning approach with attention mechanism and sensitivity analysis”, *Environmental Science and Pollution Research* 31, 3169–3194.

36. Alvioli M., Baum R.L. (2016), “Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface”, *Environmental Modelling & Software 81*, 122–135.

37. Arya L.M., Paris J.F. (1981), "A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data", *Soil Science Society of America Journal* 45(6), pp. 1023–1030.

38. Ariyakumara W.A.K.S., Uchida T. (2026), “Roles of different controls influencing the intensity–duration rainfall thresholds for triggering landslides: an intercomparison of published thresholds”, *Landslides* 23, pp. 1321–1344.

39. Ashournejad Q., Hosseini A., Pradhan B., Hosseini S.J. (2019), “Hazard zoning for spatial planning using GIS-based landslide susceptibility assessment: A new hybrid integrated data-driven and knowledge-based model”, Arabian Journal of Geosciences 12(4), 126.

40. Asada Minagawa (2023), “Impact of vegetation differences on shallow landslides: A case study in Aso, Japan”, *Water*.

41. Ayalew L., Yamagishi H. (2005), “The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda–Yahiko Mountains, Central Japan”, *Geomorphology* 65(1–2), 15–31.

42. Baggio T., Martini M., Bettella F.D., Agostino V. (2024), “Debris flow and debris flood hazard assessment in mountain catchments”, *Catena*.

43. Bai H., Feng W., Yi X., Fang H., Wu Y., Deng P., Dai H., Hu R. (2021), "Group-occurring landslides and debris flows caused by the continuous heavy rainfall in June 2019 in Mibei village, Longchuan county, Guangdong province, China", *Natural Hazards* 108, 3181–3201.

44. Bartelt P., Buser O., Vera Valero C., Bühler Y. (2016), "Configurational energy and the formation of mixed flowing/powder snow and ice avalanches", *Annals of Glaciology* 57(71), 179–188.

45. Bhadiyadra Ong (2024), "Mechanics of rainfall-induced landslides after a prolonged dry period based on laboratory tests and numerical models incorporating soil-water characteristic curves", *MDPI*.

46. Bishop A.W. (1955), "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", *Geotechnique* 5(1), 7–17.

47. Bishop A.W., Morgenstern N. (1960), "Stability coefficients for earth slopes", *Geotechnique* 10(4), 129–153.

48. Bonham-Carter G.F. (1994), *Geographic information systems for geoscientists: Modelling with GIS*, Pergamon.

49. Brand E.W. (1981), "Some thoughts on rain-induced slope failures", trong *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Vol. 3, pp. 373–376.

50. Bui D.T., Ho T.C., Revhaug I., Pradhan B, Nguyen D.B (2013), *Landslide Susceptibility Mapping Along the National Road 32 of Vietnam Using GIS-Based J48 Decision Tree Classifier and Its Ensembles*, pp 303–317

51. Bui D.T., Hoang N.D., Nguyen H., Tran X.L. (2019), "Spatial prediction of shallow landslide using bat algorithm optimized machine learning approach: A case study in Lang Son Province, Vietnam", *Advanced Engineering Informatics* 42, 100978.

52. Bui Q.D., Ha H., Khuc D.T., Nguyen D.Q., Nguyen L.P., Chinh L. (2023), "Landslide susceptibility prediction mapping with advanced ensemble models: Son La Province, Vietnam", *Natural Hazards*.

53. Burns W.J., Madin I.P. (2009), *Protocol for inventory mapping of landslide deposits from Light Detection and Ranging (LIDAR) imagery*, Oregon Department of Geology and Mineral Industries, Special Paper 42, Oregon.

54. Caine N. (1980), “The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flow”, *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 62(1–2), 23–27.

55. Cao X., Bi H., Watt D., Li Y. (2023), “Characterizing prediction errors of a new tree height model for cut-to-length Pinus radiata stems through the Burr Type XII distribution”, *Journal of Forestry Research* 34, 1899–1914.

56. Cellek S. (2021), “The effect of aspect on landslide and its relationship with other parameters”, trong *Landslides*, Intech Open.

57. Cemiloglu A., Zhu L., Mohammednour A.B., Azarafza M. (2023), “Landslide susceptibility assessment for Maragheh County, Iran, using the logistic regression algorithm”, *Land* 12, 1397.

58. Chen C., Fan L. (2023a), “An attribution deep learning interpretation model for landslide susceptibility mapping in the Three Gorges Reservoir area”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.

59. Chen C., Fan L. (2023b), “Selection of contributing factors for predicting landslide susceptibility using machine learning and deep learning models”, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1–26.

60. Christen M., Kowalski J., Bartelt P. (2010), “RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain”, *Cold Regions Science and Technology* 63(1–2), 1–14.

61. Coussot P., Meunier M. (1996), “Recognition, classification and mechanical description of debris flows”, *Earth-Science Reviews* 40(3–4), 209–227.

62. Crosta G., Frattini P. (2003), “Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall”, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3, pp. 81–93.

63. Crozier M.J., Glade T. (1986), *Landslide: causes, consequences and environment*, Croom Helm Ltd, Beckenham.

64. Crozier M.J., Glade T. (2005), “Landslide hazard and risk: Issues, concepts, and approach”, trong *Landslide hazard and risk*, Wiley, Chichester, 1–40.

65. Cruden D.M. (1991), “A simple definition of a landslide”, *Bulletin of the* International *Association of Engineering Geology* 43, 27–29.

66. Cruden D.M., Varnes D.J. (1996), “Landslide types and processes”, *Landslides: Investigation and mitigation*, Special Report 247, Transportation Research Board, Washington D.C., 36–75.

67. Dahal R.K., Hasegawa S., Nonomura A., Yamanaka M., Masuda T., Nishino K. (2009), "Failure characteristics of rainfall-induced shallow landslides in granitic terrains of Shikoku Island of Japan", *Engineering Geology* 56(7), 1295–1310.

68. Dahal A., Tanyas H., Westen C.V., Meijde M., Mai P.M., Huser R., Lombardo L. (2024), "Space-time landslide hazard modeling via ensemble neural networks", *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 1-25.

69. Dai F.C., Lee C.F., Wang S.J. (2003), "Characterization of rainfall-induced landslides", *Remote Sensing 24(23*), 4817–4834.

70. Dang V.H., Hoang N.D., Nguyen L.M.D., Bui D.T., Samui P. (2020), "A novel GIS-based random forest machine algorithm for the spatial prediction of shallow landslide susceptibility", *Forests* 11(1), 118.

71. Dao D.V., Pradhan B., Nhu V.H., Bui D.T. (2020), "A spatially explicit deep learning neural network model for the prediction of landslide susceptibility", *Catena* 188, 104451.

72. Deng L.C., Zhang W., Deng L., Shi Y.H., Zi J.J., He X., Zhu H.H. (2024), "Forecasting and early warning of shield tunnelling-induced ground collapse in rock–soil interface mixed ground using multivariate data fusion and Catastrophe Theory", *Engineering Geology* 335, 107548.

73. Di D., Li T., Fang H., Xiao L., Du X., Sun B., Zhang J., Wang N. (2024), "A CFD-DEM investigation into hydraulic transport and retardation response characteristics of drainage pipeline siltation using intelligent model", *Tunnelling and Underground Space Technology* 152, 105964.

74. Du W., Wang G. (2014), "Fully probabilistic seismic displacement analysis of spatially distributed slopes using spatially correlated vector intensity measures", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 43, 661–679.

75. Durmaz M., Hürlimann M., Huvaj N., Medina V. (2023), "Comparison of different hydrological and stability assumptions for physically-based modeling of shallow landslides", *Engineering Geology* 323, 107237.

76. Eichenberger J., Ferrari A., Laloui L. (2013), "Early warning thresholds for partially saturated slopes in volcanic ashes", *Computers and Geotechnics* 49, pp. 79–89.

77. Fell R. (1994), "Landslide risk assessment and acceptable risk", *Canadian Geotechnical Journal* 31(2), 261–272.

78. Fredlund D.G., Rahardjo H., (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons, New York.

79. Fredlund D.G., Xing A., (1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal* 31(4), 521–532.

80. Gabet E.J., Mudd S.M. (2006), "The mobilization of debris flows from shallow landslides", *Geomorphology* 74(1–4), 207–218.

81. GEOSLOPE International Ltd. (2014), *Stability modeling with SLOPE/W 2014: An engineering methodology*, GEOSLOPE International Ltd., Calgary.

82. Ghauch Z., Ozer H., Al-Qadi I.L. (2015), "Micromechanical finite element modeling of moisture damage in bituminous composite materials", *Construction and Building Materials* 80, 95–108.

83. Gorgij A.D., Askari G., Taghipour A., Jami M., Mirfardi M. (2023), "Spatiotemporal forecasting of the groundwater quality for irrigation purposes, using deep learning method: long short-term memory (LSTM)", *Agricultural Water Management* 277, 108088.

84. Graves A. (2012), "Long short-term memory", *Supervised sequence labelling with recurrent neural networks*, 37–45.

85. Gu X. Li Y., Zuo X., Bu J., Yang F., Yang X., Li Y., Zhang J., Huang C., Shi C. (2024), "Image compression–based DS-InSAR method for landslide identification and monitoring of alpine canyon region: A case study of Ahai Reservoir area in Jinsha River Basin", *Landslides*, 1–17.

86. Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C.P. (2007), "Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe", *Meteorology and Atmospheric Physics* 98(3–4), pp. 239–267.

87. Guzzetti F., Peruccacci S., Rossi M., Stark C.P. (2008), "The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: an update", *Landslides* 5, pp. 3–17.

88. Hakro M.R., Harahap I.S.H. (2015), "Laboratory experiments on rainfall-induced flowslide from pore pressure and moisture content measurements", *Landslides* 12(1), 165–177.

89. Hang T.H., Hoa D.P, Tru N.V., Phuong V.N. (2021), “Landslide susceptibility mapping along National Highway-6, Hoa Binh Province, Vietnam using frequency ratio model and GIS”, *International Journal of GEOMATE.*

90. Hang T.H., Tung H., Hoa D.P, Tru N.V., Phuong V.N, Phong V.T. (2022), “Spatial prediction of landslides along National Highway-6, Hoa Binh Province, Vietnam using novel hybrid models,” *Geocarto International*.

91. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. H., (2009), *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction,* Springer.

92. He N., Song Y., Hu G., Yang Z., Fu Q., Gurkalo F. (2023), “The distribution law and coupling factors of debris flows in the G318 Linzhi–Lhasa section of the Sichuan–Tibet traffic corridor”, *Frontiers in Ecology and Evolution*.

93. Hochreiter S., Schmidhuber J. (1997), “Long short-term memory”, *Neural Computation* 9, 1735–1780.

94. Hofmann R., Berger S., Wimmer L. (2025), “Early detection of climate change-induced shallow landslides”, *Communications Earth & Environment* 6, Article 695.

95. Huang Y., Zhao L. (2018), “Review on landslide susceptibility mapping using support vector machines”, *Catena* 165, 520–529.

96. Hungr O., Leroueil S., Picarelli L. (2014), “The Varnes classification of landslide types, an update”, *Landslides 11(2), 167–194.*

97. ICL (2024), “ICL-Activities”, *Landslides* 1(2), 163–167.

98. Iverson R.M. (1997), “The physics of debris flows”, *Reviews of Geophysics* 35(3), 245–296.

99. Iverson R.M., Reid M.E., LaHusen R.G. (1997), “Debris-flow mobilization from landslides”, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 25(1), pp. 85–138.

100. Iverson R.M., Denlinger R.P. (2001), “Flow of variably fluidized granular masses across three-dimensional terrain: 1. Coulomb mixture theory”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 106(B1), 537–552.

101. Jaboyedoff M., Carrea D., Derron M.H., Oppikofer T., Penna I.M., Rudaz B. (2020), “A review of methods used to estimate initial landslide failure surface depths and volumes”, *Engineering Geology*.

102. Jaafari A. (2018), “LiDAR-supported prediction of slope failures using an integrated ensemble weights-of-evidence and analytical hierarchy process”, *Environmental Earth Sciences* 77, 42.

103. Jaafari A., Janizadeh S., Abdo H. G., Mafi-Gholami D. (2022a), “Understanding land degradation induced by gully erosion from the perspective of different geoenvironmental factors”, *Journal of Environmental Management* 315, 115181.

104. Jaafari A., Panahi M., Mafi-Gholami D., Rahmati O., Shahabi H., Shirzadi A., Lee S., Bui D.T. (2022b), “Swarm intelligence optimization of the group method of data handling using the cuckoo search and whale optimization algorithms to model and predict landslides”, *Applied Soft Computing* 116, 108254.

105. Jahandar O., Abdi E., Jaafari A. (2022), “Assessment of slope failure susceptibility along road networks in a forested region, northern Iran”, *Physics and Chemistry of the Earth* 128, 103272.

106. Johnson K.A., Sitar N. (1990), “Hydrologic conditions leading to debris flow initiation”, *Canadian Geotechnical Journal* 27(6), pp. 789–801

107. Kavzoglu T., Sahin E.K., Colkesen I. (2015), “An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: A case study of Duzkoy district”, *Natural Hazards* 76(1), 471–496.

108. Kayyal, M. K. Wright, S. G. (1991), *Investigation of long-term strength properties of Paris and Beaumont clays in earth embankments*, Research Report 1195-2F, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin, Austin.

109. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P. (1998), “Gradient-based learning applied to document recognition”, *Proceedings of the IEEE* 86, 2278–2324.

110. Le Minh N., Truyen P.T., Van Phong T., Jaafari A., Amiri M., Van Duong N., Van Bien N., Duc D.M., Prakash I., Pham B.T. (2023), “Ensemble models based on radial basis function network for landslide susceptibility mapping”, *Environmental Science and Pollution Research* 30, 99380–99398.

111. Lee S., Ryu J.H., Min K., Choi W.S. (2003), “Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network”, *Earth Surface Processes and Landforms* 28(12), 1361–1376.

112. Li A.J., Merifield R.S., Lyamin A.V. (2010), “Three-dimensional stability charts for slopes based on limit analysis methods”, *Canadian Geotechnical Journal* 47(12), 1316–1334.

113. Li L., Lin H., Qiang Y., Zhang Y., Liang S., Hu S., Xu X., Ni B. (2024), “Stability analysis of rainfall-induced landslide considering air resistance delay effect and lateral seepage”, *Scientific Reports* 14, 8377.

114. Li Y., Wang Y., Wang X., Qi J., Zhang X., Lin Q. (2024), “Risk assessment of glacial debris flow on highway under warming climate: A case study of Tianmo Gully in the southeastern Tibetan Plateau”, *Ecological Indicators*.

115. Li Y., Chao G., Xing Y., Li H., Zhou J. (2022), “A GIS-based probabilistic analysis model for rainfall-induced shallow landslides in mountainous areas”, *Natural Hazards*.

116. Li J., Zhao Y., Chen D., Zhao P., Zhang C. (2024a), “The quantitative role of moisture and vertical motion in shaping summer heavy rainfall over North China under two distinct large-scale weather patterns”, *Journal of Climate* 37, 2655–2672.

117. Li Z.Q., Nie L., Xue Y., Li Y., Tao Y. (2024b), “Experimental investigation of progressive failure characteristics and permeability evolution of limestone: Implications for water inrush”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1–18.

118. Liu J., Shen Z., Hu B., Zhang Y., Ou X., Cong K., Bi Y., Li Y., Dai B., Liu P. (2025), “Experimental analysis of rainfall-induced shallow landslides: a case study of a loess slope in Gaolan County, China”, *Frontiers in Earth Science* 13, Article 1613118.

119. Liu S., Wang L., Zhang W., He Y., Pijush S. (2023), “A comprehensive review of machine learning-based methods in landslide susceptibility mapping”, *Geological Journal*.

120. Liu B., Guo H., Li J., Ke X., He X. (2024a), “Application and interpretability of ensemble learning for landslide susceptibility mapping along the Three Gorges Reservoir area, China”, *Natural Hazards*, 1–32.

121. Liu C., Shan Y., He L., Li F., Liu X. (2024b), “Plant morphology impacts bedload sediment transport”, *Geophysical Research Letters* 51, e2024GL108800.

122. Liu G., Meng H., Song G., Bo W., Zhao P., Ning B. (2024c), “Numerical simulation of wedge failure of rock slopes using three-dimensional discontinuous deformation analysis”, *Environmental Earth Sciences* 83, 310.

123. Lomtadze V. (1977), “Regularities of development of gravitational processes and their prediction”, *Bulletin of Engineering Geology & the Environment* 15(1).

124. Lu N., Sener-Kaya B., Wayllace A., Godt J.W. (2012), “Analysis of rainfall-induced slope instability using a field of local factor of safety”, *Water Resources Research* 48, W09524.

125. Lu N., Godt J.W. (2013), *Hillslope hydrology and stability*, Cambridge University Press, Cambridge.

126. Lundberg S.M, Lee S.I. (2017), “A unified approach to interpreting model predictions”, *Advances in Neural Information Processing Systems* 30.

127. Luu C., Hang H., Quynh Q.B., Dung N.L., Dong T.K., Hung V., Dinh Q.N. (2023), “Flash flood and landslide susceptibility analysis for a mountainous roadway in Vietnam using spatial modeling”, *Quaternary Science Advances*.

128. Mahdavifar S., Ghorbani A.A. (2019), “Application of deep learning to cybersecurity: A survey”, *Neurocomputing* 347, 149–176.

129. Mersha Meten (2020), “GIS-based landslide susceptibility mapping and assessment using bivariate statistical methods in Simada area, northwestern Ethiopia”, Springer Nature.

130. Millán-Arancibia C., Lavado-Casimiro W. (2023), “Rainfall thresholds estimation for shallow landslides in Peru from gridded daily data”, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23(3), pp. 1191–1206.

131. Mu Y., Zhang Z., Zhou T., Guo Z. (2023), “Effect of mica content on mechanical properties of Yili River Valley loess under the impact of freezing and thawing”, *Sustainability* 15(4), 3329.

132. Murgia H., Vitali A., Giadrossich F., Tonelli E., Baglioni L., Cohen D., Schwarz M., Urbinati C. (2024), “Effects of land cover changes on shallow landslide susceptibility using SlideforMAP software (Mt. Nerone, Italy),” *Land*.

133. Nguyen H.D., Tung C.V., Bretcan P., Petrisor A. (2024), “Assessing the relationship between landslide susceptibility and land cover change using machine learning”, *Vietnam Journal of Earth Sciences*.

134. Nguyen L.C., Pham T.V., Tuan D.N. (2019), *Deep-seated rainfall-induced landslides on a new expressway: A case study in Vietnam*, Springer.

135. Nguyen Viet T., Nguyen D.D., Nguyen Duc M., Cao Trong C., Sy Hung M., Van Le H., Prakash I., Thai Pham B. (2024), “Exploring deep learning models for roadside

landslide prediction: Insights and implications from comparative analysis", *Physics and Chemistry of the Earth* 136, 103741. DOI: 10.1016/j.pce.2024.103741.

136. Nhu H.V., Shirzadi A., Shahabi H., Singh S., Ansari N., Clague J., Jaafari A., Chen W., Do J., Górski K., Luu C., Binh P.T., Nguyen H., Ahmad B.B., (2020), "Shallow landslide usceptibility mapping: A comparison between logistic model tree, logistic regression, aïve Bayes tree, artificial neural network, and support vector machine algorithms", *IJERPH*.
137. Nieto N., Chamorro A., Echaveguren T., Escauriaza C. (2022), "Fragility curves for road embankments exposed to adjacent debris flow", *Progress in Physical Geography*.
138. Nie F., Su X., Wang M., Ma X., Ou K., Liu J., Lin H. (2025), "Debonding of asphalt–aggregate interface under coupled moisture and temperature conditions: An atomistic study", *Case Studies in Construction Materials* 22, e04554.
139. Nontapot Chao (2025), "Advancing rainfall-induced landslide hazard mapping: Comparative study of semi-quantitative, statistical, hybrid, and deterministic models," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*.
140. Panahi M., Jaafari A., Shirzadi A., Shahabi H., Rahmati O., Omidvar E., Lee S., Tien Bui D. (2021), "Deep learning neural networks for spatially explicit prediction of flash flood probability", *Geoscience Frontiers* 12, 101076.
141. Perry J. (1989), *A survey of slope condition on motorway earthworks in England and Wales*, Research Report 199, Transport & Road Research Laboratory, Crowthorne.
142. Pham B.T., Jaafari A., Nguyen D.D., Bayat M., Nguyen H.B.T. (2022), "Development multiclass alternating decision trees based models for landslide susceptibility mapping", *Physics and* of *Chemistry of the Earth* 128, 103235.
143. Phillips C., Hales T., Smith H., Basher L. (2021), "Shallow landslides and vegetation at the catchment scale: a perspective", *Ecological Engineering* 173, 106436.
144. Pierson F.W., Whitaker S. (1977), "Some theoretical and experimental observations of the wave structure of falling liquid films", *AIChE Journal* 23(2), 179–190.
145. Pourghasemi H.R., Yansari Z.T., Panagos P., Pradhan B. (2018), "Analysis and evaluation of landslide susceptibility: A review on articles published during 2005–2016 (periods of 2005–2012 and 2013–2016)", *Arabian Journal of Geosciences* 11(9), 193.

146. Pradel D., Raad G. (1993), “Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes”, *Journal of Geotechnical Engineering* 119(2), 315–332.
147. Pradhan A.M.S., Kim Y.T. (2016), “Landslide susceptibility mapping of Phewa catchment using multilayer perceptron artificial neural network”, *Nepal Journal of Environmental Science* 4, 1–9.
148. Pradhan B., Seeni M.I., Kalantar B. (2017), “Performance evaluation and sensitivity analysis of expert-based, statistical, machine learning, and hybrid models for producing landslide susceptibility maps”, trong *Laser scanning applications in landslide assessment*, Springer, 193–232.
149. Pudasaini S.P. (2012), “A general two-phase debris flow model”, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117(F3), F03010.
150. Qiu S., Gao P., Pan L., Zhou L., Liang R., Sun Y. (2023), “Developing nonlinear additive tree crown width models based on decomposed competition index and tree variables”, *Journal of Forestry Research* 34, 1407–1422.
151. Rahimi A., Rahardjo H., Leong E.C. (2011), “Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 137(5), 483–491.
152. Reichenbach P., Rossi M., Malamud B.D., Mihir M., Guzzetti F. (2018), “A review of statistically-based landslide susceptibility models”, *Earth-Science Reviews* 180, 60–91.
153. Rossi M., Guzzetti F., Reichenbach P., Mondini A.C., Peruccacci S. (2010), “Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts”, *Geomorphology* 114, pp. 129–142.
154. Salm B. (1993), “Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches”, *Annals of Glaciology* 18, 221–226.
155. Savage S.B., Hutter K. (1989), “The motion of a finite mass of granular material down a rough incline”, *Journal of Fluid Mechanics* 199, 177–215.
156. Schilirò L., Marmoni G.M., Fiorucci M., Pecci M., Scarascia Mugnozza G. (2023), “Preliminary insights from hydrological field monitoring for the evaluation of landslide triggering conditions over large areas”, *Natural Hazards* 118, pp. 1401–1426.
157. Schwertmann U., Taylor R.M. (1989), “Iron oxides,” trong *Minerals in soil environments*, Soil Science Society of America, 379–438.

158. Shabani S., Jaafari A., Bettinger P. (2021), “Spatial modeling of forest stand susceptibility to logging operations”, *Environmental Impact Assessment Review* 89, 106601.
159. Shi G., Li X., Guo Z., Zhang Z., Zhang Y. (2022), “Effect of mica content on shear strength of the Yili loess under the dry–wet cycling condition”, *Sustainability* 14(15), 9569.
160. Shou K.J., Chen J. (2021), “On the rainfall induced deep-seated and shallow landslide hazard in Taiwan”.
161. Sidle R.C., Ochiai H. (2006), *Landslides: Processes, prediction, and land use*, American Geophysical Union, Washington, D.C.
162. Soeters R., Van Westen C.J. (1996), “Slope instability recognition, analysis, and zonation”, trong *Landslides: Investigation and mitigation*, Transportation Research Board, Washington D.C., 129–177.
163. Soibam Mangi (2024), “Influence of clay on soil erodibility and landslides: Some examples from Manipur, Northeast India”, Springer.
164. Solórzano-Blacio C., Albuja-Sánchez J. (2025), “Effect of nanosilica on the undrained shear strength of organic soil”, *Nanomaterials* 15(9), 702.
165. Spagnoli G., Feinendegen M., Di Gioia A., Rubinos D. (2019), “A statistical reappraisal of the relationship between liquid limit and plasticity index of soils”, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(4), 903–909.
166. Sun Z., Elsworth D., Cui G., Li Y., Zhu A., Chen T. (2024), “Impacts of rate of change in effective stress and inertial effects on fault slip behavior: New insights into injection-induced earthquakes”, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 129, e2023JB027126.
167. Supandi, S. Zakaria, Z. Sukiyah, E. Sudradjat, A. (2017), “The influence of kaolinite–illite toward mechanical properties of claystone”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 71, 012012.
168. Süzen M.L., Doyuran V. (2004), “A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: Multivariate versus bivariate”, *Environmental Geology* 45(5), 665–679.
169. Tofani V., Dapporto S., Vannocci P., Casagli N. (2006), “Infiltration, seepage and slope instability mechanisms during the 20–21 November 2000 rainstorm in Tuscany, central Italy”, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 6, 1025–1033.

170. Thanh D.Q., Nguyen D.H., Prakash I., Jaafari A., Nguyen V.T., Van Phong T., Pham B.T. (2020), "GIS-based frequency ratio method for landslide susceptibility mapping at Da Lat City, Lam Dong province, Vietnam", *Vietnam Journal of Earth Sciences* 42, 55–66.
171. Thapa, I. Ghani, S. Paramasivam, P. Tufa, M. A. (2025), "Development of an optimized deep learning model for predicting slope stability in nano silica stabilized soils," *Scientific Reports* 15, 26213.
172. Thomas D.M., Benson M.A. (1970*), Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics,* U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1975.
173. Tuganishuri E., Yune C.Y., Kim G., Lee S.W., Adhikari M.D., Yum S.g. (2025), "Prediction of the volume of shallow landslides due to rainfall using data-driven models", *Natural Hazards and Earth System Sciences.*
174. Tzampoglou P., Ilia I., Karametou R., Tsangaratos P., Chen W., Papathanassiou G. (2025), "Correlation between geotechnical and geophysical parameters for landslide susceptibility in the Hellenic area", *Geotechnical and Geological Engineering* 43(1), 215–235.
175. Vakhshoori V., Zare M. (2016), "Landslide susceptibility mapping by comparing weight of evidence, fuzzy logic, and frequency ratio methods", *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7(5), 1731–1752.
176. Van Staden R., Fragomeni S. (2020), "Moisture damage in asphalt pavements at aggregate–asphalt interface–A finite element study", trong *Lecture Notes in Civil Engineering* 37, Springer, 605–613.
177. Van Westen C.J. (2007), "Mapping landslides: recent developments in the use of digital information", trong *Proceedings of the First North American Conference on Landslides,* Vail, pp. 221–238.
178. Varnes D.J. (1978), "Slope movement types and processes", *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control*, Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D.C., 11–33.
179. Varnes D.J. (1984), *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*, The United Nations Educational Scientific and Cultural Organization.
180. Vennari C., Gariano S.L., Antronico L., Brunetti M.T., Iovine G., Peruccacci S., Terranova O., Guzzetti F. (2014), "Rainfall thresholds for shallow landslide

occurrence in Calabria, southern Italy", *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14, pp. 317–330.

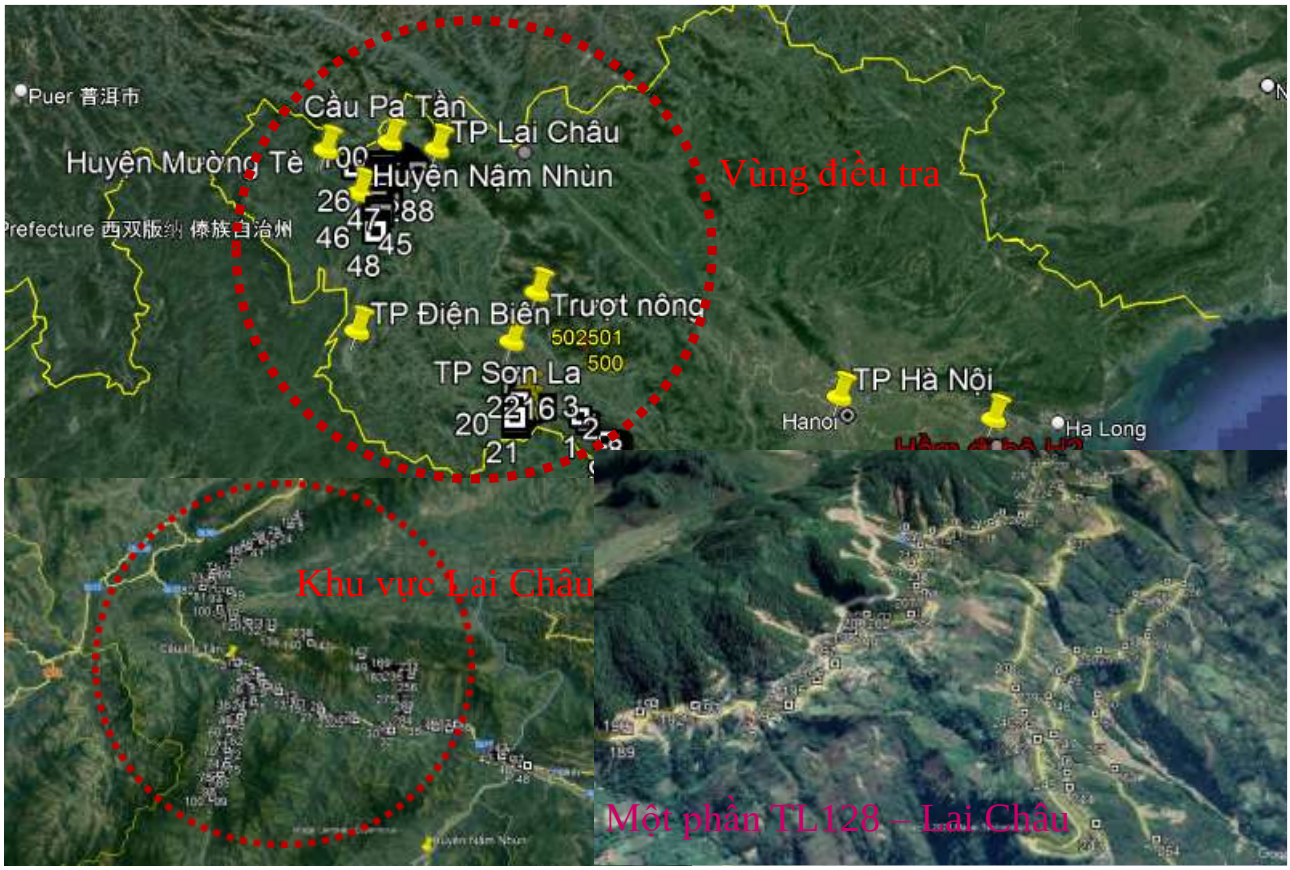
181. Villaça C., Santos P.P., Zêzere J.L. (2024), "Modelling the rainfall threshold for shallow landslides considering the landslide predisposing factors in Portugal", *Landslides* 21, pp. 2119–2133.
182. Wahab M.K.A., Zainol M.R.R.M.A., Abas M.A., Razak N.A. (2025), "Numerical analysis of debris impact forces and its environmental repercussions using smoothed particle hydrodynamics", *Environmental Earth Sciences Proceedings* 33, 7.
183. Wang G., Sassa K. (2003), "On the pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides in laboratory flume tests", *Geomorphology* 51(1–3), 227–240.
184. Wang H., Zhang L., Luo H., He J., Cheung R.W.M. (2021), "AI-powered landslide susceptibility assessment in Hong Kong", *Engineering Geology* 288, 106103.
185. Wang H., Zou J., Wang X., Lv P., Tan Z., Cheng L., Wei Q., Qin B., Guo Z. (2024), "Analysis of deformation mechanism of rainfall-induced landslide in the Three Gorges Reservoir Area: Piansongshu landslide", *Scientific Reports* 14. DOI: 10.1038/s41598-024-60590-w.
186. Wang L., Zhang X., Tinti S. (2019), "Shallow landslides modeling using a particle finite element model with emphasis on landslide evolution".
187. Wei X., Zhang L., Luo J., Liu D. (2021), "A hybrid framework integrating physical model and convolutional neural network for regional landslide susceptibility mapping", *Natural Hazards* 109, 471–497.
188. Wu L.Z., Huang R.Q., Xu Q., Zhang L.M., Li H.L. (2015), "Analysis of physical testing of rainfall-induced soil slope failures", *Environmental Earth Sciences* 73(12), 8519–8533.
189. Wu W., Sidle R.C. (1995), "A distributed slope stability model for steep forested basins", *Water Resources Research* 31(8), 2097–2110.
190. Xavarensky F.P. (1934), *Experimental construction of a landslide classification*, Geologo-Razvedochnyi Institut – TSNIGRI.
191. Xu L., Coop M.R., Zhang M., Wang G. (2018), "The mechanics of a saturated silty loess and implications for landslides", *Engineering Geology* 236, 29–42.
192. Xue K., Ajmera B., Tiwari B., Hu Y. (2016), "Effect of long duration rainstorm on stability of red-clay slopes" *Geoenvironmental Disasters* 3, 15.

193. Ye X., Zhu H.H., Chang F.N., Xie T.C., Tian F., Zhang W., Catani F. (2024), "Revisiting spatiotemporal evolution process and mechanism of a giant reservoir landslide during weather extremes", *Engineering Geology* 332, 107480.
194. Youssef A.M., Al-Katheery M., Pradhan B. (2015), "Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models", *Geoscience Journal* 19(1), 113–134.
195. Zeng J., Cui Z.D., Zhang Z.Q., Liang B. (2020), "Influence of soil plasticity on hydraulic conductivity", *Marine Georesources & Geotechnology* 38(5), 594–604.
196. Zhang J., Soltani A., Deng A., Jaksa M.B. (2019), "Mechanical behavior of micaceous clays", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(5), 1044–1054.
197. Zhang J., Wang S., Huang J., He Y., Ren Y. (2023a), "The precipitation-recycling process enhanced extreme precipitation in Xinjiang, China", *Geophysical Research Letters* 50, e2023GL104324.
198. Zhao Y., Li J., Tian Y., Li J. (2024a), "Distinguish extreme precipitation mechanisms associated with atmospheric river and non-atmospheric river in the lower Yangtze River Basin", *Journal of Climate* 37, 3995–4010.
199. Zhao Y., Li J., Wang Y., Zhang W., Wen D. (2024b), "Warming climate-induced changes in cloud vertical distribution possibly exacerbate intra-atmospheric heating over the Tibetan Plateau", *Geophysical Research Letters* 51, e2023GL107713.
200. Zheng H., Shi Z., De Haas T., Shen D., Hanley K.J., Li B. (2022), "Characteristics of the impact pressure of debris flows", *Engineering Geology*.
201. Zhong H., Huang Y., Zhu Z., Gu X., Zhang X. (2026), "Rainfall-induced landslide simulation via a coupled FVM-DEM method", *Geoenvironmental Disasters* 13, Article 4.

PHỤ LỤC

PHỤ LỤC 1

Hiện trạng trượt đất đá một số tuyến giao thông hiện hữu MNTB



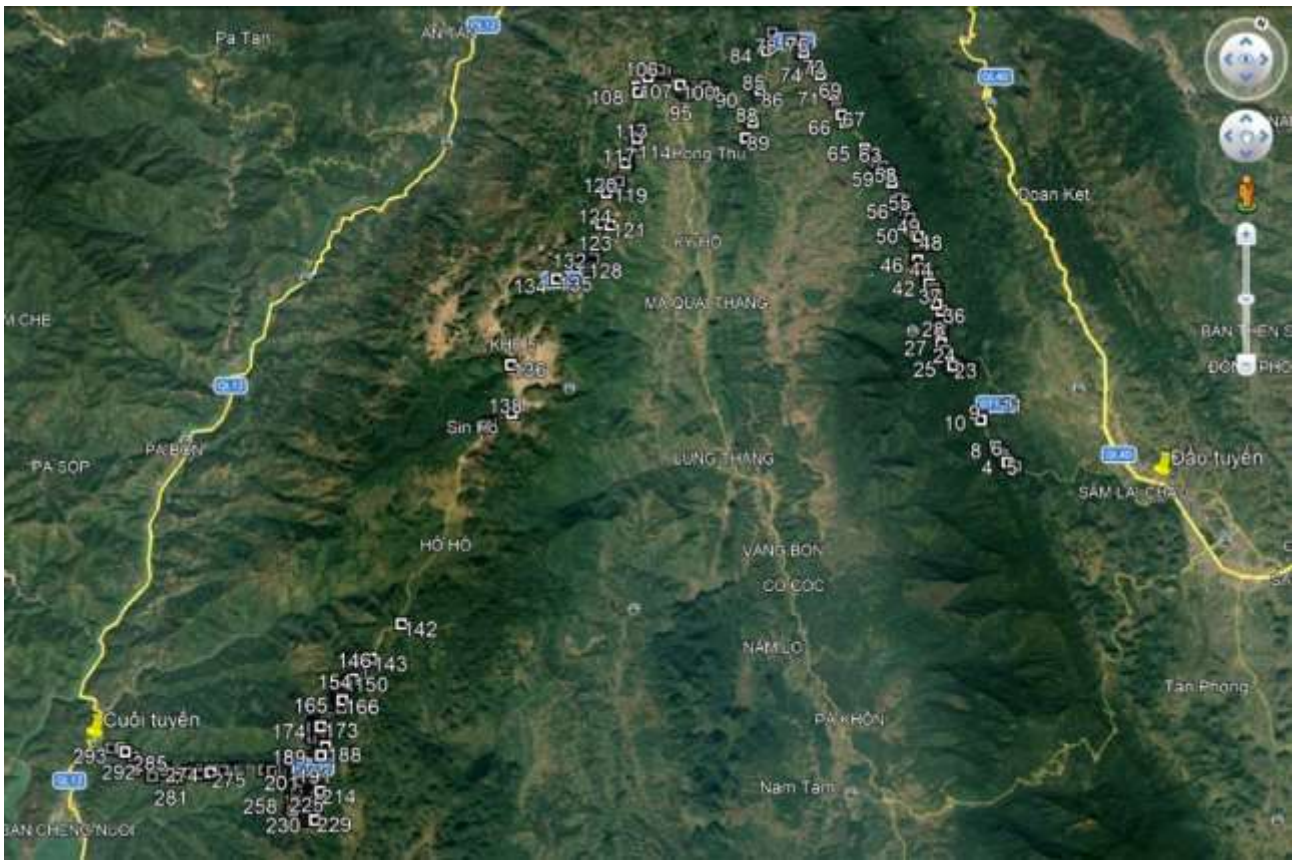
Hình PL1.1. Vùng điều tra các tuyến đường miền núi Tây Bắc (ảnh Google Earth)



Hình PL1.2. Tuyến QL12 (ảnh Google Earth)



Hình PL1.3. Tuyến QL4H (ảnh Google Earth)



Hình PL1.4. Tuyến ĐT128 (ảnh Google Earth)



Hình PL1.5. Tuyến QL4G (ảnh Google Earth)



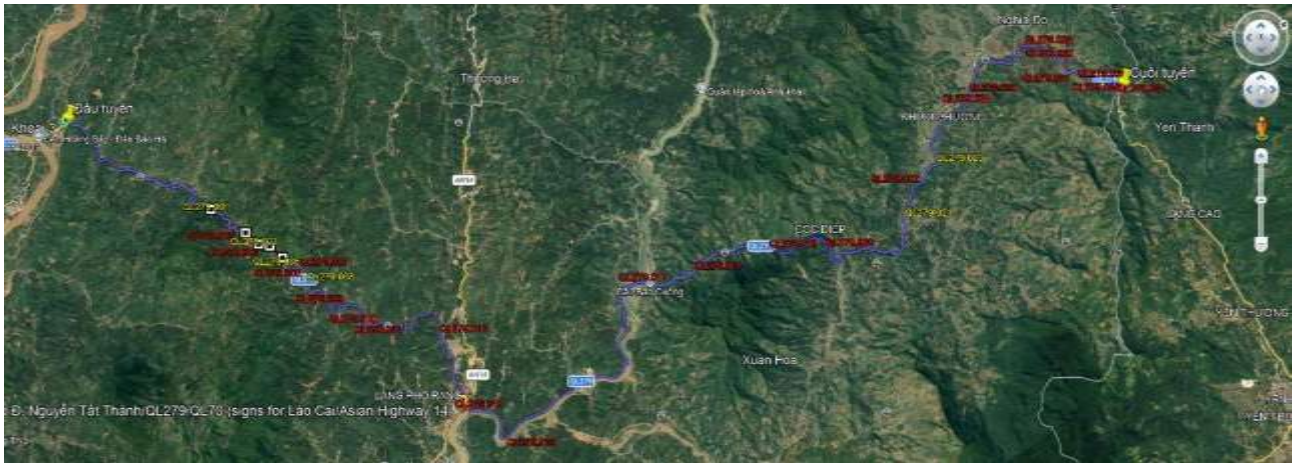
Hình PL1.6. Tuyến QL37 (ảnh Google Earth)



Hình PL1.7. Tuyến QL6 (ảnh Google Earth)



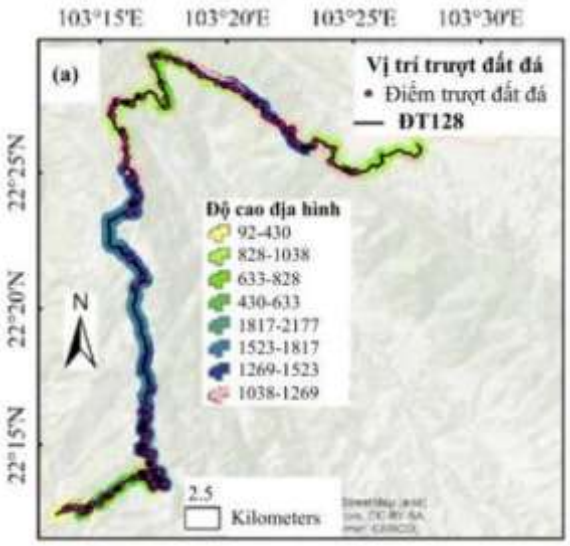
Hình PL1.8. Tuyến QL4D (ảnh Google Earth)



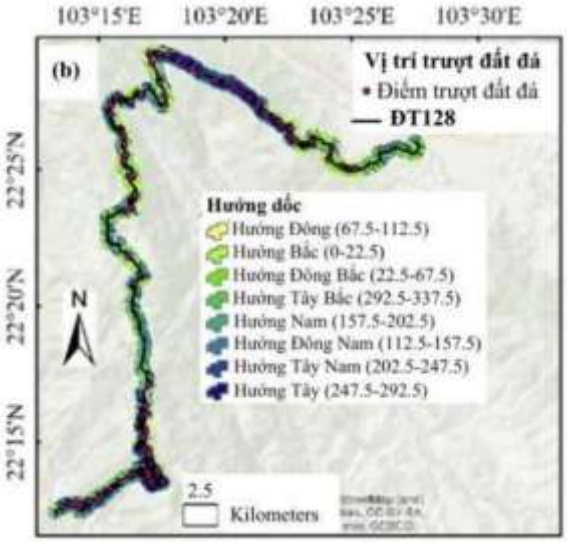
Hình PL1.9. Tuyến QL279 (ảnh Google Earth)

PHỤ LỤC 2

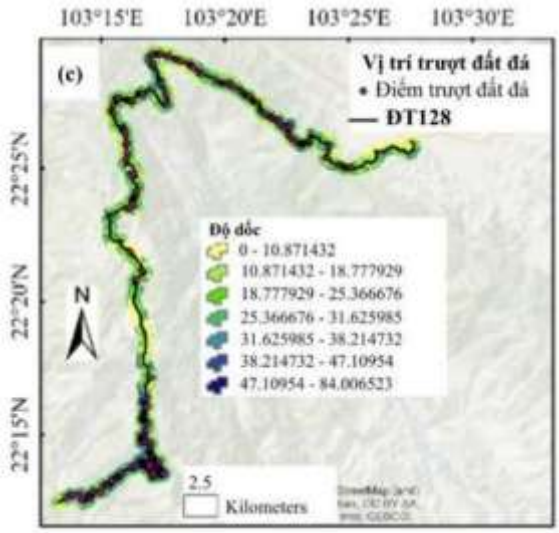
Bản đồ các yếu tố ảnh hưởng trượt đất đá dọc tuyến ĐT128



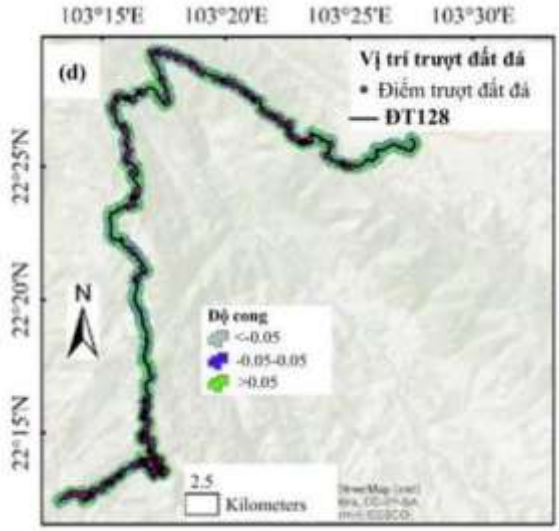
(a) Bản đồ độ cao địa hình



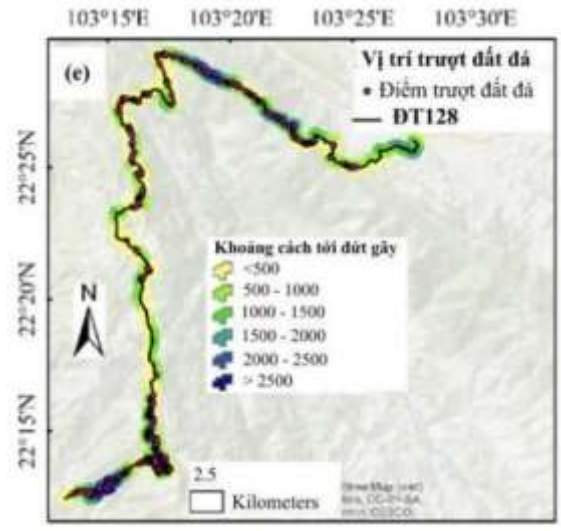
(b) Bản đồ hướng dốc



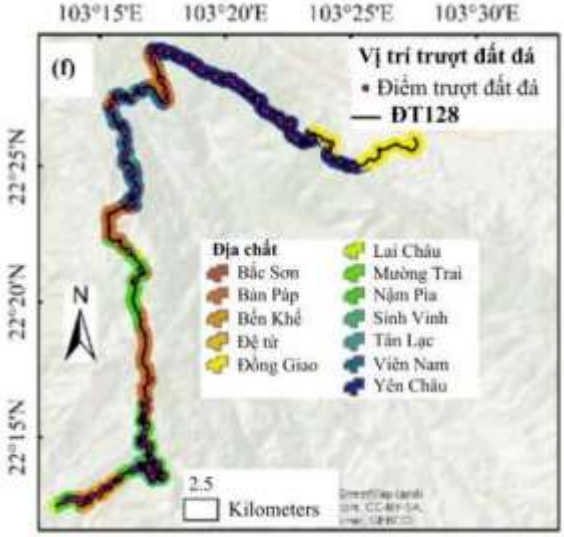
(c)Bản đồ độ dốc sườn



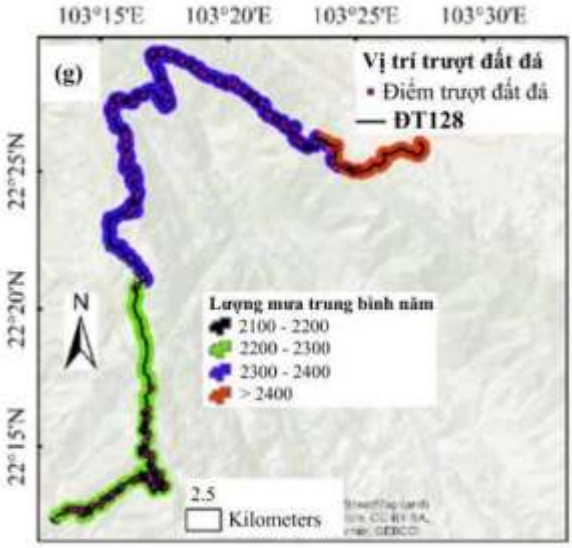
(d) Bản đồ độ cong sườn



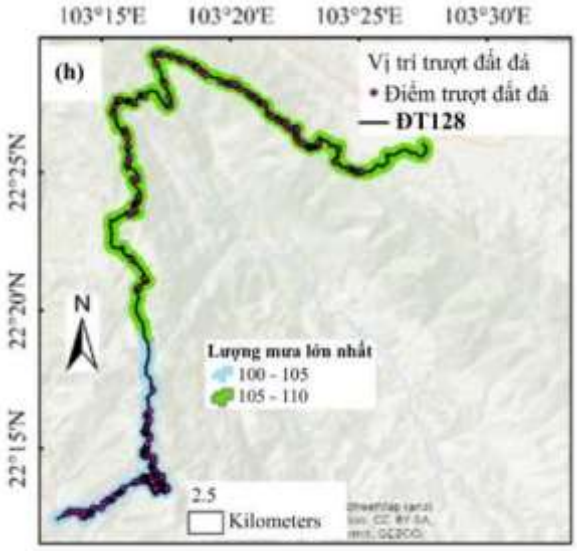
(e) Bản đồ khoảng cách đến đứt gãy



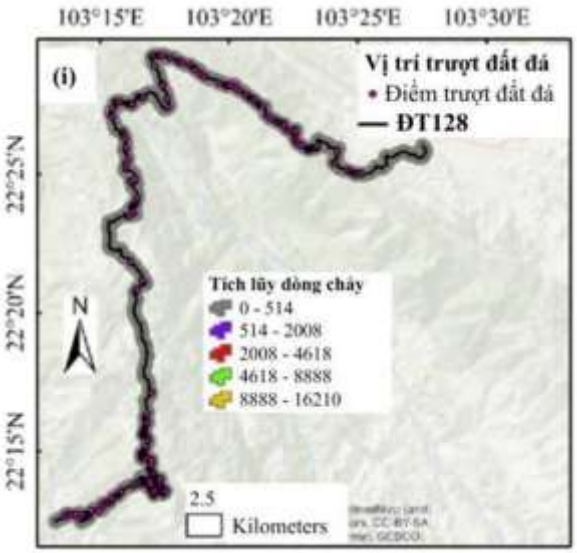
(f) Bản đồ địa chất



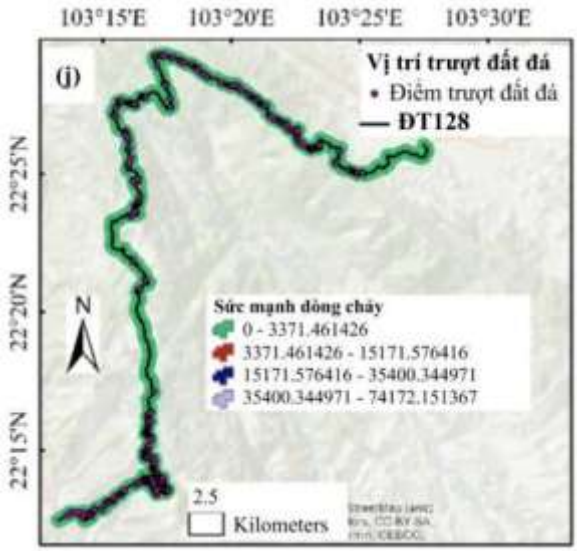
(g) Bản đồ lượng mưa trung bình năm



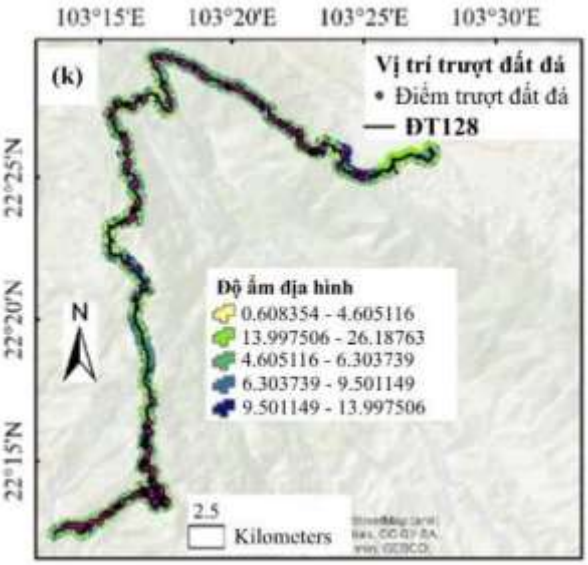
(h) Bản đồ lượng mưa lớn nhất



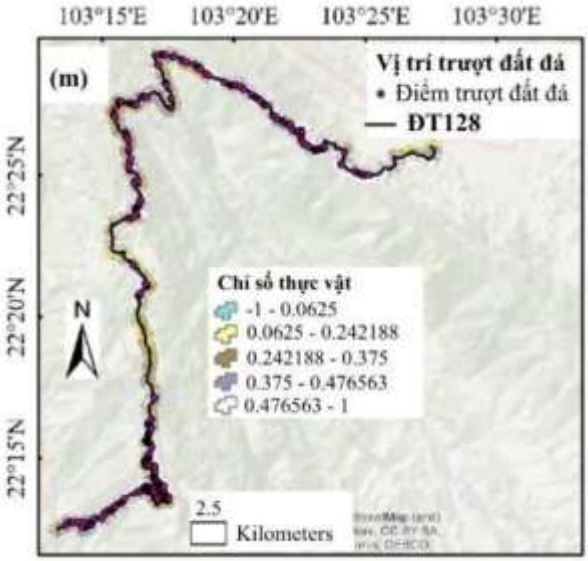
(i) Bản đồ tích lũy dòng chảy



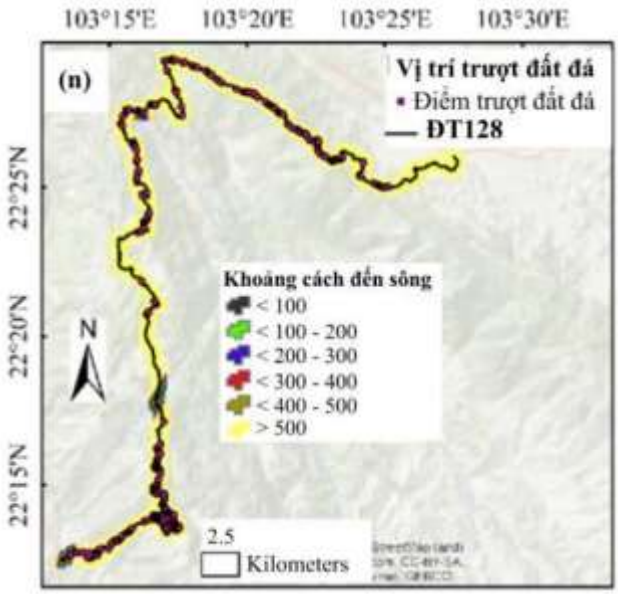
(j) Chỉ số sức mạnh dòng chảy (SPI)



(k) Độ ẩm địa hình (TWI)



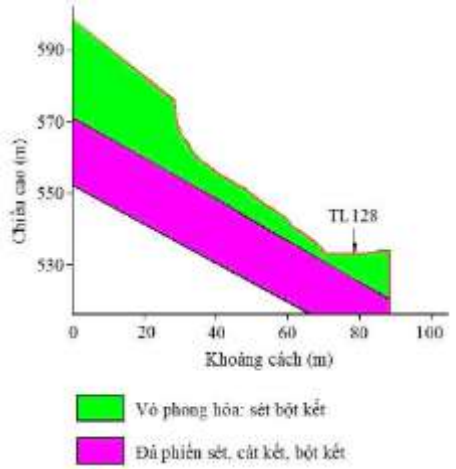
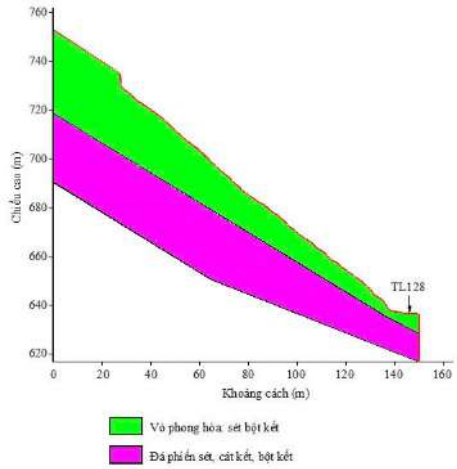
(m) Chỉ số thực vật (NDVI)

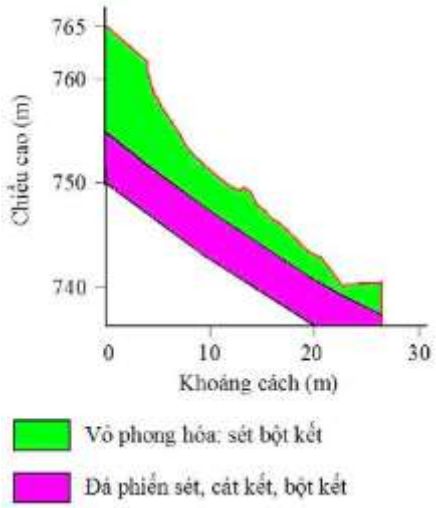


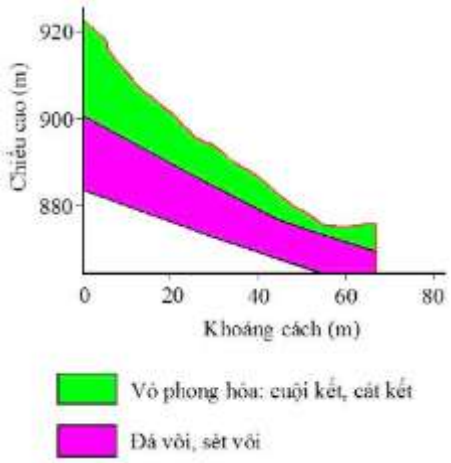
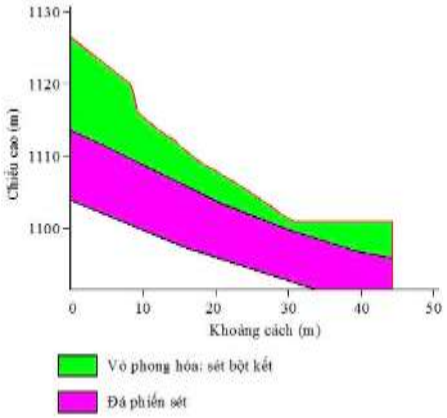
(n) Khoảng cách đến sông

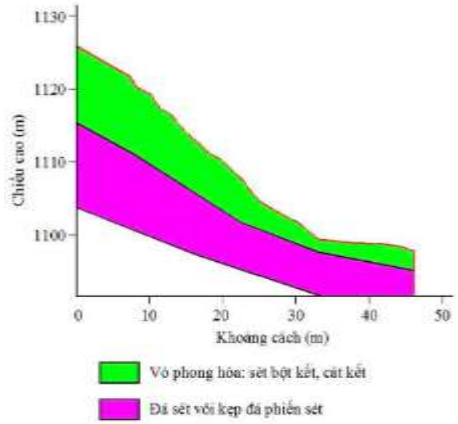
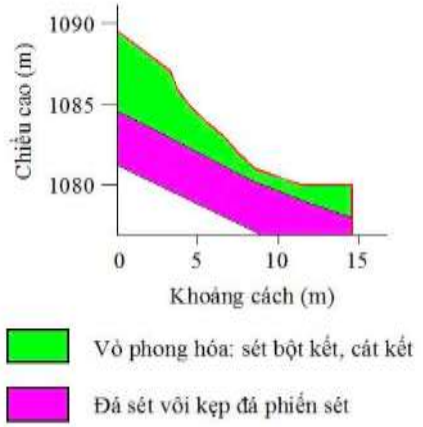
PHỤ LỤC 3

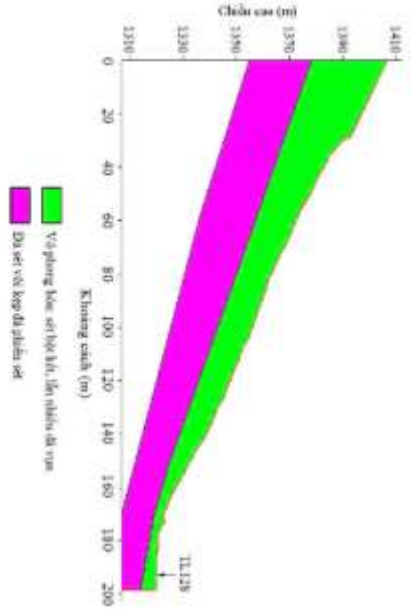
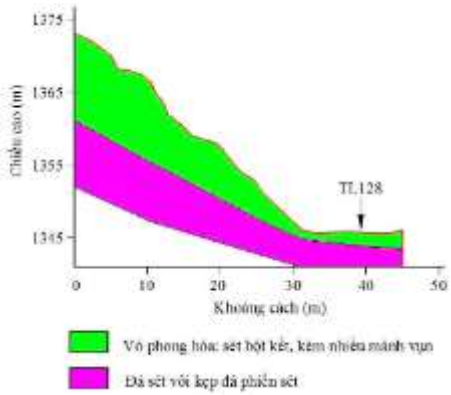
Hiện trạng trượt đất đá dọc tuyến ĐT128 đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ

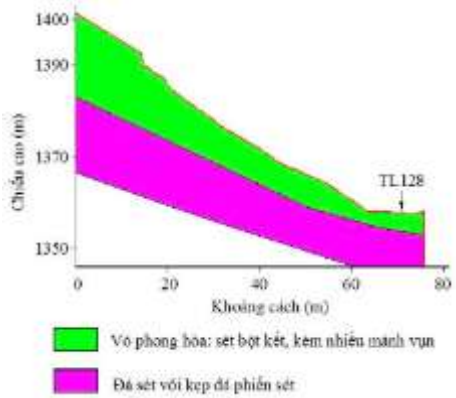
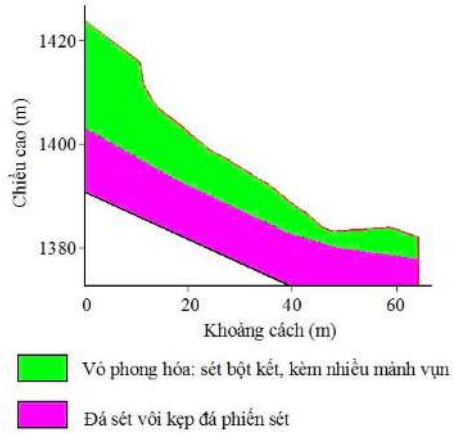
Ký hiệu	Vị trí	Đặc điểm	Ảnh hiện trạng (UAV)	Mặt cắt
ĐT128-14	22°12'28.46"N - 103°11'46.04"E	*Kích thước:* L_r ~ 59 m, W_r ~ 38 m, H ~ 42 m, D_r ~ 6,5 m *Kiểu trượt:* Trượt xoay trong vỏ phong hóa trung bình, trượt tốc độ nhanh, có nguy cơ tiềm ấn trượt rất cao *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng vòng cung, mặt trượt cong *Thành phần thạch học:* Đá phiến sét, cát kết, bột kết với vỏ phong hóa là sét bột kết. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh khá phong phú, cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn		
ĐT128-21	22°12'32.22"N - 103°12'14.66"E	*Kích thước:* L_r ~ 150 m, W_r ~ 14 m, H ~ 98 m, D_r ~ 3,0 m *Kiểu trượt:* Trượt phẳng trong vỏ phong hóa trung bình, trượt tốc độ nhanh, có nguy cơ tiềm ấn trượt rất cao *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng lưỡi dao, mặt trượt phẳng *Thành phần thạch học:* Đá phiến sét, cát kết, bột kết với vỏ phong hóa là sét bột kết. *Điều kiện thủy văn:* nằm trong vùng địa hình trũng, nguy cơ trượt lở tiếp và mở rộng trong tương lai.		

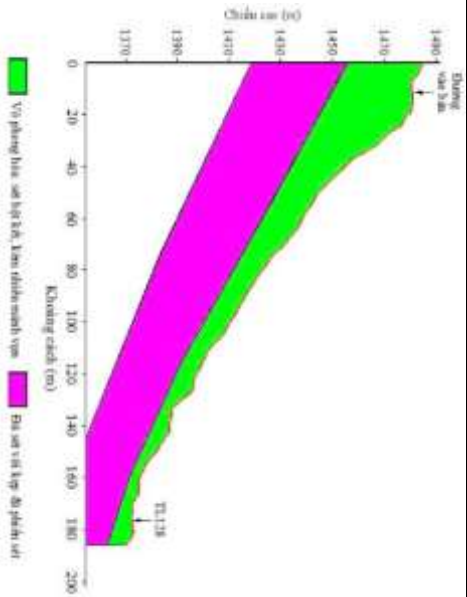
		Thảm thực vật: Lớp phủ thực vật xung quanh khá phong phú, cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn		
ĐT128-25	22°12'45.62"N – 103°12'35.09"E	*Kích thước:* L_r ~ 31,3 m, W_r ~ 21,8 m, H ~ 24 m, D_r ~ 3,8 m *Kiểu trượt:* Trượt xoay trong vỏ phong hóa trung bình. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng vòng cung, mặt trượt cong *Thành phần thạch học:* Đá phiến sét, cát kết, bột kết với vỏ phong hóa là sét bột kết. *Điều kiện thủy văn:* hầu như không chịu ảnh hưởng của chế độ thủy văn quanh vùng do khối trượt nằm trên cao. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn		

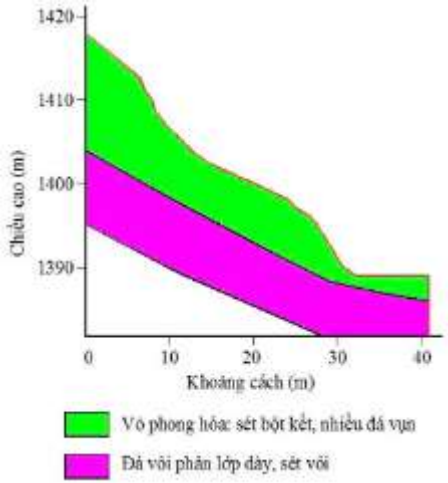
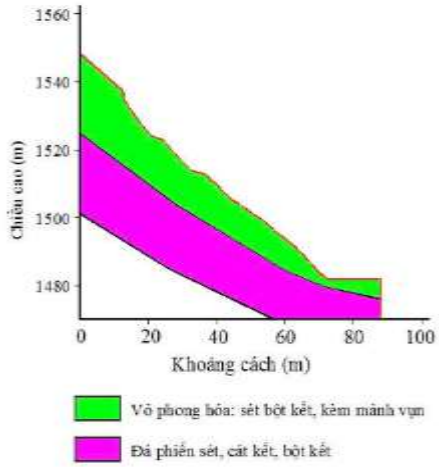
ĐT128-34	22°13'16.58"N – 103°13'41.59"E	*Kích thước:* L_r ~ 66 m, W_r ~ 14,0 m, H ~ 43 m, D_r ~ 3,1 m *Kiểu trượt:* Trượt hỗn hợp trong vỏ phong hóa. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng lưỡi dao, mặt trượt cong. *Thành phần thạch học:* Đá vôi, sét vôi với vỏ phong hóa là cuội kết, cát kết. *Điều kiện thủy văn:* hầu như không chịu ảnh hưởng của chế độ thủy văn quanh vùng do khối trượt nằm trên cao. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn		
ĐT128-37	22°13'18.20"N – 103°14'7.00"E	*Kích thước:* L_r ~ 29,3 m, W_r ~ 10,5 m, H ~ 19,26 m, D_r ~ 2,2 m *Kiểu trượt:* Trượt phẳng trong vỏ phong hóa. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng trên hẹp, dưới rộng; mặt trượt hình chêm. *Thành phần thạch học:* Sét vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết. *Điều kiện thủy văn:* hầu như không chịu ảnh hưởng của chế độ thủy văn quanh vùng do khối trượt nằm trên cao. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi đan xen với cây thân gỗ nhỏ.		

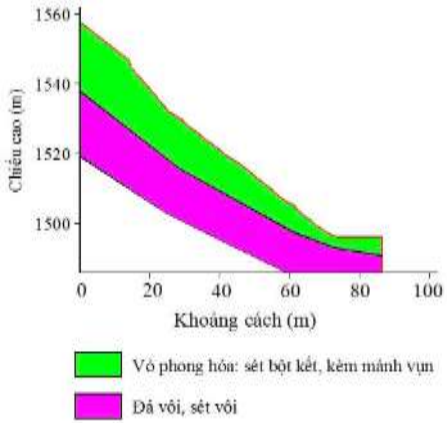
ĐT128-41	22°13'22.00"N – 103°14'5.30"E	*Kích thước:* L_r ~ 34 m, W_r ~ 19,2 m, H ~ 23 m, D_r ~ 1,21 m *Kiểu trượt:* Trượt phẳng trong vỏ phong hóa trung bình. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng vòng cung, mặt trượt phẳng. *Thành phần thạch học:* Đá vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết. *Điều kiện thủy văn:* hầu như không chịu ảnh hưởng của chế độ thủy văn quanh vùng do khối trượt nằm trên cao. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi.		
ĐT128-42	22°13'2.80"N – 103°14'28.00"E	*Kích thước:* L_r ~ 10,65 m, W_r ~ 10 m, H ~ 7 m, D_r ~ 1,1 m *Kiểu trượt:* Trượt xoay trong vỏ phong hóa trung bình. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng trên hẹp dưới rộng, mặt trượt cong. *Thành phần thạch học:* Đá vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết. *Điều kiện thủy văn:* hầu như không chịu ảnh hưởng của chế độ thủy văn quanh vùng. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi.		

ĐT128-49	22°12'50.00"N – 103°14'47.60"E	*Kích thước:* L_r ~ 66 m, W_r ~ 14,0 m, H ~ 43 m, D_r ~ 3,1 m *Kiểu trượt:* Trượt hỗn hợp trong vỏ phong hóa. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng lưỡi dao, mặt trượt cong. *Thành phần thạch học:* Sét vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết lẫn nhiều đá vụn. *Điều kiện thủy văn:* khối trượt nằm giữa khe cạn, hiện trạng khô ráo. Nguy cơ trượt tiếp khi mùa mưa tới. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn.		
ĐT128-57	22°13'5.60"N – 103°14'37.10"E	*Kích thước:* L_r ~ 30,4 m, W_r ~ 25,6 m, H ~ 21 m, D_r ~ 1,5 m *Kiểu trượt:* Trượt phẳng trong vỏ phong hóa. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng vòng cung, mặt trượt phẳng. *Thành phần thạch học:* Sét vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết lẫn nhiều mảnh vụn. *Điều kiện thủy văn:* khối trượt nằm giữa khe cạn nhỏ, hiện trạng khô ráo. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn.		

ĐT128-60	22°13'11.70"N – 103°14'38.00"E	*Kích thước:* L_r ~ 59 m, W_r ~ 36 m, H ~ 32 m, D_r ~ 2,2 m *Kiểu trượt:* Trượt phẳng trong vỏ phong hóa. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng lưỡi dao, mặt trượt phẳng. *Thành phần thạch học:* Sét vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết lẫn nhiều mảnh vụn. *Điều kiện thủy văn:* hầu như không chịu ảnh hưởng của chế độ thủy văn quanh vùng. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn.		
ĐT128-62	22°13'21.80"N – 103°14'32.70"E	*Kích thước:* L_r ~ 48 m, W_r ~ 64,7 m, H ~ 32 m, D_r ~ 3,9 m. *Kiểu trượt:* Trượt xoay trong vỏ phong hóa. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng vòng cung, mặt trượt cong. *Thành phần thạch học:* Sét vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết lẫn nhiều mảnh vụn. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn.		

ĐT128-63	22°13'19.20"N – 103°14'37.60"E	*Kích thước:* L_r ~ 178 m, W_r ~ 81,7 m, H ~ 103,7 m, D_r ~ 11 m *Kiểu trượt:* Trượt xoay trong vỏ phong hóa dày. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng trên rộng dưới hẹp, mặt trượt cong. *Thành phần thạch học:* Sét vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết lẫn nhiều mảnh vụn. *Điều kiện thủy văn:* khối trượt nằm giữa khe cạn lớn, hiện trạng khô ráo. Tuy nhiên khi có mưa vị trí là nơi tập trung lưu lượng nước rất lớn. Khối trượt nguy cơ ngày càng mở rộng cả chiều rộng và sâu. *Thảm thực vật:* thảm thực vật xung quanh dày với nhiều cây bụi với cây thân gỗ lớn đan xen.		

ĐT128-67	22°13'51.48"N – 103°14'24.11"E	*Kích thước:* L_r ~ 35 m, W_r ~ 32,9 m, H ~ 23 m, D_r ~ 2,2 m. *Kiểu trượt:* Trượt xoay trong vỏ phong hóa trung bình. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng vòng cung, mặt trượt dạng bậc thang. *Thành phần thạch học:* Sét vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết lẫn nhiều mảnh vụn. *Điều kiện thủy văn:* hầu như không chịu ảnh hưởng của chế độ thủy văn quanh vùng. *Thảm thực vật:* thảm thực vật xung quanh dày với nhiều cây bụi với cây thân gỗ lớn đan xen.		
ĐT128-72	22°14'19.42"N – 103°14'10.30"E	*Kích thước:* L_r ~ 95 m, W_r ~ 124 m, H ~ 58 m, D_r ~ 7 m. *Kiểu trượt:* Trượt hỗn hợp trong vỏ phong hóa trung bình. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng vòng cung, mặt trượt dạng bậc thang. *Thành phần thạch học:* Sét vôi, đá phiến sét với vỏ phong hóa là sét bột kết lẫn nhiều mảnh vụn. *Điều kiện thủy văn:* hầu như không chịu ảnh hưởng của chế độ thủy văn quanh vùng. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn.		

ĐT128-73	22°14'28.20"N – 103°14'14.10"E	*Kích thước:* L_r ~ 81,1 m, W_r ~ 66 m, H ~ 53 m, D_r ~ 4,5 m. *Kiểu trượt:* Trượt hỗn hợp trong vỏ phong hóa trung bình. *Hình dạng khối trượt:* khối trượt có hình dạng vòng cung, mặt trượt cong. *Thành phần thạch học:* Sét vôi, sét vôi với vỏ phong hóa là cuội kết, cát kết. *Điều kiện thủy văn:* hầu như không chịu ảnh hưởng của chế độ thủy văn quanh vùng. *Thảm thực vật:* Lớp phủ thực vật xung quanh là cây bụi đan xen với cây thân gỗ lớn.		

PHỤ LỤC 4

Đặc điểm trượt đất đá tuyến ĐT128 đoạn Chăn Nưa - Sìn Hồ

TT	Ký hiệu điểm trượt	Ký hiệu hệ tầng	Thông số khối trượt					Độ dốc	Phân loại theo thể tích	Phân loại theo chiều cao	Phân loại theo độ dốc	Chiều sâu mặt trượt	Kiểu trượt	Hình dạng khối trượt	Hình thái mặt trượt
			H (m)	W_r (m)	L_r (m)	D_r (m)	V_r (m^3)								
1	ĐT128-01	ε_2?-O *bk*$_3$	4,5	3	6	1,1	10,36	28	M2	H1	D2	TĐN	trượt phẳng	trên rộng, dưới hẹp	mặt trượt phẳng
2	ĐT128-02	ε_2?-O *bk*$_2$	17	6	23	1,2	86,66	32	M2	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
3	ĐT128-03	ε_2?-O *bk*$_1$	22	30	25	2	785,00	31	M3	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
4	ĐT128-04	ε_2?-O *bk*$_2$	15,1	10	6	1,1	34,54	35	M2	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
5	ĐT128-05	ε_2?-O *bk*$_2$	10,1	20	15	2,5	392,50	23	M3	H3	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
6	ĐT128-06	ε_2?-O *bk*$_2$	30	3	35	1	54,95	36	M2	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
7	ĐT128-07	ε_2?-O *bk*$_1$	18	20	25	2	523,33	35	M3	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
8	ĐT128-08	ε_2?-O *bk*$_1$	16	4	4	1,05	8,79	32	M1	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
9	ĐT128-09	ε_2?-O *bk*$_1$	10,1	8	12	1,1	55,26	33	M2	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
10	ĐT128-10	ε_2?-O *bk*$_1$	10,1	5	15	1	39,25	34	M2	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
11	ĐT128-11	ε_2?-O *bk*$_1$	4	20	4	1	41,87	29	M2	H1	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
12	ĐT128-12	ε_2?-O *bk*$_1$	5,1	5	5	0,5	6,54	28	M1	H2	D2	trượt bề mặt	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng

13	ĐT128-13	ε_2?-O *bk*$_1$	6	20	10	1	104,67	29	M3	H2	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
14	ĐT128-14	ε_2?-O *bk*$_1$	42	38	59	6,5	7.626,54	35	M4	H3	D3	trượt sâu	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
15	ĐT128-15	ε_2?-O *bk*$_1$	18	32	23	1,6	616,28	41	M3	H3	D4	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
16	ĐT128-16	ε_2?-O *bk*$_1$	15,1	28	22,2	2,2	715,67	33	M3	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
17	ĐT128-17	ε_2?-O *bk*$_1$	5,1	1,5	5	1,1	4,32	28	M1	H2	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
18	ĐT128-18	ε_2?-O *bk*$_1$	10,1	7	12	1,6	70,34	31	M2	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
19	ĐT128-19	ε_2?-O *bk*$_1$	3,5	8	4	1,1	18,42	28	M2	H1	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
20	ĐT128-20	ε_2?-O *bk*$_1$	5,1	20	8	1,1	92,11	29	M2	H2	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
21	ĐT128-21	ε_2?-O *bk*$_1$	98	14	150	3	3.297,00	37	M4	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	Lưỡi dao	mặt trượt phẳng
22	ĐT128-22	ε_2?-O *bk*$_1$	19	46	23	3	1.661,06	38	M4	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
23	ĐT128-23	ε_2?-O *bk*$_1$	10,1	30	15	1,6	376,80	36	M3	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
24	ĐT128-24	ε_2?-O *bk*$_1$	7	10	10	2	104,67	39	M3	H2	D3	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
25	ĐT128-25	ε_2?-O *bk*$_1$	24	21,8	31,3	3,8	1.356,95	38	M4	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
26	ĐT128-26	ε_2?-O *bk*$_2$	12	10	17	2	177,93	32	M3	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
27	ĐT128-27	ε_2?-O *bk*$_2$	4	5	6	1	15,70	29	M2	H1	D2	TĐN	trượt phẳng	trên rộng, dưới hẹp	mặt trượt phẳng
28	ĐT128-28	ε_2?-O *bk*$_2$	4	4	5	1	10,47	28	M2	H1	D2	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng

29	ĐT128-29	ε_2?-O *bk*$_2$	11	10	17	2	177,93	25	M3	H3	D2	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
30	ĐT128-30	ε_2?-O *bk*$_2$	8	10	12	2	125,60	26	M3	H2	D2	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
31	ĐT128-31	ε_2?-O *bk*$_3$	13,7	21	16,8	1,6	295,41	47	M3	H3	D4	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
32	ĐT128-32	ε_2?-O *bk*$_3$	14,8	15	17,2	1,51	203,88	49	M3	H3	D4	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
33	ĐT128-33	ε_2?-O *bk*$_3$	6,46	8,27	7,35	1,1	34,99	57	M2	H2	D5	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
34	ĐT128-34	D$_1$ *np*	43	14	66	3,1	1.499,04	36	M4	H3	D3	TĐN	trượt hỗn hợp	Lưỡi dao	mặt trượt bậc thang
35	ĐT128-35	D$_1$ *np*	19,12	27,8	21,6	2,5	785,63	47	M3	H3	D4	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
36	ĐT128-36	S$_2$-D$_1$ *bh*	14,2	10,5	24,4	4,2	563,13	31	M3	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	Lưỡi dao	mặt trượt phẳng
37	ĐT128-37	S$_2$-D$_1$ *bh*	19,26	18,17	29,3	2,2	612,95	29	M3	H3	D2	TĐN	trượt phẳng	Trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
38	ĐT128-38	S$_2$-D$_1$ *bh*	5,1	10	5	1	26,17	29	M2	H2	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
39	ĐT128-39	S$_2$-D$_1$ *bh*	4	8	5	1	20,93	28	M2	H1	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
40	ĐT128-40	S$_2$-D$_1$ *bh*	9,5	10	11,4	1	59,66	52	M2	H2	D5	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
41	ĐT128-41	S$_2$-D$_1$ *bh*	23	19,2	34	1,21	413,37	34	M3	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
42	ĐT128-42	S$_2$-D$_1$ *bh*	7	10	10,65	1,1	61,31	31	M2	H2	D3	TĐN	trượt phẳng	Trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
43	ĐT128-43	S$_2$-D$_1$ *bh*	8	9,46	10,5	1,2	62,38	32	M2	H2	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
44	ĐT128-44	S$_2$-D$_1$ *bh*	15,1	30	25	1,5	588,75	32	M3	H3	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
45	ĐT128-45	S$_2$-D$_1$ *bh*	9,2	19,6	13	1	133,35	39	M3	H2	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng

46	ĐT128-46	S_2-D_1 *bh*	3	1	4	0,5	1,05	25	M1	H1	D2	trượt bề mặt	trượt phẳng	trên rộng, dưới hẹp	mặt trượt phẳng
47	ĐT128-47	S_2-D_1 *bh*	14	35,3	20	3,2	1.182,31	33	M4	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
48	ĐT128-48	S_2-D_1 *bh*	21	43,7	27	2	1.234,96	42	M4	H3	D4	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
49	ĐT128-49	S_2-D_1 *bh*	70	18,3	163	4,8	7.493,04	21	M4	H3	D2	TĐN	trượt xoay	Lưỡi dao	mặt trượt cong
50	ĐT128-50	S_2-D_1 *bh*	15,1	50	25	1	654,17	35	M3	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
51	ĐT128-51	S_2-D_1 *bh*	10,1	50	15	1	392,50	32	M3	H3	D3	TĐN	trượt xoay	trên rộng, dưới hẹp	mặt trượt cong
52	ĐT128-52	S_2-D_1 *bh*	8,7	15,6	12,5	1,2	122,46	41	M3	H2	D4	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
53	ĐT128-53	S_2-D_1 *bh*	5,1	15	10	1,5	117,75	23	M3	H2	D2	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
54	ĐT128-54	S_2-D_1 *bh*	9,5	16,3	13,5	1,3	149,71	24	M3	H2	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
55	ĐT128-55	S_2-D_1 *bh*	4	18	7	1,2	79,13	25	M2	H1	D2	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
56	ĐT128-56	S_2-D_1 *bh*	21,9	18,9	28,9	2,9	828,96	36	M3	H3	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
57	ĐT128-57	S_2-D_1 *bh*	21	25,6	30,4	1,5	610,92	39	M3	H3	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
58	ĐT128-58	S_2-D_1 *bh*	11,2	14	15,8	2,5	289,40	34	M3	H3	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
59	ĐT128-59	S_2-D_1 *bh*	7	12	12	1,5	113,04	35	M3	H2	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
60	ĐT128-60	S_2-D_1 *bh*	32	36	59	2,2	2.445,43	29	M4	H3	D2	TĐN	trượt phẳng	Lưỡi dao	mặt trượt phẳng
61	ĐT128-61	S_2-D_1 *bh*	30	10	45	3,5	824,25	28	M3	H3	D2	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
62	ĐT128-62	S_2-D_1 *bh*	32	64,7	48	3,9	6.338,53	32	M4	H3	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong

63	ĐT128-63	S_2-D_1 *bh*	103,7	81,7	178	11	83.716,90	33	M5	H3	D3	trượt sâu	trượt xoay	trên rộng, dưới hẹp	mặt trượt cong
64	ĐT128-64	S_2-D_1 *bh*	12,14	8,1	18,8	2	159,39	38	M3	H3	D3	TĐN	trượt xoay	Lưỡi dao	mặt trượt cong
65	ĐT128-65	S_2-D_1 *bh*	8,6	40	15	1,6	502,40	36	M3	H2	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
66	ĐT128-66	S_2-D_1 *bh*	9,4	32,8	15,2	1,1	287,00	34	M3	H2	D3	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
67	ĐT128-67	S_2-D_1 *bh*	23	32,9	35	2,2	1.325,76	35	M4	H3	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
68	ĐT128-68	S_2-D_1 *bh*	38	62	54	2,8	4.905,94	38	M4	H3	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
69	ĐT128-69	S_2-D_1 *bh*	11	48	15	1,1	414,48	41	M3	H3	D4	TĐN	trượt phẳng	vòng cung	mặt trượt phẳng
70	ĐT128-70	S_2-D_1 *bh*	10,1	15	15	1,2	141,30	39	M3	H3	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
71	ĐT128-71	S_2-D_1 *bh*	5,1	3	8	1	12,56	39	M2	H2	D3	TĐN	trượt phẳng	trên hẹp, dưới rộng	mặt trượt phẳng
72	ĐT128-72	S_2-D_1 *bh*	58	124	95	7	43.154,07	33	M5	H3	D3	trượt sâu	trượt hỗn hợp	vòng cung	mặt trượt bậc thang
73	ĐT128-73	D_1 *np*	53	66	81,1	4,5	12.605,37	32	M5	H3	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong
74	ĐT128-74	D_1 *np*	19	19,2	30	2,5	753,60	31	M3	H3	D3	TĐN	trượt xoay	vòng cung	mặt trượt cong

PHỤ LỤC 5

Kết quả xác định một số chỉ tiêu vật lý của đất khu vực nghiên cứu điển hình

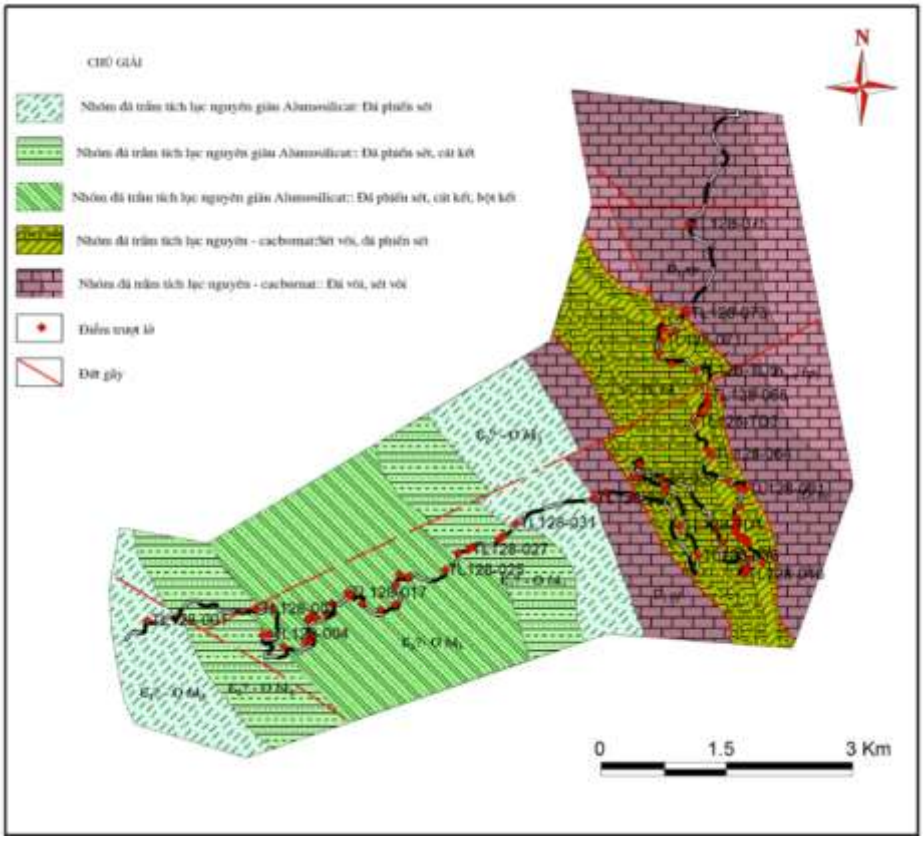
(Thí nghiệm tại Trung tâm thí nghiệm và kiểm định xây dựng Việt Delta (LAS 595))

Số thứ tự	Số hiệu mẫu thí nghiệm	Thành phần hạt												Tính chất cơ lý của đất						Thí nghiệm cắt phẳng trực tiếp		Hệ tầng	Mô tả đất
		Sỏi sạn				Hạt cát				Hạt bụi			Hạt sét										
		> 20,0	20,0-10,0	10,0-5,0	5,0-2,0	2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	0,25-0,08	0,08 - 0,06	0,06 - 0,01	0,01 - 0,002	< 0,002	Độ ẩm tự nhiên W (%)	Khối lượng riêng ρ (g/cm^3)	Giới hạn chảy W_L	Giới hạn dẻo W_P	Chỉ số dẻo I_P	Độ sệt I_L	Lực dính kết c (kG/cm^2)	Góc ma sát trong φ (độ)		
1	ĐT128-01	5,0	7,8	9,2	6,0	4,3	2,1	2,6	4,6	5,2	15,4	13,2	14,6	10,63	2,73	40,98	21,10	19,88	-0,53			ε_2?-O bk_3	Sét nâu xám, lẫn PHS cứng
2	ĐT128-05	6,9	7,5	5,6	5,1	4,3	3,2	2,7	3,4	17,8	17,8	12,9	12,8	6,66	2,72	32,99	17,72	15,27	-0,72			ε_2?-O bk_2	Sét pha xám vàng, lẫn PHS, cứng
3	ĐT128-06	4,3	5,2	4,3	3,5	1,5	2,1	5,5	6,6	14,2	22,0	15,6	15,2	12,18	2,71	39,53	22,84	16,69	-0,64			ε_2?-O bk_2	Sét pha nâu xám, lẫn PHS, cứng
4	ĐT128-07		7,3	6,5	5,0	4,1	1,5	3,2	3,9	10,3	17,4	19,3	21,5	19,97	2,74	46,20	23,98	22,22	-0,18			ε_2?-O bk_1	Sét xám vàng, lẫn PHS, cứng
5	ĐT128-11		3,5	2,9	4,6	2,1	1,5	3,6	5,3	8,8	21,8	24,5	21,4	14,95	2,73	47,75	24,82	22,93	-0,43			ε_2?-O bk_1	Sét nâu đỏ, lẫn PHS, cứng
6	ĐT128-15	6,9	6,1	8,6	9,6	4,3	2,3	3,3	4,5	10,9	14,5	13,0	16,0	14,54	2,72	39,13	20,63	18,50	-0,33			ε_2?-O bk_1	Sét nâu đỏ, lẫn PHS, cứng
7	ĐT128-18	7,7	5,0	5,6	8,3	2,3	1,5	2,9	4,2	3,5	21,1	18,3	19,6	20,56	2,71	47,57	24,37	23,20	-0,16			ε_2?-O bk_1	Sét xám vàng, nâu vàng, lẫn PHS, cứng
8	ĐT128-22	7,2	5,5	4,3	3,2	2,1	1,5	3,6	5,2	13,5	17,1	17,0	19,8	11,35	2,73	37,87	19,92	17,95	-0,48	0,05	35	ε_2?-O bk_1	Sét xám vàng, nâu vàng, lẫn PHS, cứng
9	ĐT128-24		2,6	4,1	3,3	1,2	1,9	3,8	7,0	6,0	23,9	23,0	23,2	13,64	2,74	45,61	24,56	21,05	-0,52			ε_2?-O bk_1	Sét xám vàng, nâu vàng, lẫn PHS, cứng
10	ĐT128-26		5,5	6,7	6,1	2,4	1,6	3,7	5,0	10,4	18,1	16,1	24,4	14,92	2,72	45,77	24,60	21,17	-0,46			ε_2?-O bk_2	Sét xám vàng, nâu vàng, lẫn PHS, cứng
11	ĐT128-28	6,0	5,4	4,2	5,0	4,3	2,3	4,0	6,8	14,9	20,5	14,6	12,0	6,27	2,75	32,99	18,96	14,03	-0,90			ε_2?-O bk_2	Sét pha xám vàng, nâu vàng, lẫn PHS, cứng
12	ĐT128-30	9,1	5,3	10,0	5,6	4,3	2,1	3,1	4,0	13,7	18,0	12,4	12,4	7,26	2,71	33,52	18,42	15,10	-0,74			ε_2?-O bk_2	Sét pha nâu đỏ, nâu vàng, lẫn PHS, cứng
13	ĐT128-31	2,7	4,6	3,1	5,3	4,0	1,6	5,1	6,7	5,7	23,1	15,3	16,8	13,16	2,72	40,54	21,58	18,96	-0,44			ε_2?-O bk_3	Sét nâu đỏ, nâu vàng, lẫn PHS, cứng

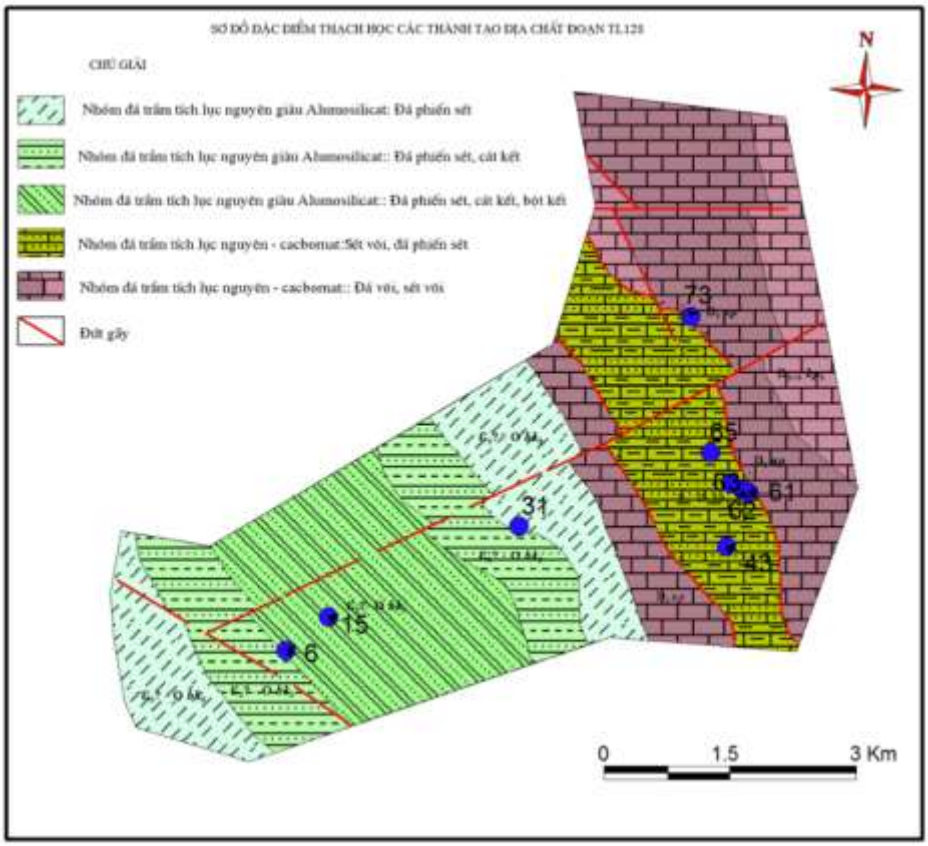
14	ĐT128-32	9,0	7,9	9,3	5,1	2,5	2,6	2,6	3,8	9,7	13,6	17,3	16,6	11,46	2,74	40,03	21,27	18,76	-0,52			ε_2?-O *bk*$_3$	Sét nâu đỏ, nâu vàng, lẫn PHS, cứng
15	ĐT128-34	7,4	7,2	7,7	8,9	2,8	1,4	3,9	5,6	2,4	18,1	15,8	18,8	23,97	2,73	48,01	27,45	20,56	-0,17			D$_1$ *np*	Sét xám vàng, lẫn PHS, cứng
16	ĐT128-36	5,4	6,1	6,9	5,2	1,4	2,0	4,3	5,9	13,6	21,6	14,0	13,6	4,02	2,72	34,51	19,23	15,28	-1,00			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét pha nâu xám, xám vàng, lẫn PHS, cứng
17	ĐT128-37	7,5	5,4	8,3	8,8	2,3	1,2	3,0	5,7	8,7	16,7	16,7	15,7	6,28	2,71	38,99	20,31	18,68	-0,75	0,05	34	S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét xám vàng, lẫn PHS, cứng
18	ĐT128-40				2,6	1,5	2,1	5,2	6,4	1,0	21,2	24,1	35,9	31,63	2,74	59,78	32,10	27,68	-0,02			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét nâu đỏ, nâu gụ, lẫn sạn, cứng
19	ĐT128-43				5,6	2,6	1,8	4,3	6,8	1,0	21,1	18,8	38,0	31,95	2,73	58,66	30,42	28,24	-0,05			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét nâu đỏ, nâu gụ, lẫn sạn, cứng
20	ĐT128-53	4,6	2,5	7,3	12,2	3,4	2,9	3,4	5,5	11,2	15,7	13,8	17,5	13,87	2,71	38,54	20,83	17,71	-0,39			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét xám vàng, lẫn sạn, cứng
21	ĐT128-57	4,6	7,2	6,1	5,5	4,3	3,6	5,7	8,0	5,5	16,6	12,8	20,1	6,74	2,72	39,77	21,78	17,99	-0,84			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét xám vàng, lẫn sạn, cứng
22	ĐT128-60	2,6	3,0	4,3	3,5	2,1	1,6	4,3	7,3	7,4	16,2	17,2	30,5	25,44	2,70	48,89	25,44	23,45	0,00	0,1	26	S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét nâu gụ, lẫn sạn, cứng
23	ĐT128-61	2,5	4,1	3,6	2,5	1,3	2,0	7,0	9,2	16,4	19,4	16,2	15,8	17,08	2,72	36,30	19,68	16,62	-0,16			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét pha nâu xám, xám vàng, lẫn PHS, cứng
24	ĐT128-63	4,3	3,6	5,2	4,3	4,6	5,2	5,6	8,7	10,0	20,3	14,1	14,1	7,86	2,73	33,43	18,00	15,43	-0,66			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét pha nâu xám, xám vàng, lẫn PHS, cứng
25	ĐT128-65	2,1	3,3	2,5	4,1	2,1	1,6	6,0	8,6	11,5	18,4	17,0	22,8	16,62	2,71	40,50	21,46	19,04	-0,25			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét nâu vàng, xám vàng, lẫn PHS, cứng
26	ĐT128-66		4,5	3,3	2,8	5,0	1,4	4,5	6,6	15,6	15,7	19,9	20,7	6,13	2,72	39,86	20,91	18,95	-0,78			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét nâu vàng, xám vàng, lẫn PHS, cứng
27	ĐT128-67	3,5	2,6	5,0	2,4	2,0	1,6	6,5	8,8	9,0	15,5	17,0	26,1	17,59	2,73	39,08	21,43	17,65	-0,22			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét nâu xám, xám vàng, lẫn PHS, cứng
28	ĐT128-68	3,6	5,2	4,7	3,5	2,9	4,3	6,3	7,8	16,0	18,2	16,9	10,6	8,28	2,72	24,93	13,67	11,26	-0,48			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét pha nâu xám, xám vàng, lẫn PHS, cứng
29	ĐT128-70	2,7	4,3	5,0	2,8	1,6	2,1	5,1	6,9	14,6	23,7	15,8	15,4	20,19	2,74	41,85	25,00	16,85	-0,29			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét pha nâu xám, xám vàng, lẫn PHS, cứng
30	ĐT128-71		4,5	6,3	7,4	2,6	3,2	6,3	9,8	9,6	20,6	14,7	15,0	18,58	2,73	35,82	19,91	15,91	-0,08			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét pha nâu xám, xám vàng, lẫn PHS, cứng
31	ĐT128-72	4,3	3,2	2,5	4,6	3,5	2,0	6,9	8,0	14,6	20,4	17,2	12,8	13,02	2,72	28,09	15,59	12,50	-0,21			S$_2$-D$_1$ *bh*	Sét pha xám vàng, nâu xám, lẫn PHS, cứng
32	ĐT128-73	3,3	2,5	4,3	3,6	2,5	3,1	5,7	8,3	17,6	20,6	17,8	10,7	2,85	2,74	27,60	16,26	11,34	-1,18			D$_1$ *np*	Sét pha xám ghi, xám xanh, lẫn sạn, cứng

PHỤ LỤC 6

Sơ đồ địa chất dọc tuyến nghiên cứu tỷ lệ 1:20.000



Hình PL6.1. Sơ đồ địa chất dọc tuyến nghiên cứu tỷ lệ 1:20.000

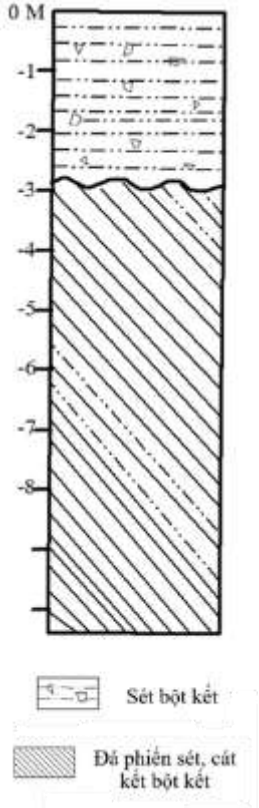


Hình PL6.2. Vị trí các điểm xác định mặt cắt địa chất

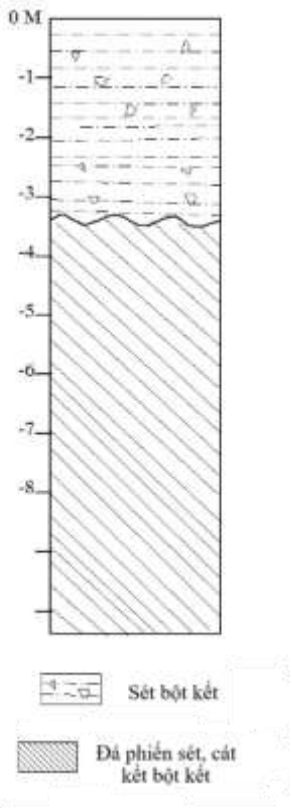
PHỤ LỤC 7

Mặt cắt địa chất điển hình tầng phủ các vị trí nghiên cứu chi tiết

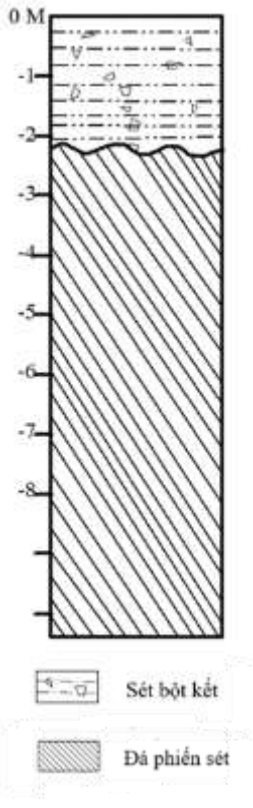
ĐT128-06



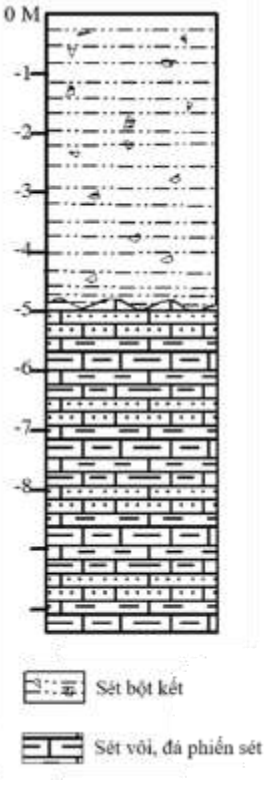
ĐT128-15



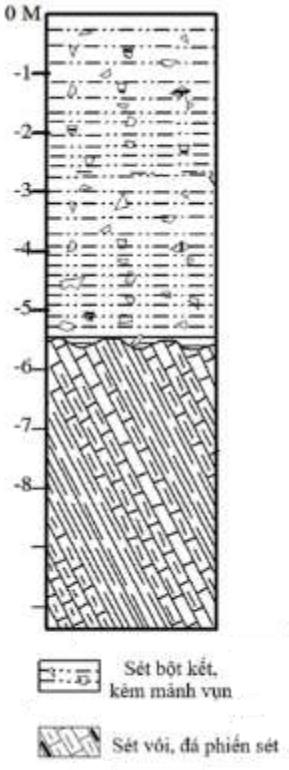
ĐT128-31



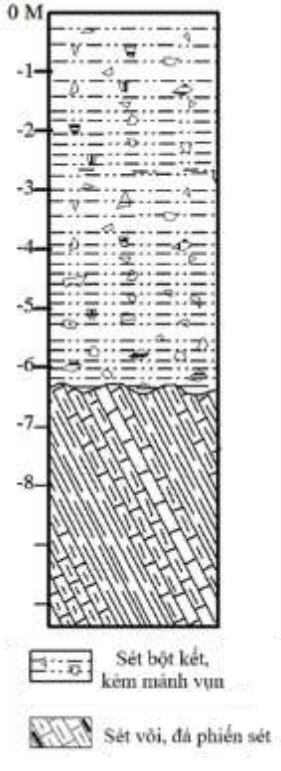
ĐT128-43



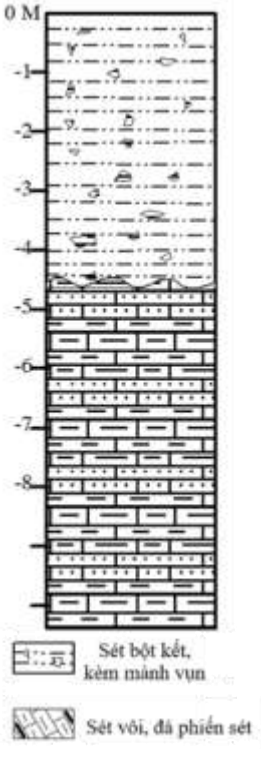
ĐT128-61



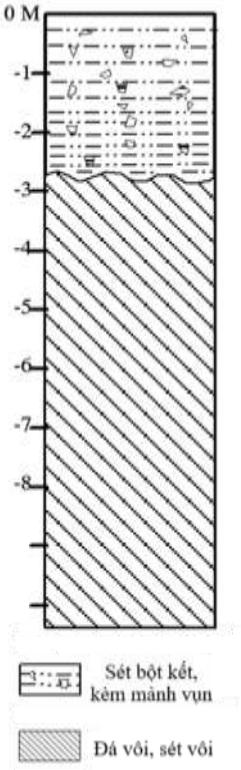
ĐT128-62



ĐT128-65



ĐT128-73



PHỤ LỤC 8

Kết quả phân tích thành phần hóa học mẫu đất nghiên cứu điển hình

(Thí nghiệm tại Viện Địa chất, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam)

TT	Chỉ tiêu phân tích	Hàm lượng (%)					
		ĐT128-06	**ĐT128-15**	**ĐT128-43**	**ĐT128-65**	**ĐT128-73**	**ĐT128-31**
1	SiO_2	57,98	54,53	44,52	54,53	61,81	55,71
2	TiO_2	0,81	0,93	0,88	0,92	0,93	0,86
3	Al_2O_3	19,81	21,99	23,53	21,67	20,40	22,87
4	T-Fe_2O_3	8,38	8,84	10,23	7,66	5,91	7,56
5	MnO	0,26	0,24	0,11	0,06	0,04	0,05
6	MgO	1,39	1,72	3,24	2,45	0,94	1,15
7	CaO	0,53	0,54	0,94	0,69	0,64	0,61
8	Na_2O	0,92	0,84	0,99	0,89	1,24	0,84
9	K_2O	3,40	3,57	6,59	4,72	4,35	4,06
10	P_2O_5	0,09	0,08	0,06	0,08	0,06	0,07
11	SO_3	<0,01	<0,01	<0,01	0,12	<0,01	<0,01
12	ZrO_2	<0,01	<0,01	<0,01	0,10	<0,01	<0,01
13	Nd_2O_3	<0,01	0,09	0,09	<0,01	<0,01	<0,01
14	MKN	6,34	6,54	8,73	6,05	3,60	6,13

Ký hiệu: MKN: Mất khi nung (950^oC). T-Fe_2O_3: Tổng sắt quy về Fe_2O_3

PHỤ LỤC 9

Kết quả xác định thành phần khoáng vật mẫu đất nghiên cứu điển hình

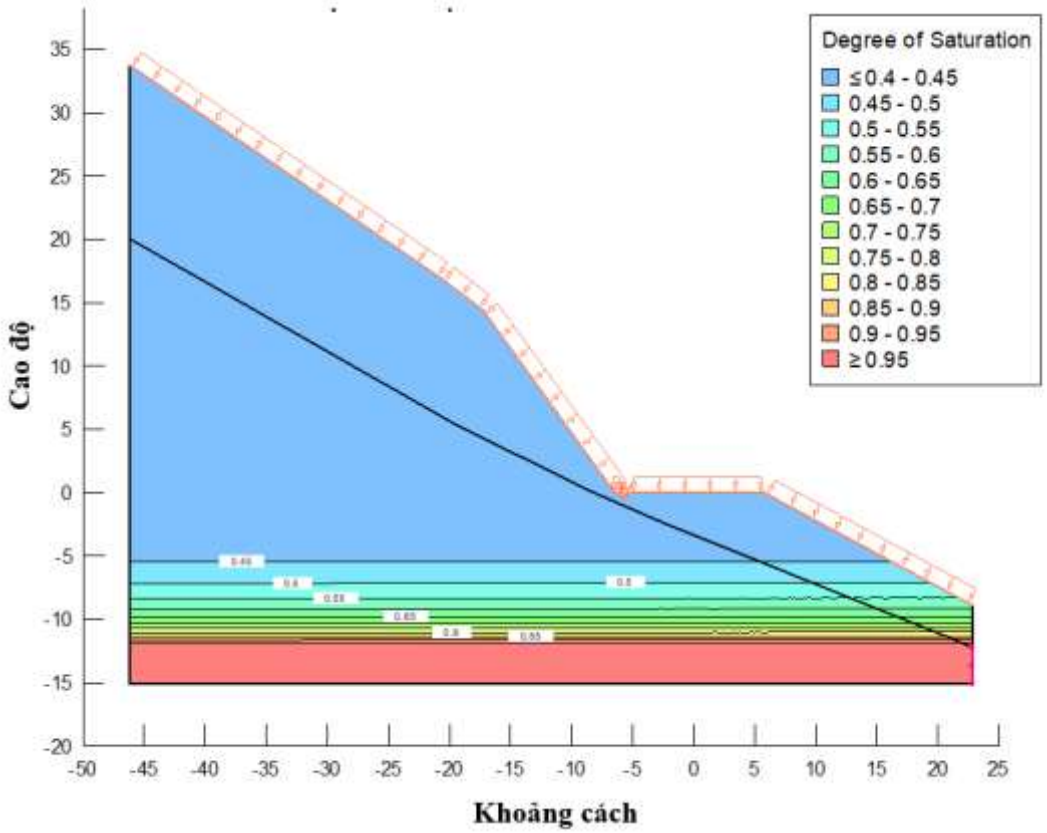
(Thí nghiệm tại Viện Địa chất, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam)

Thành phần khoáng vật và hàm lượng bán định lượng (~%)	**Ký hiệu mẫu**					
	ĐT128-06	**ĐT128-15**	**ĐT128-43**	**ĐT128-65**	**ĐT128-73**	**ĐT128-31**
Thạch anh	30	30	20	35	36	19
Mica (Muscovit+ Illit+ Phlogophit)	43	52	55	50	57	65
Kaolinit	15	17	5	6	5	13
Feldspar	2	0	6	0	0	0
Amphibol	<1	0	0	0	0	0
Clinochlor	0	0	3	3	0	0
Sepiolit	4	0	0	0	0	0
Goethit	4	0	6	4	1	2
Hemait	1	1	0	1	0	1
Rutil	0	0	0	1	1	0
Gibbsit	0	0	5	0	0	0

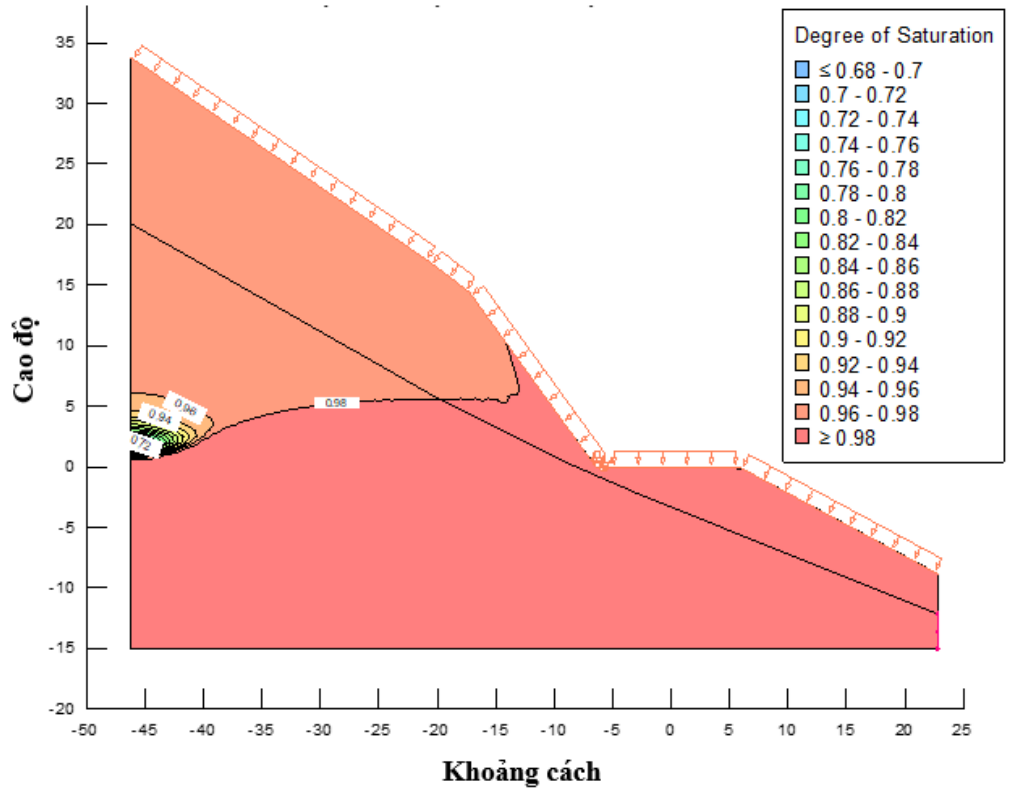
PHỤ LỤC 10

Kết quả phân tích ổn định mái dốc bằng mô hình số

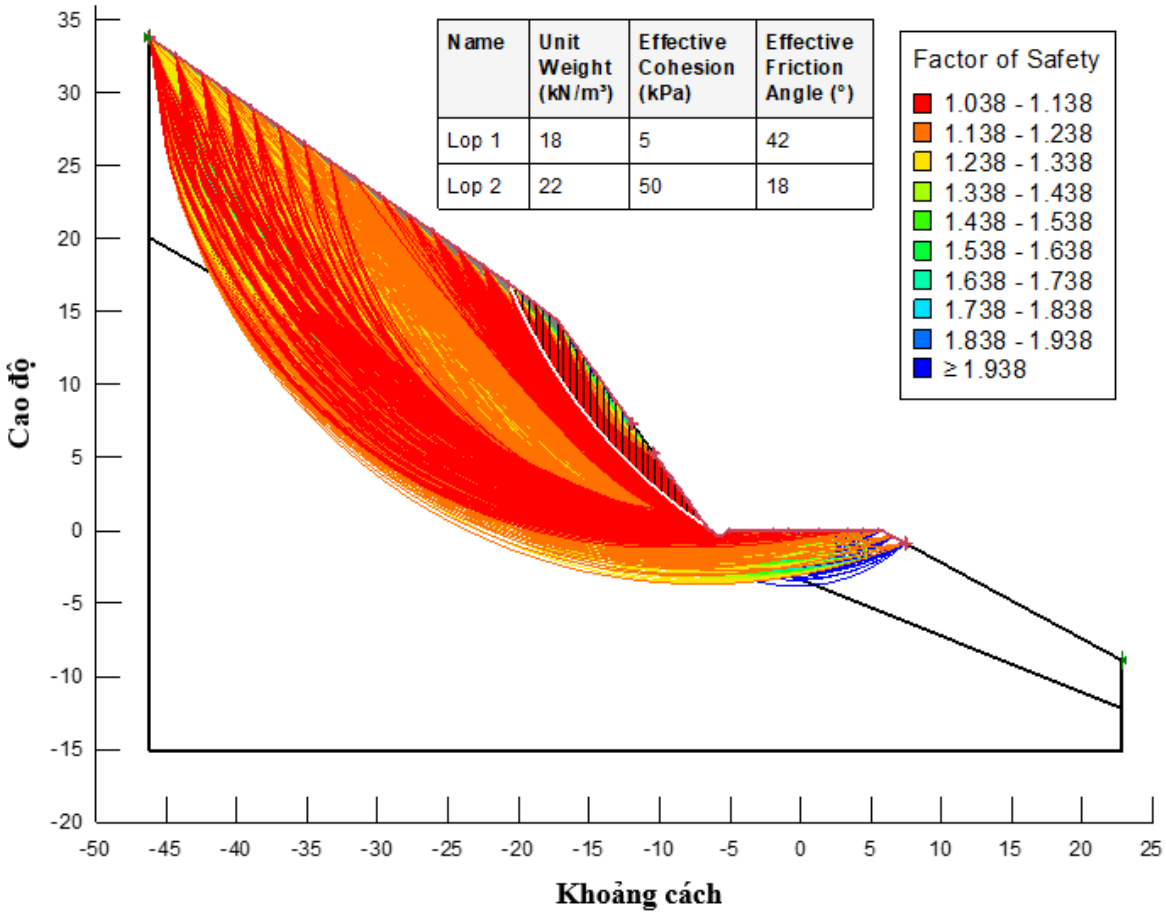
- Mặt cắt tại vị trí ĐT128-22



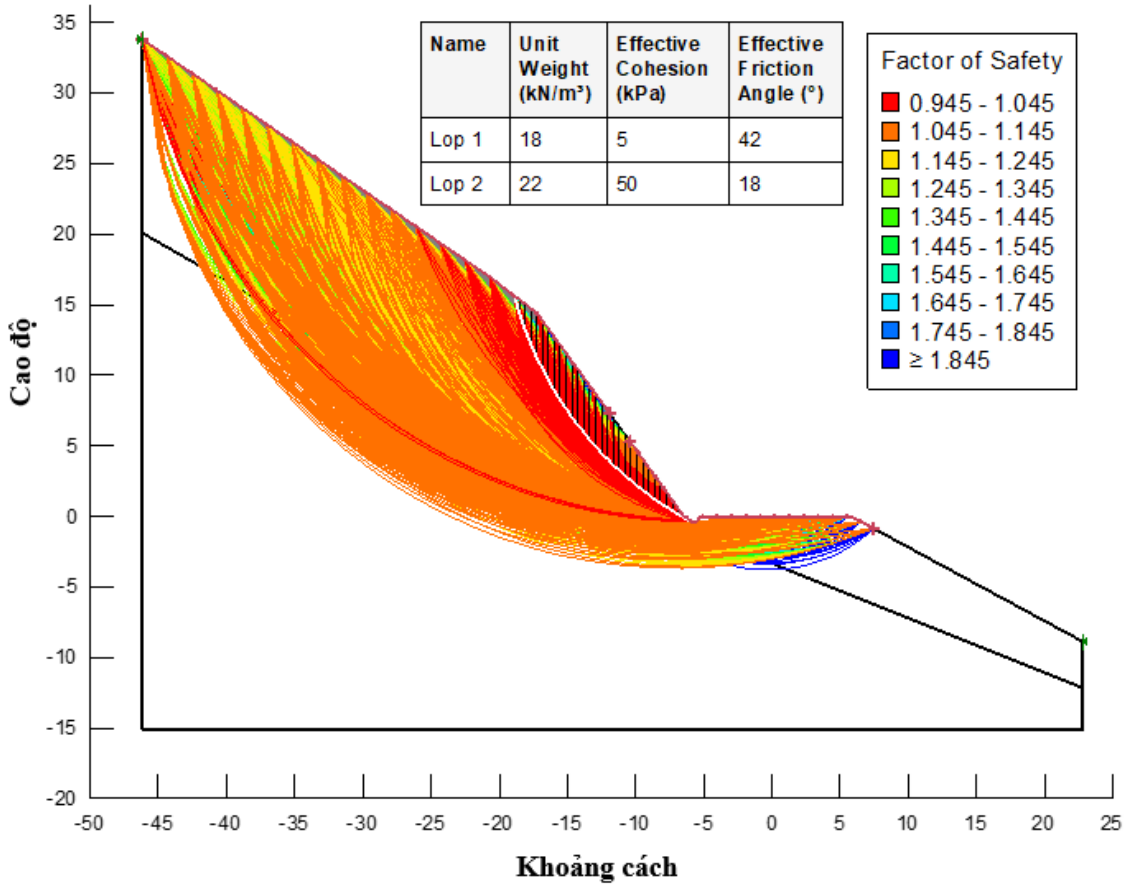
Hình PL10.1. Độ bão hòa tại thời điểm ban đầu trước chuỗi mưa



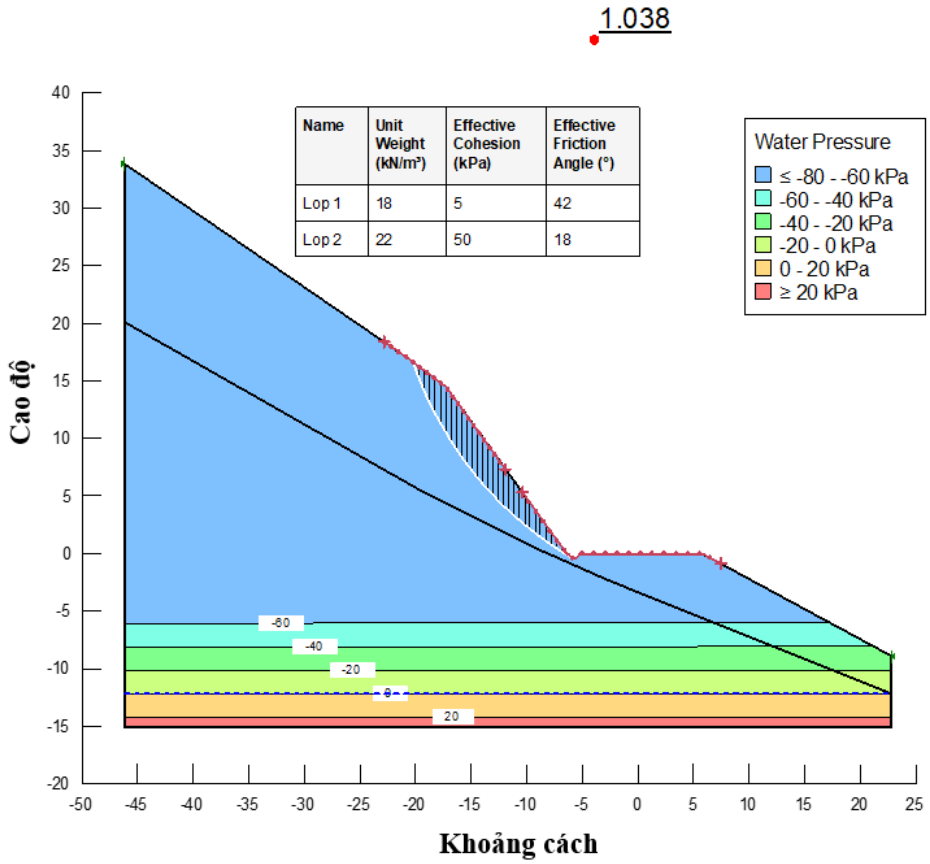
Hình PL10.2. Độ bão hòa tại thời điểm sau chuỗi mưa



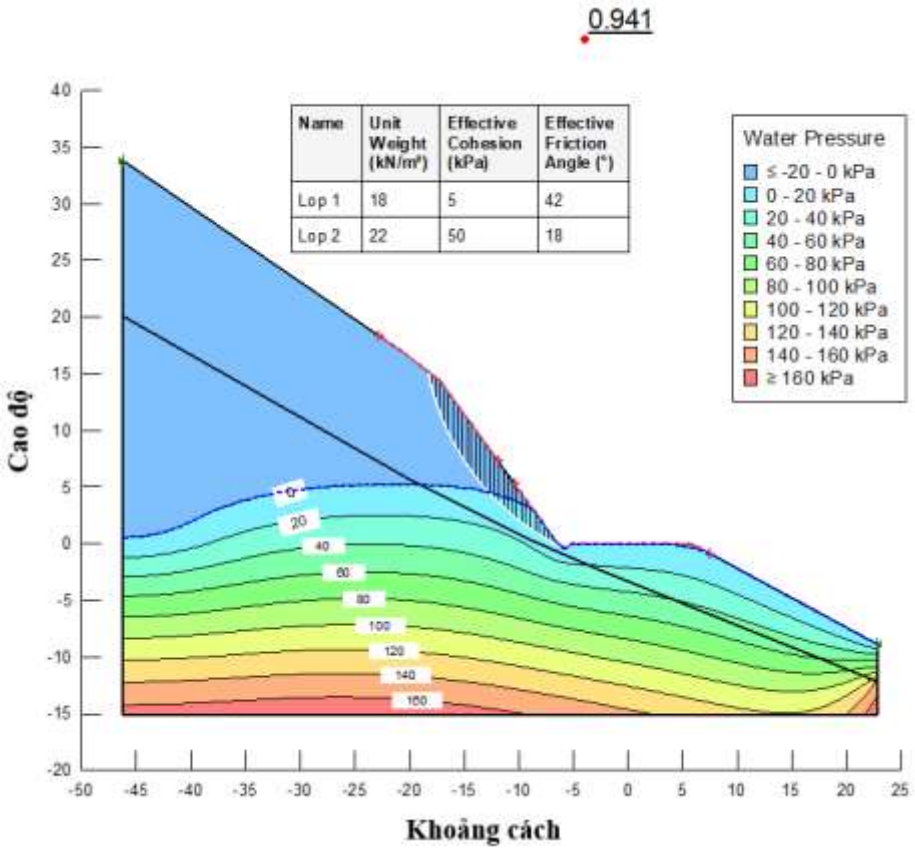
Hình PL10.3. Safety map thời điểm ban đầu trước chuỗi mưa



Hình PL10.4. Safety map thời điểm sau chuỗi mưa

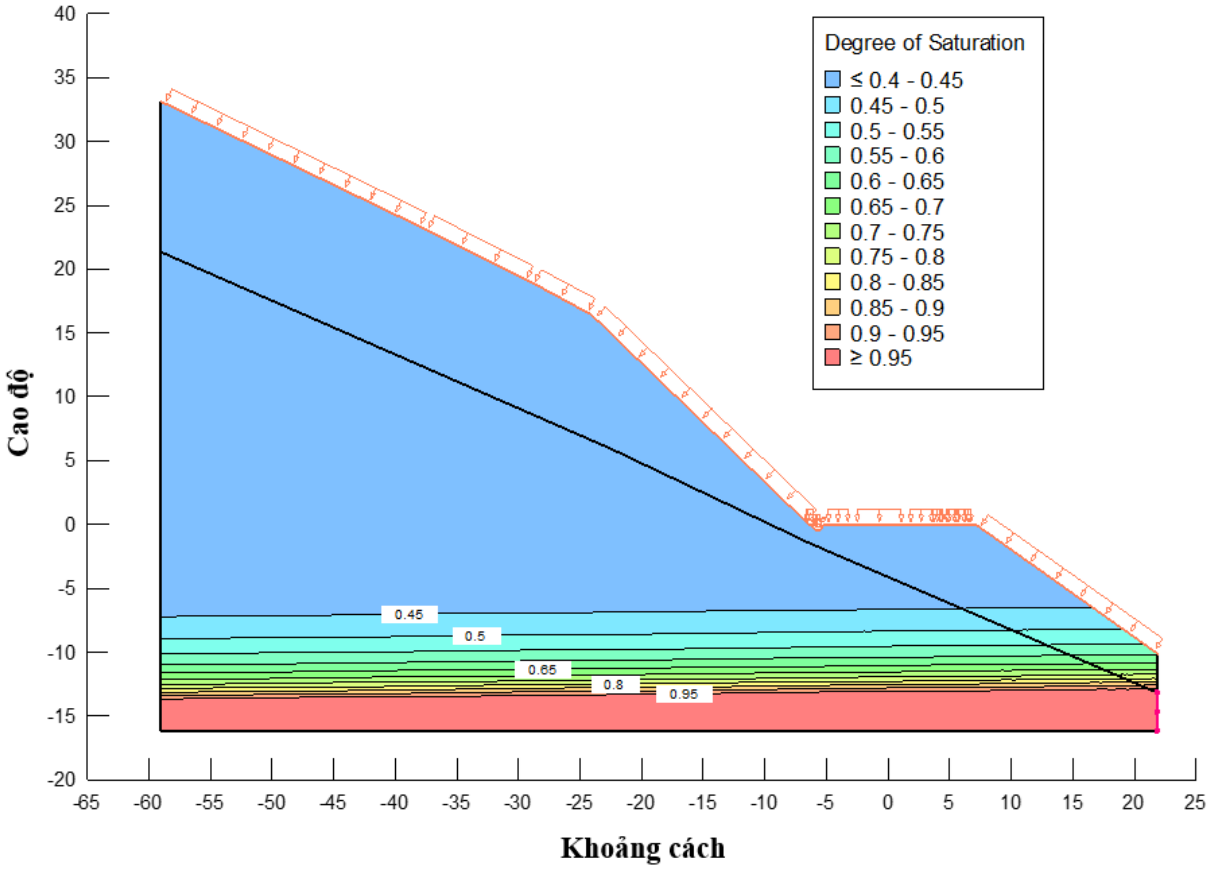


Hình PL10.5. Hệ số ổn định ở điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa, FS = 1,038

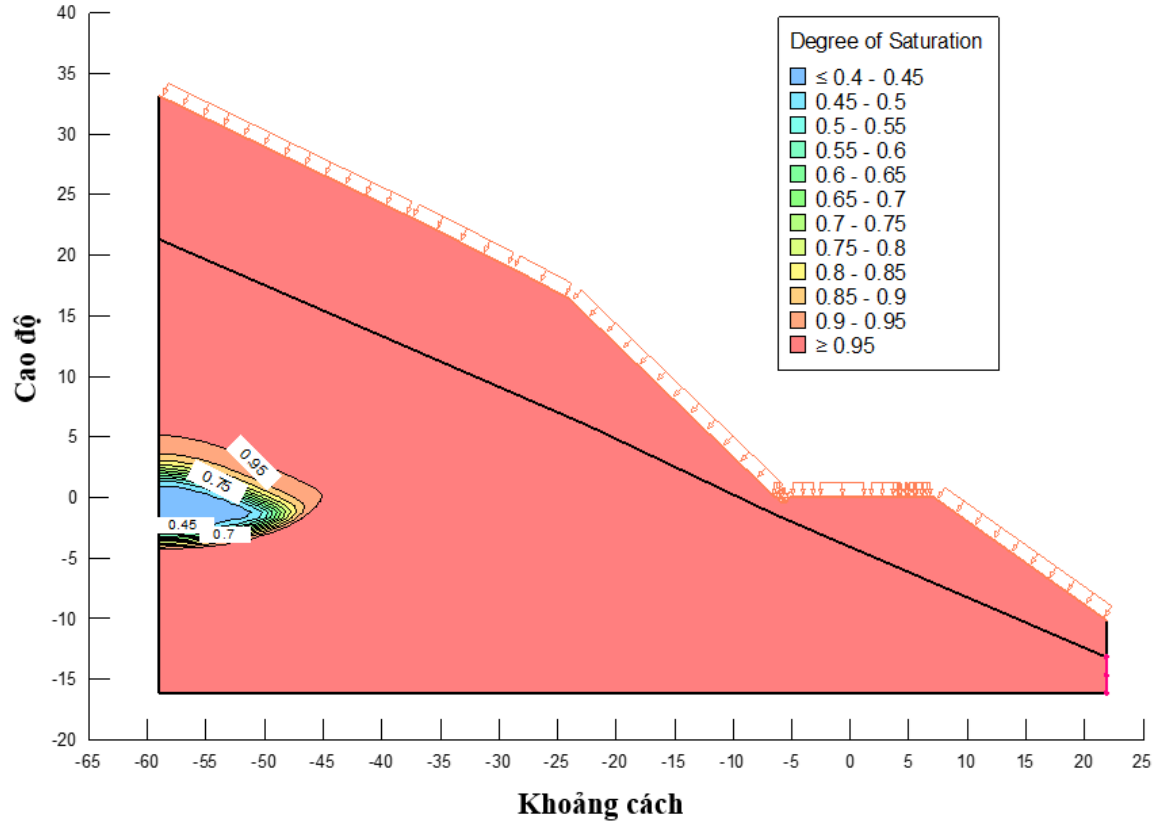


Hình PL10.6. Hệ số ổn định ở điều kiện sau chuỗi mưa, FS = 0,941

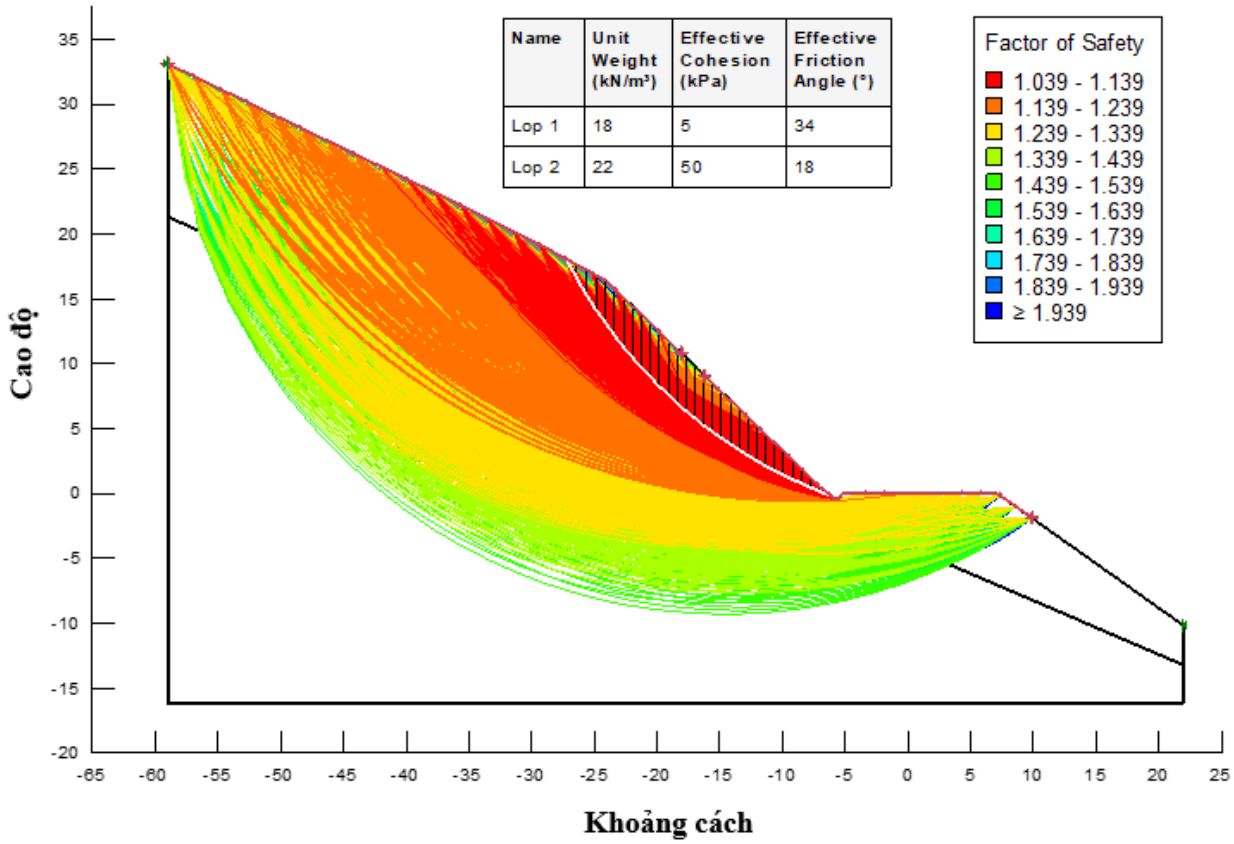
Mặt cắt tại vị trí ĐT128-37



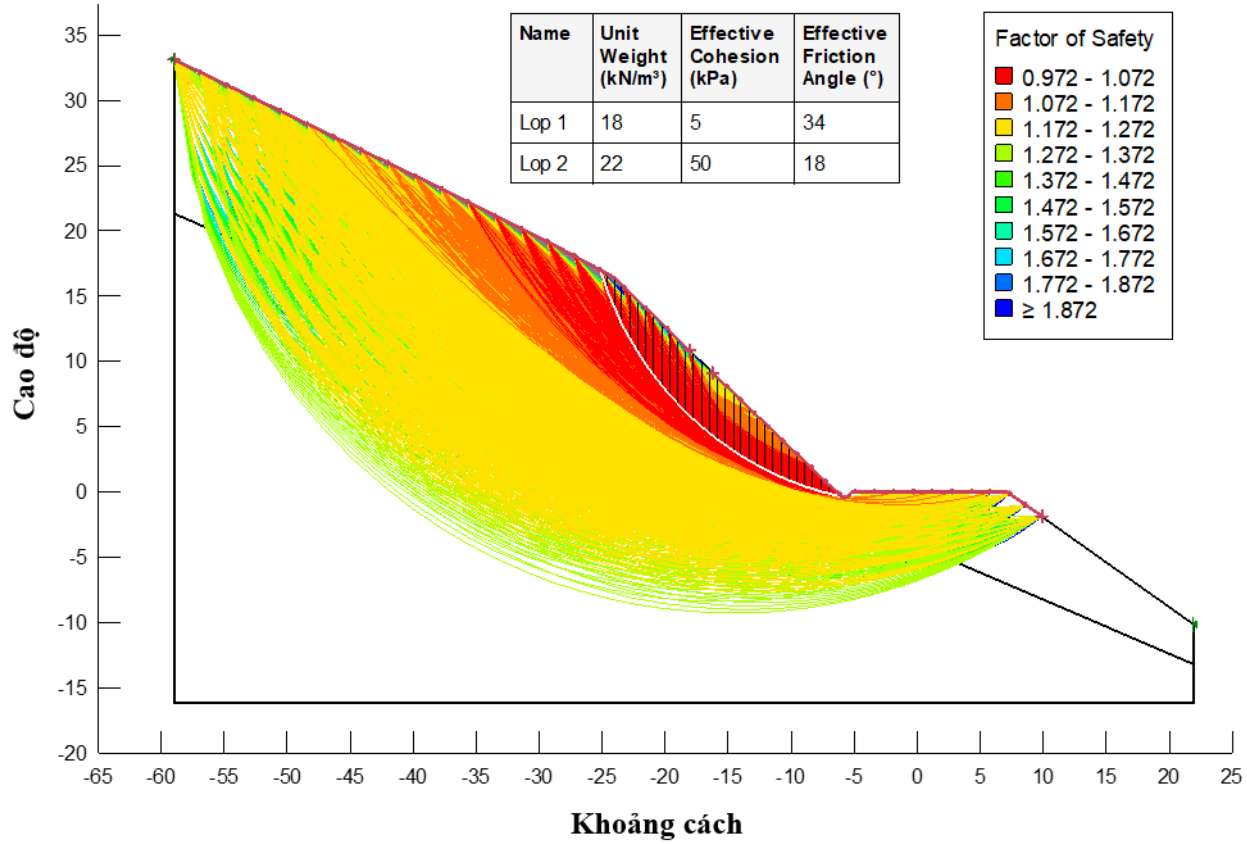
Hình PL10.7. Độ bão hòa ở thời điểm ban đầu trước chuỗi mưa



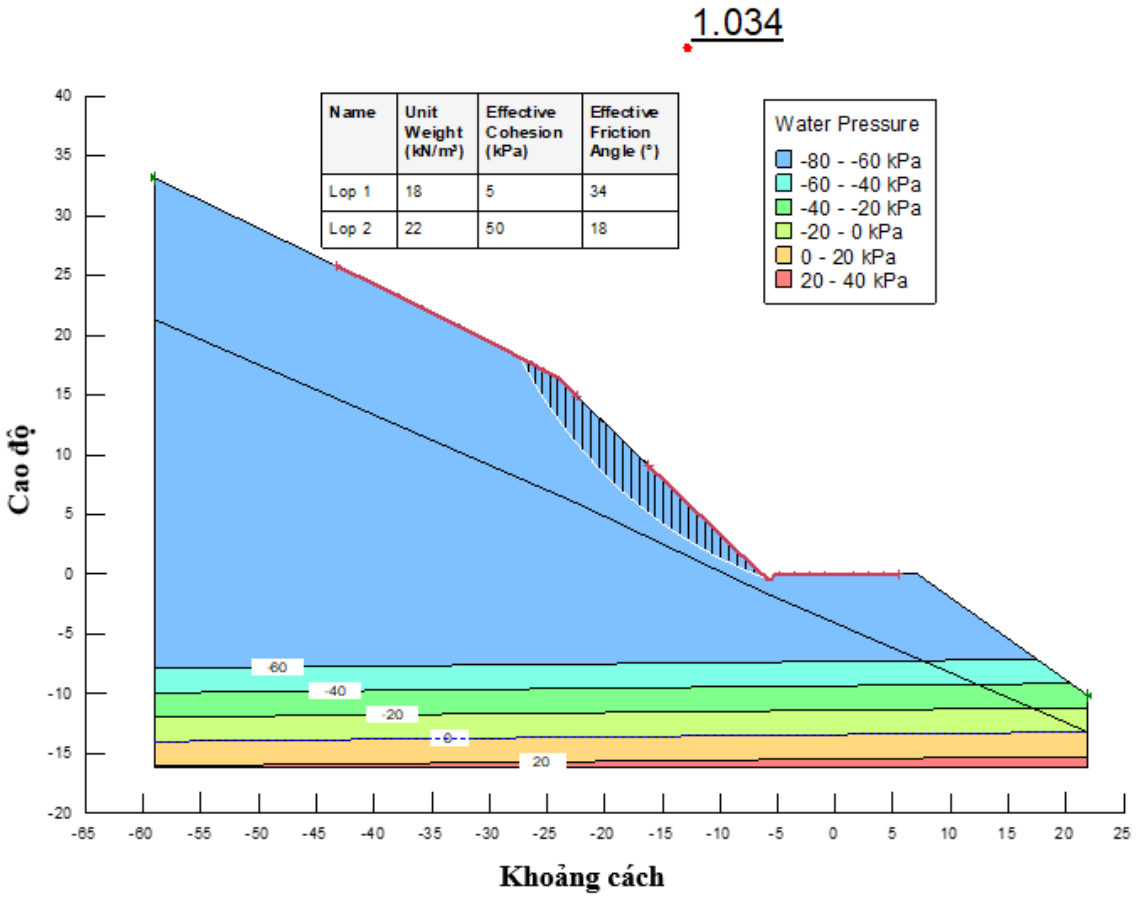
Hình PL10.8. Độ bão hòa thời điểm sau chuỗi mưa



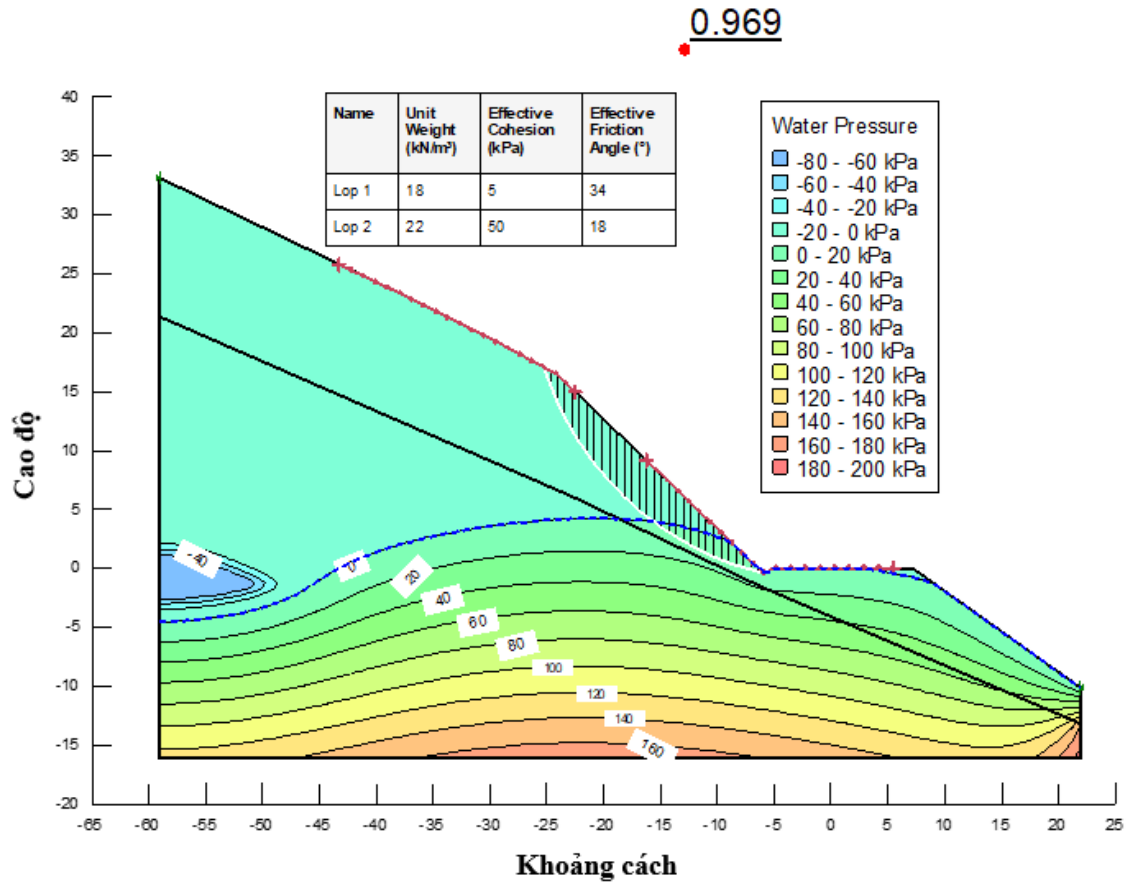
Hình PL10.9. Safety map thời điểm ban đầu trước chuỗi mưa



Hình PL10.10. Safety map thời điểm sau chuỗi mưa

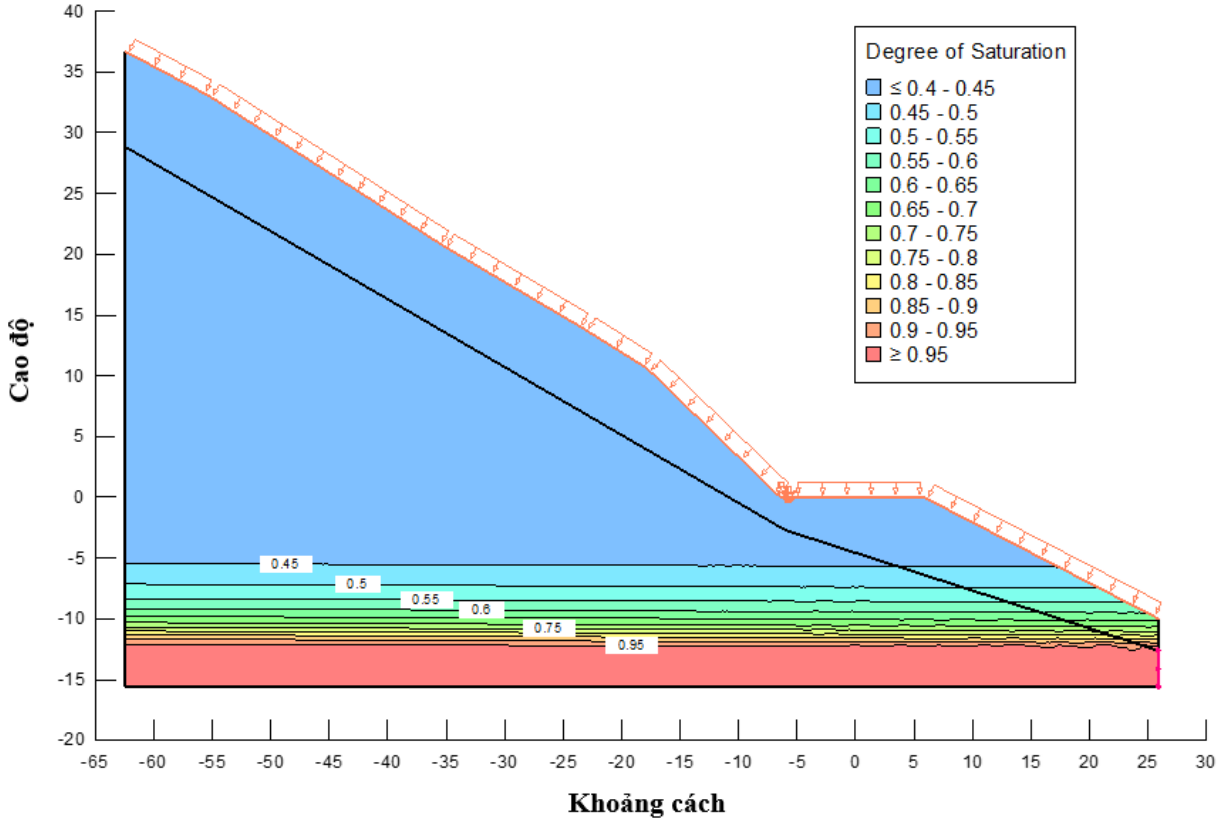


Hình PL10.11. Hệ số ổn định ở điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa, FS=1,034

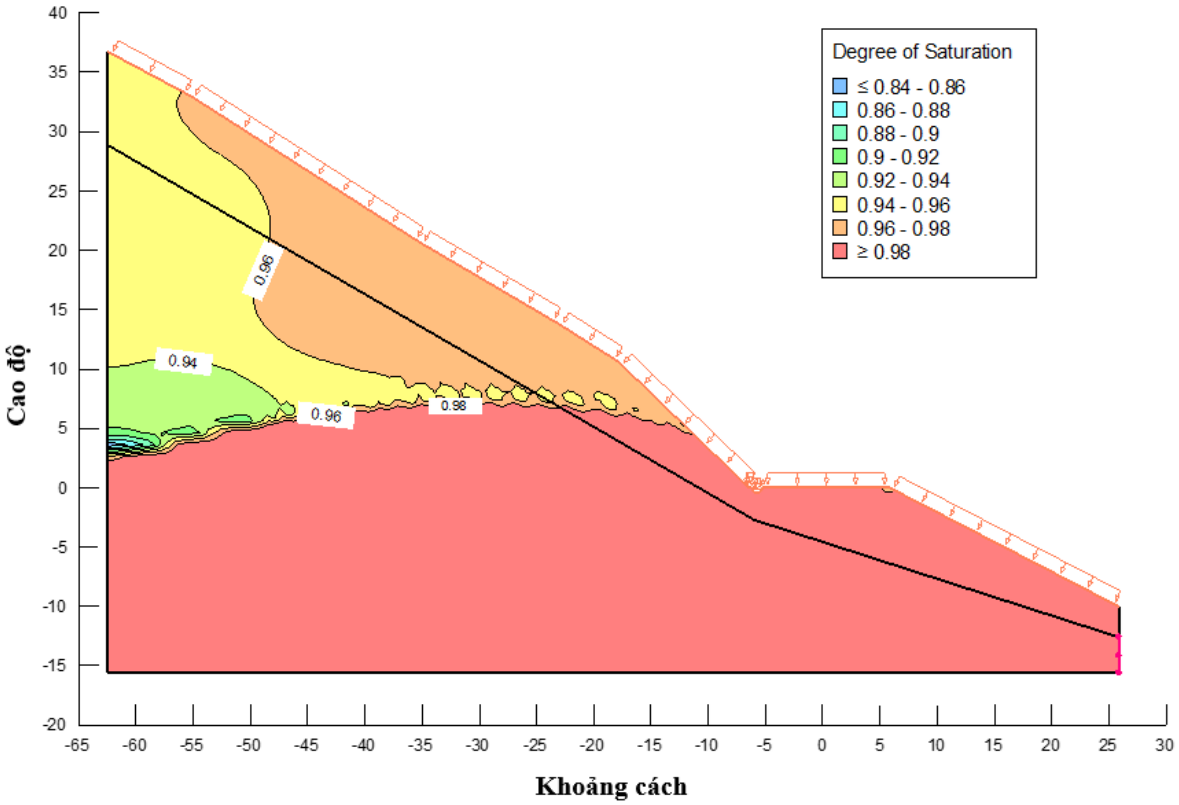


Hình PL10.12. Hệ số ổn định ở điều kiện sau chuỗi mưa, FS=0,969

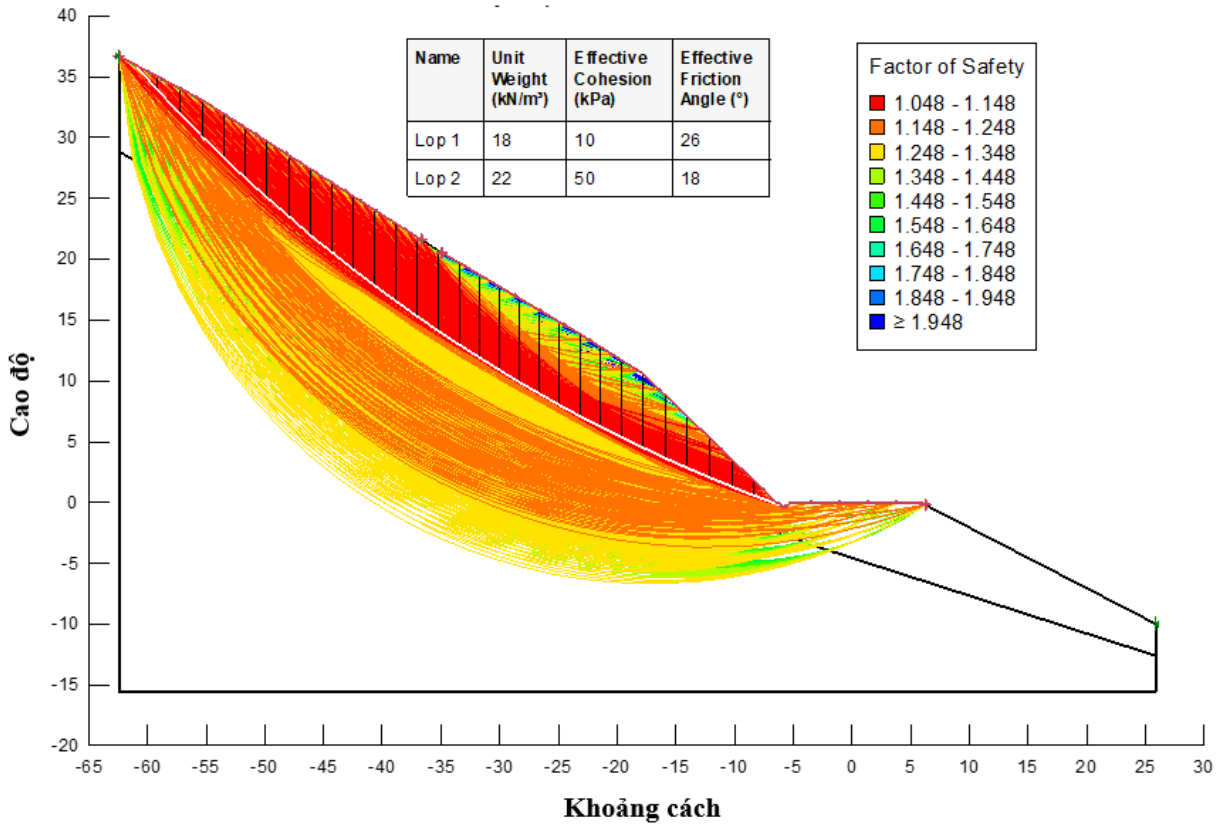
Mặt cắt tại vị trí ĐT128-60



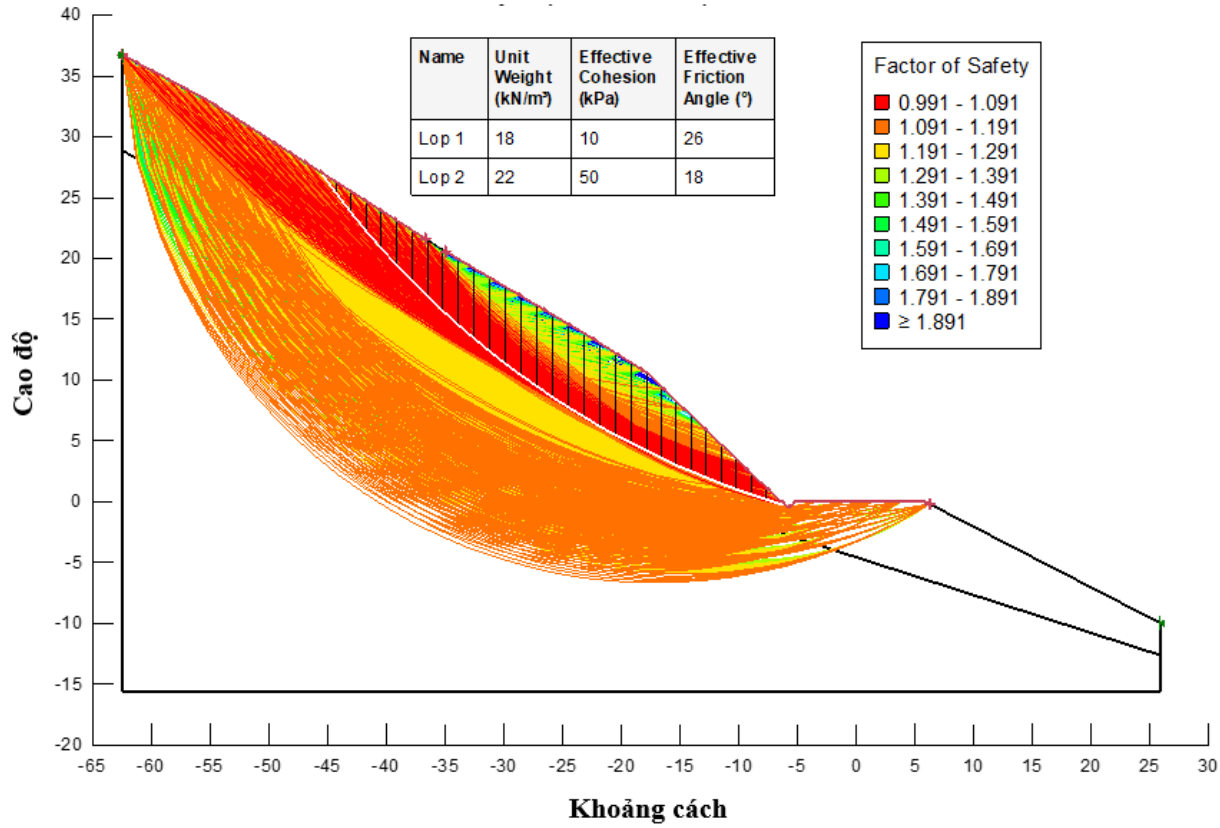
Hình PL10.13. Độ bão hòa ở thời điểm ban đầu trước chuỗi mưa



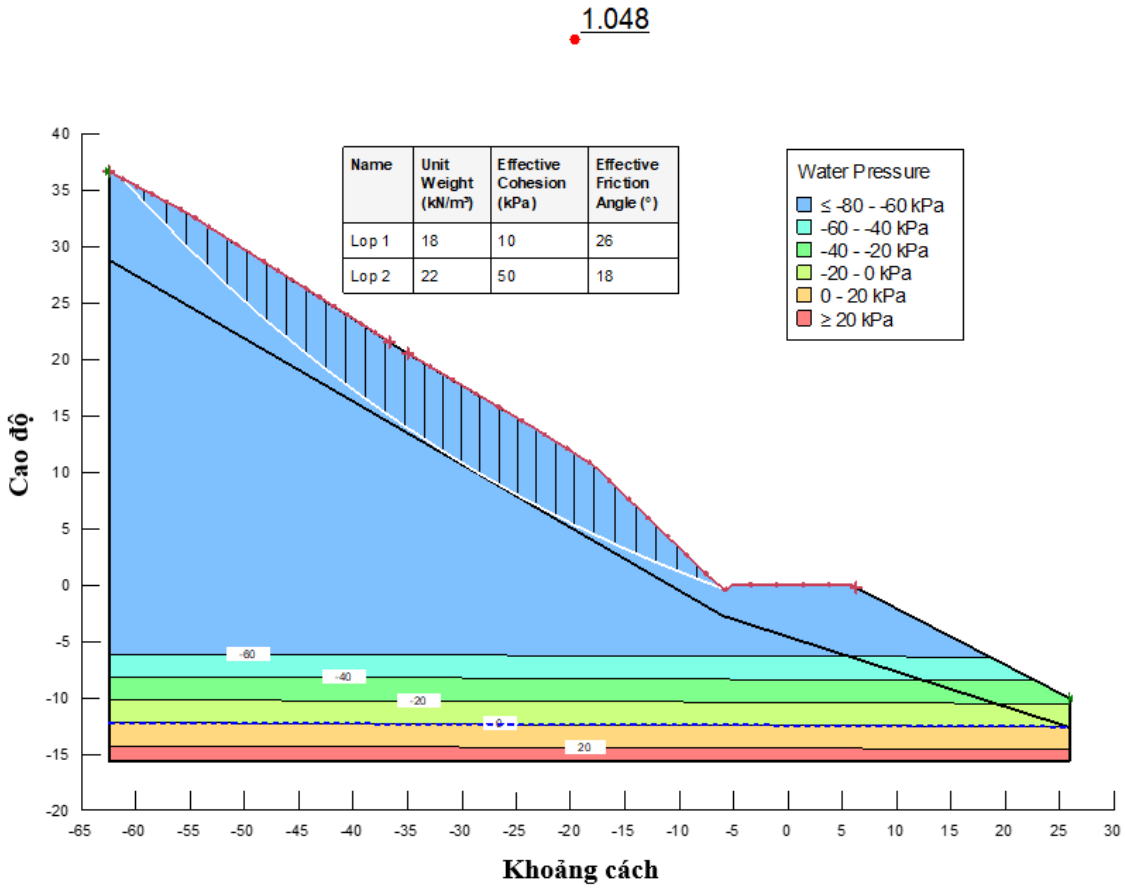
Hình PL10.14. Độ bão hòa ở thời điểm sau chuỗi mưa



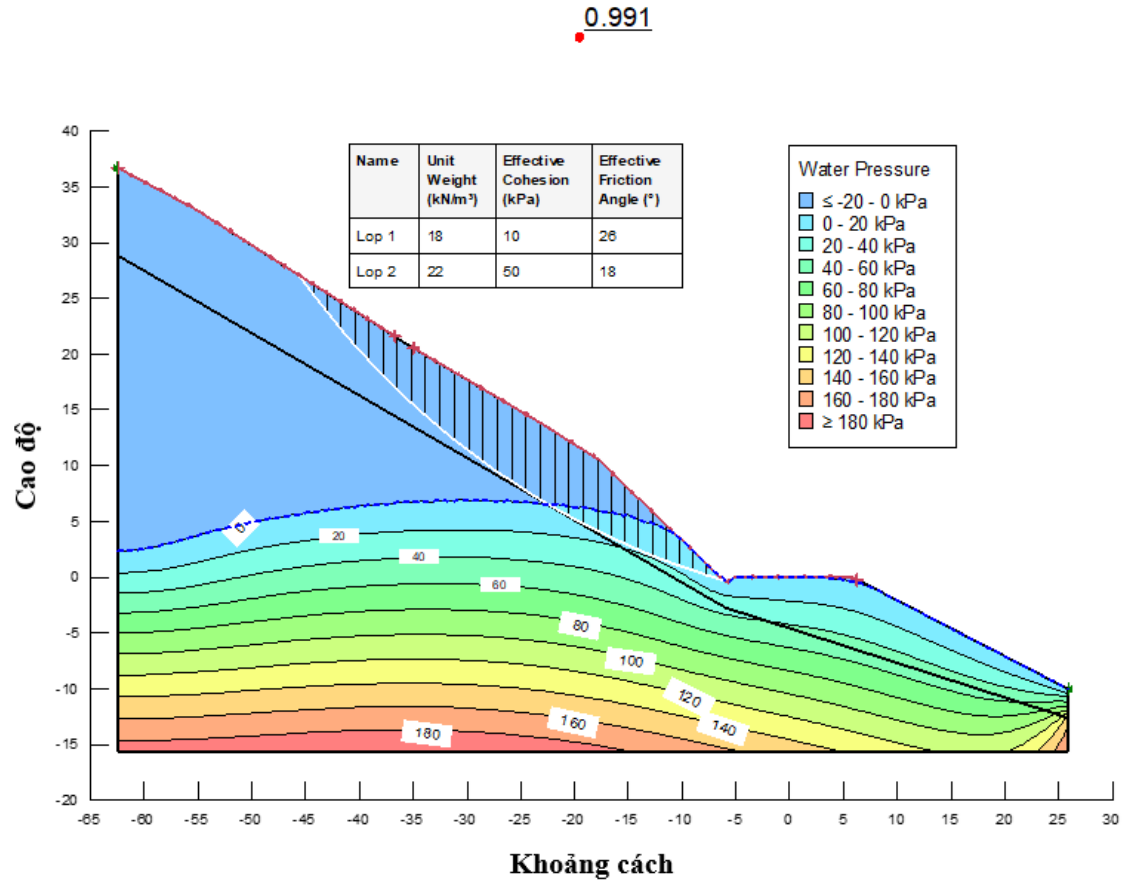
Hình PL10.15. Safety map thời điểm ban đầu trước chuỗi mưa



Hình PL10.16. Safety map thời điểm sau chuỗi mưa



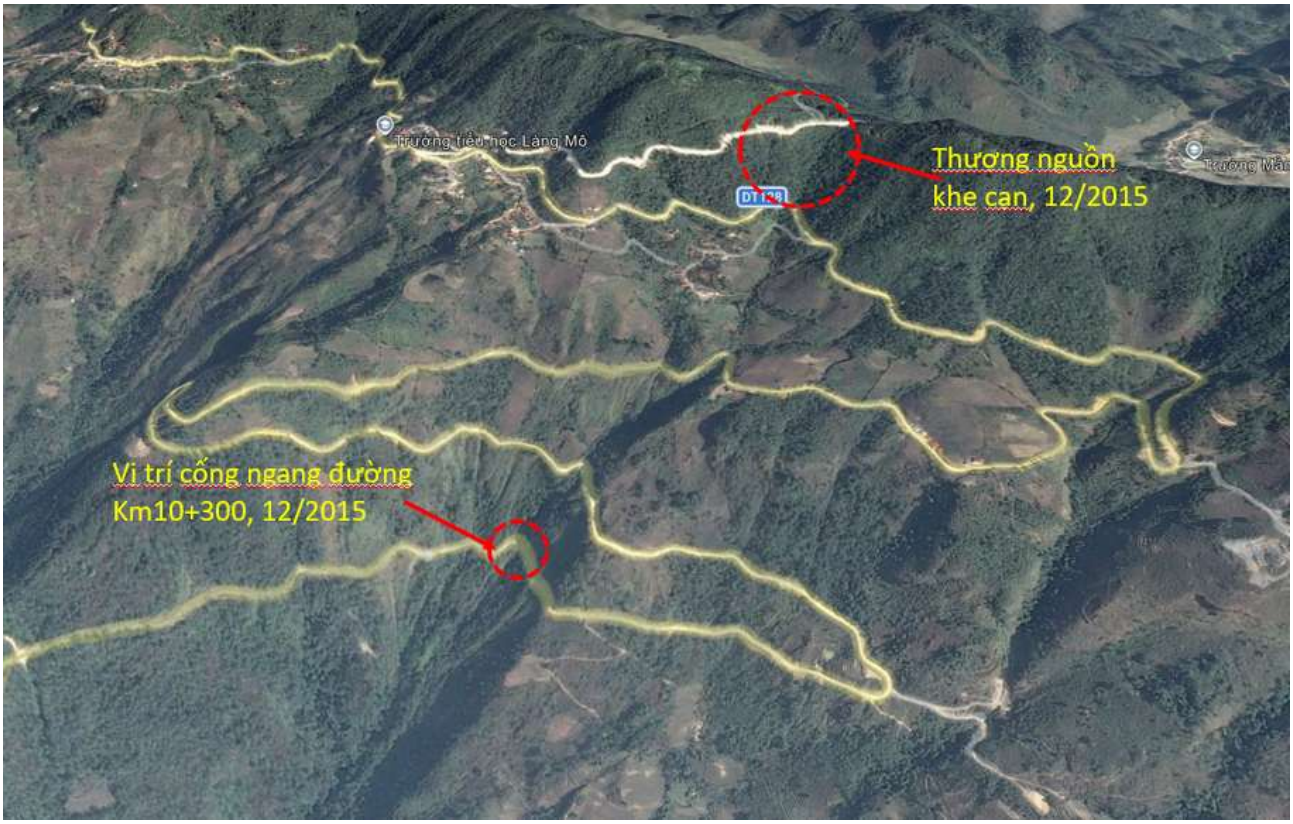
Hình PL10.17. Hệ số ổn định ở điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa, FS = 1,048



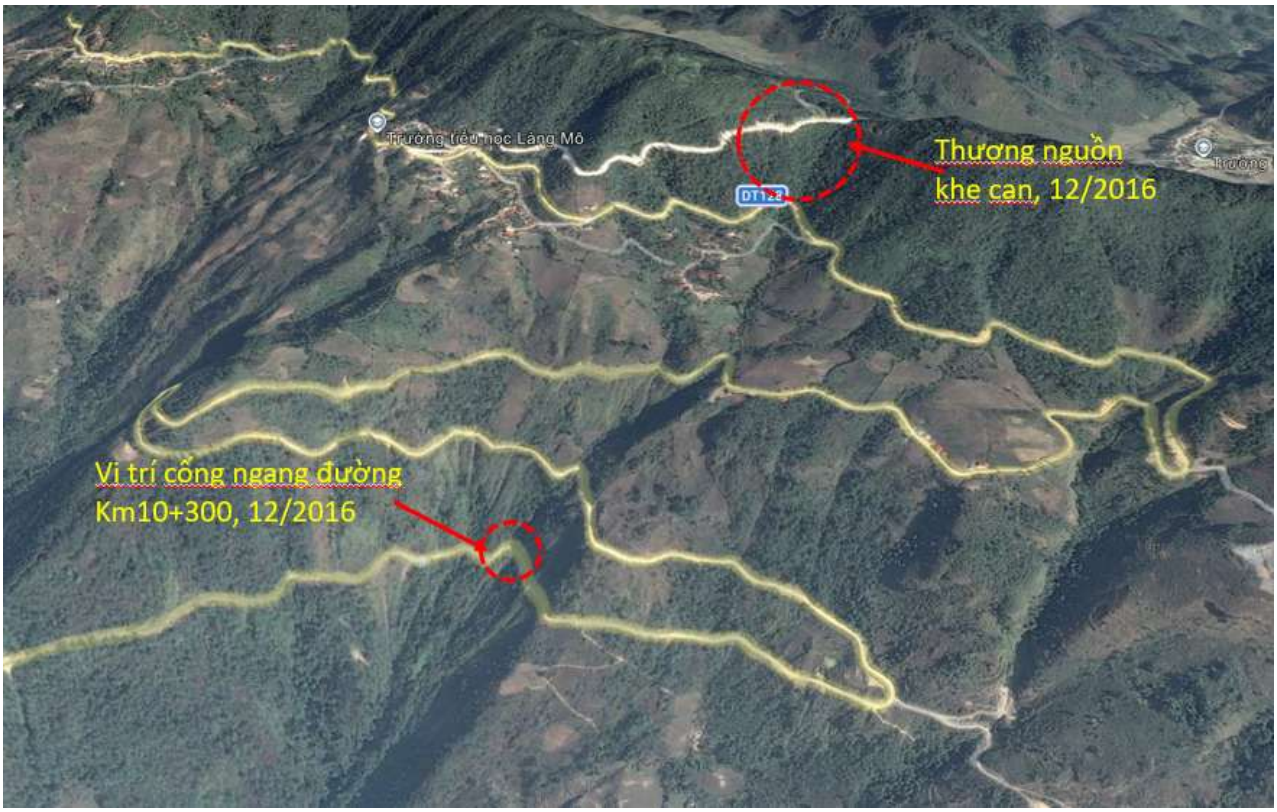
Hình PL10.18. Hệ số ổn định ở điều kiện sau chuỗi mưa, FS = 0,991

PHỤ LỤC 11

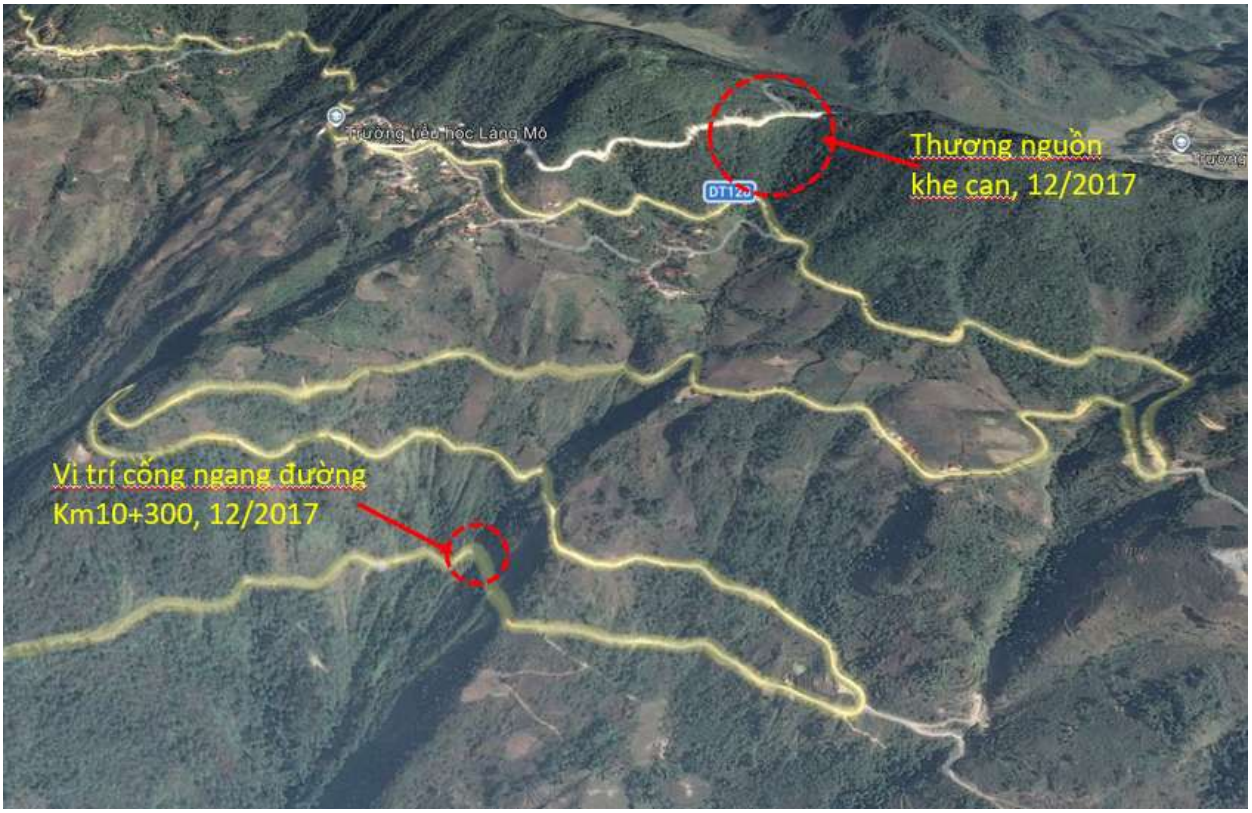
Lịch sử mất ổn định nền đường tại km10+300 trên dòng chảy khe cạn



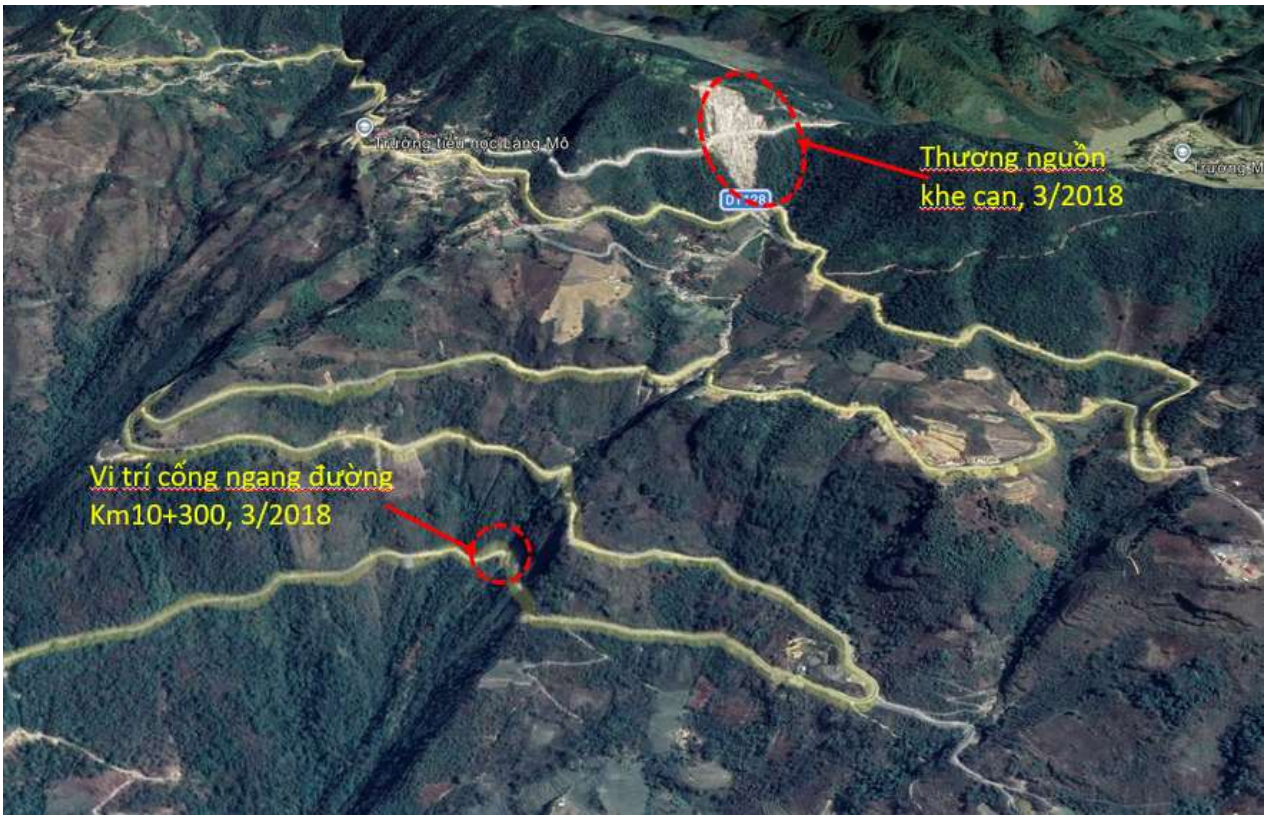
Hình PL11.1. Ảnh hiện trạng tháng 12/2015 (nguồn Google Earth)



Hình PL11.2. Ảnh hiện trạng tháng 12/2016 (nguồn Google Earth)



Hình PL11.3. Ảnh hiện trạng tháng 12/2017 (nguồn Google Earth)



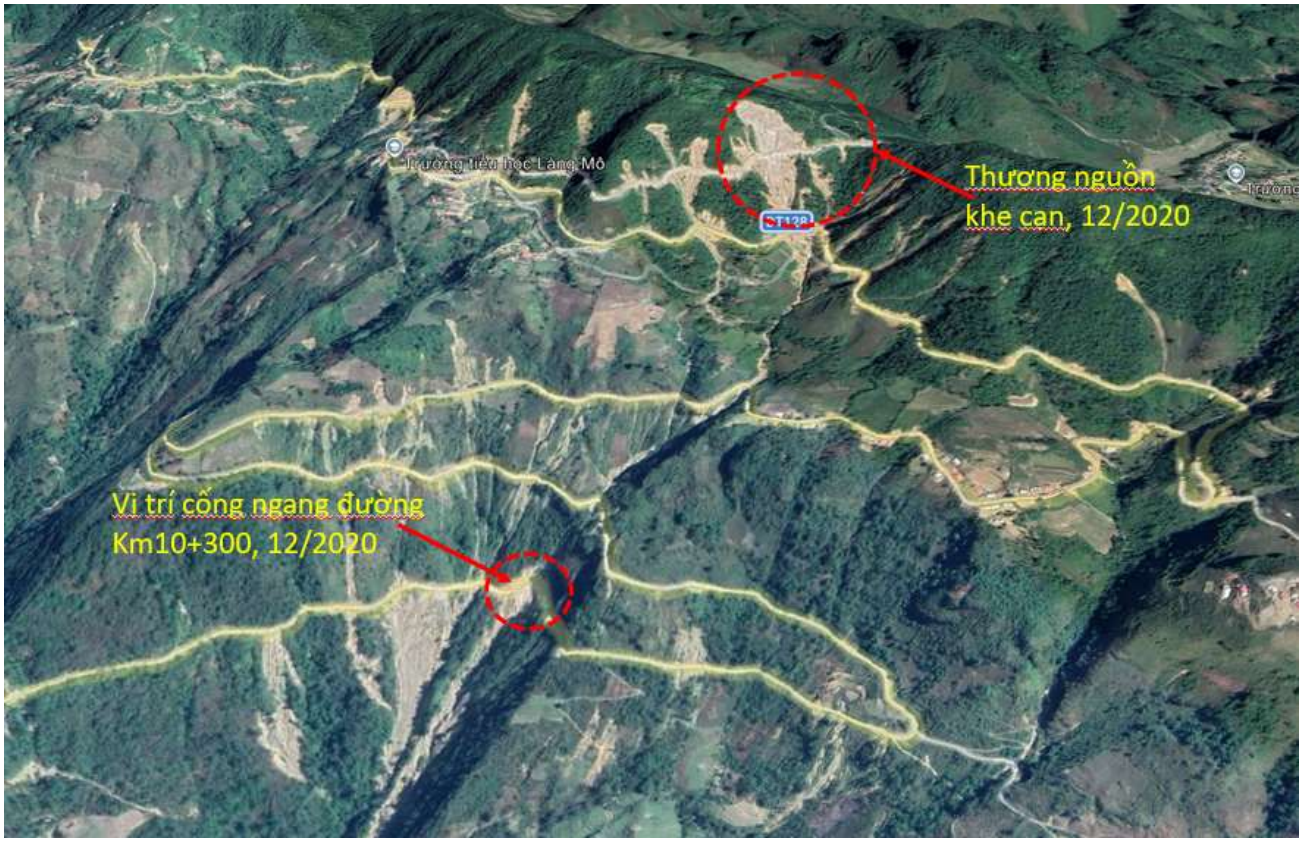
Hình PL11.4. Ảnh hiện trạng tháng 3/2018 (nguồn Google Earth)



Hình PL11.5. Ảnh hiện trạng tháng 12/2018 (nguồn Google Earth)



Hình PL11.6. Ảnh hiện trạng tháng 12/2019 (nguồn Google Earth)



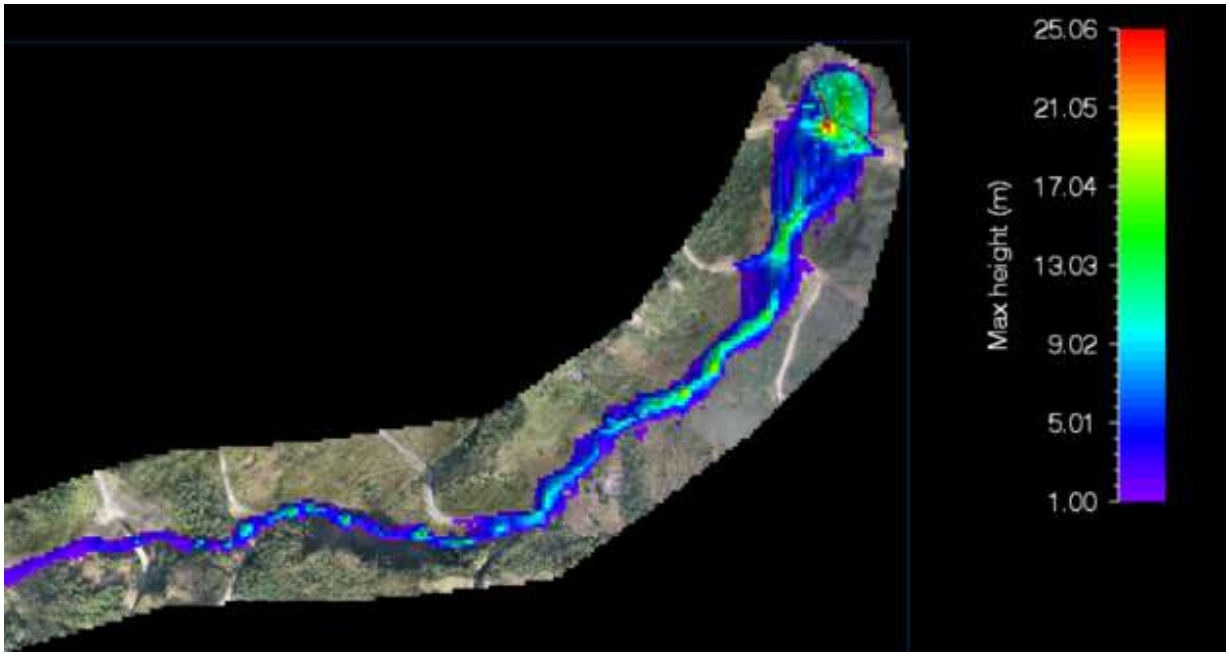
Hình PL11.7. Ảnh hiện trạng tháng 12/2020 (nguồn Google Earth)



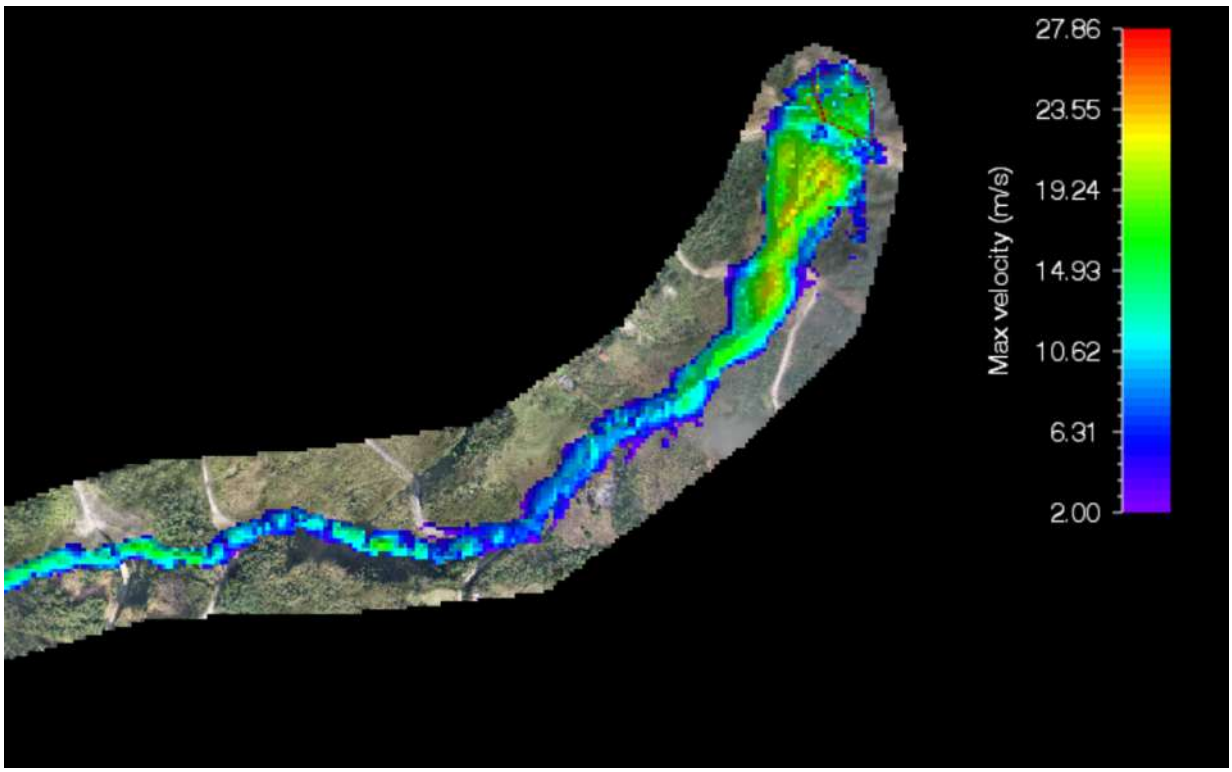
Hình PL11.8. Ảnh hiện trạng tháng 10/2024 (nguồn ảnh chụp UAV)

PHỤ LỤC 12

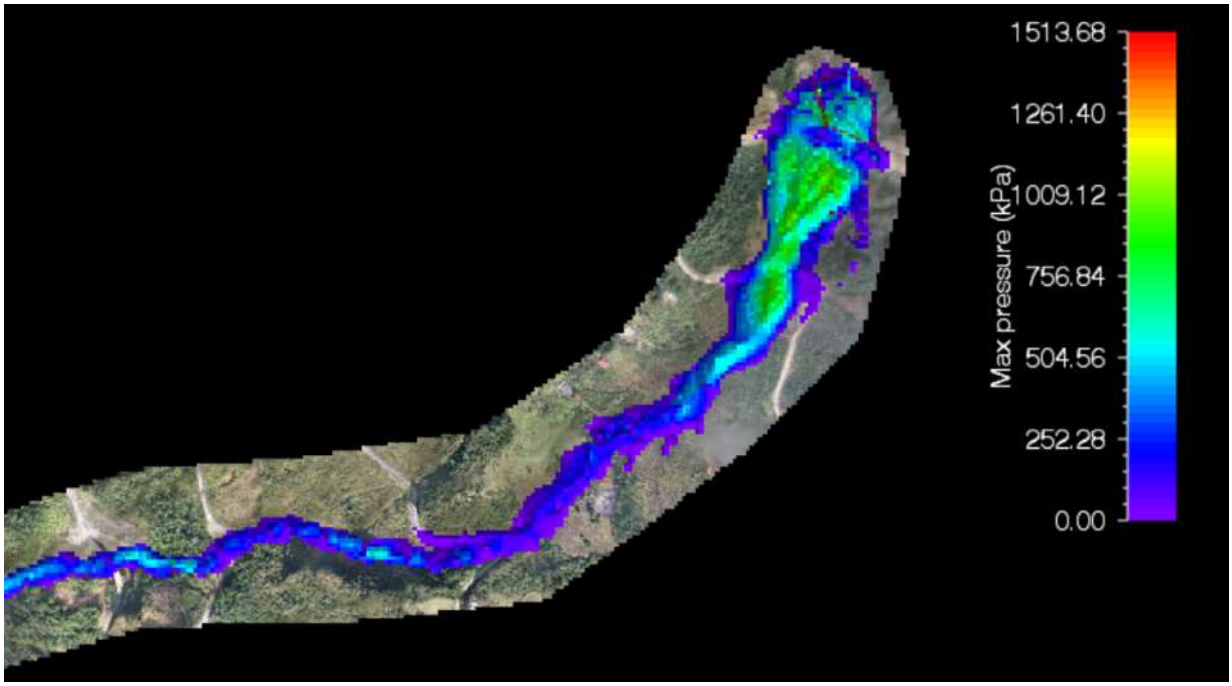
Kết quả tính toán mô hình cho kịch bản 1



Hình PL12.1. Chiều cao bồi lắng

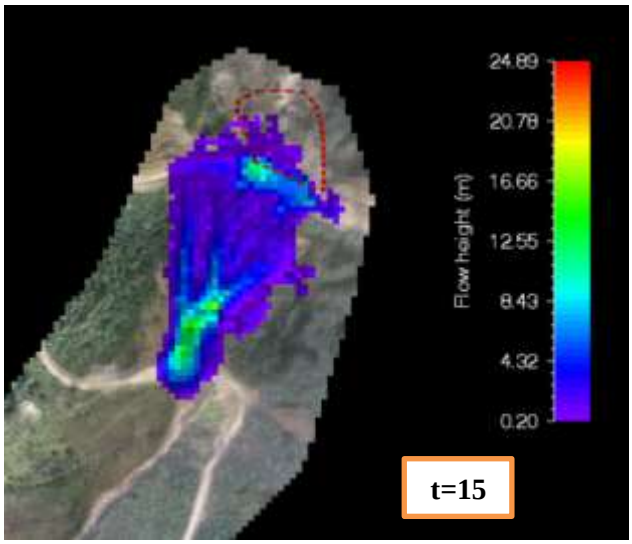


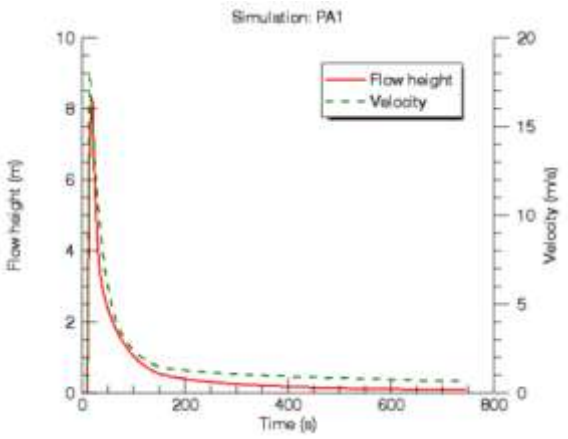
Hình PL12.2. Vận tốc lớn nhất



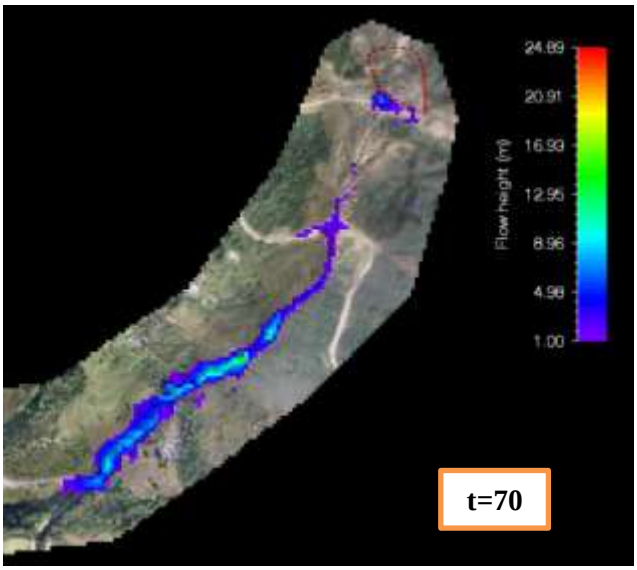
Hình PL12.3. Áp lực lớn nhất

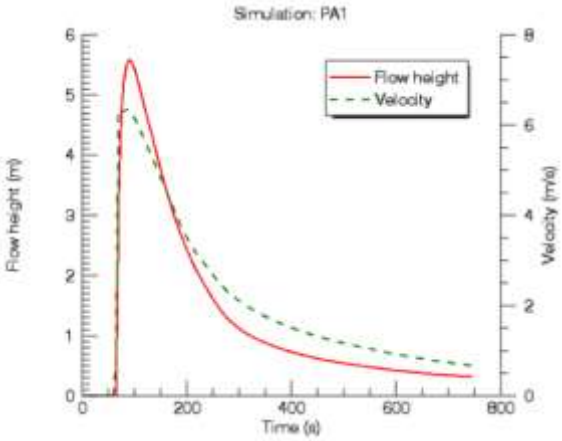
**) Vị trí số 1:*



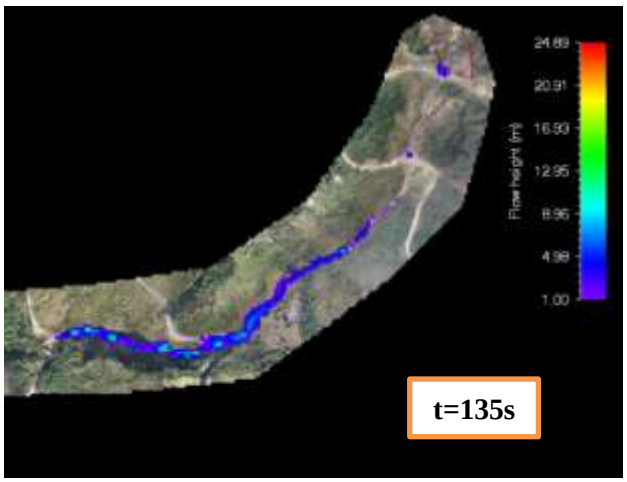


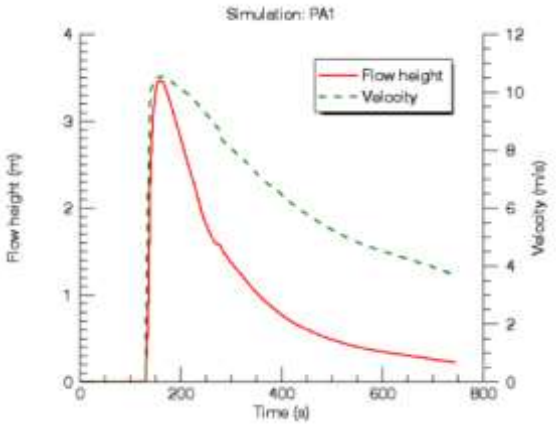
**) Vị trí số 2:*



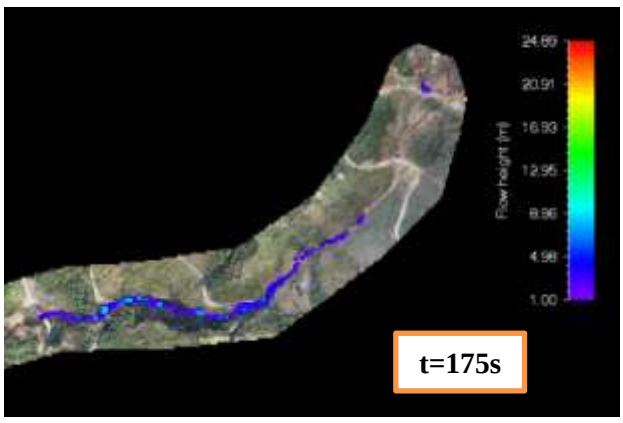


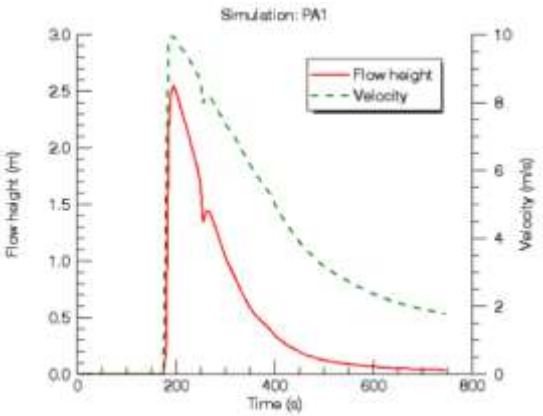
*) *Vị trí số 3:*





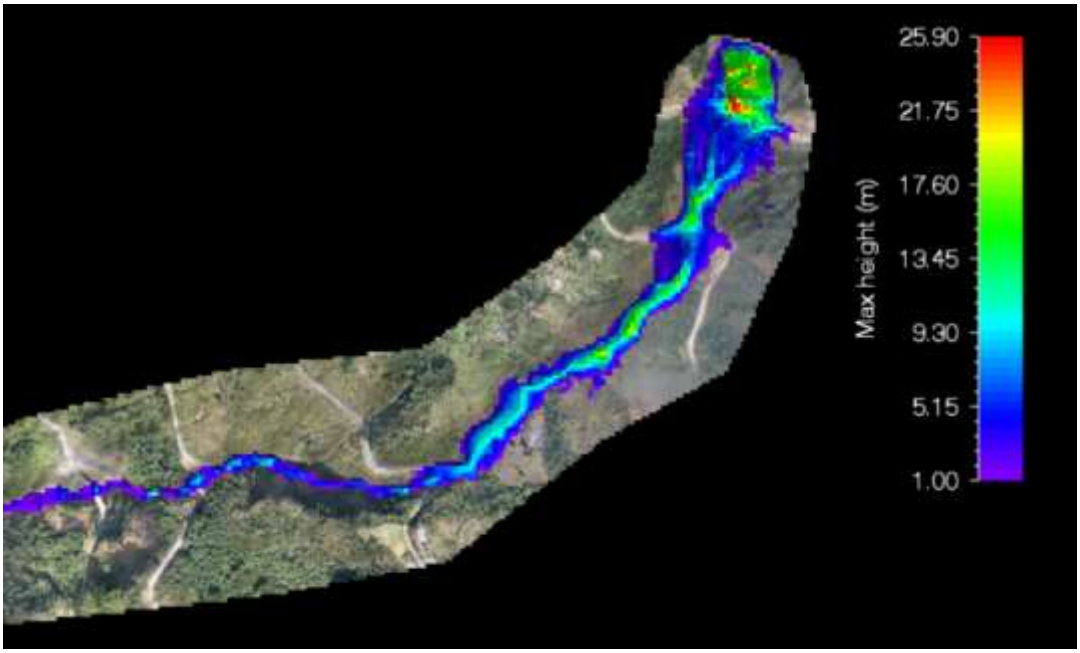
*) *Vị trí cầu:*



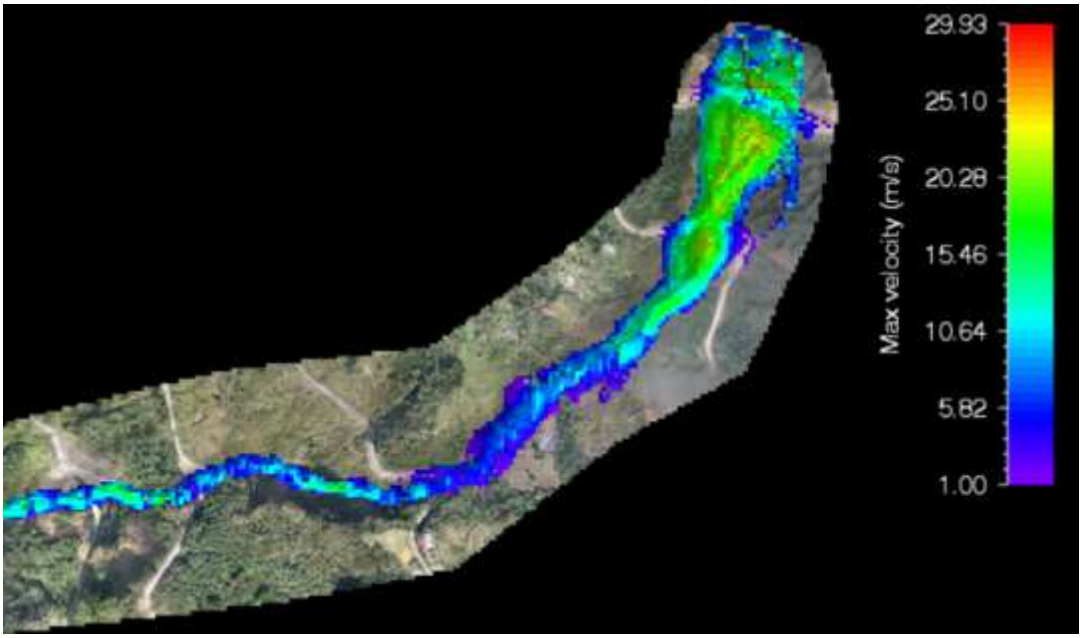


PHỤ LỤC 13

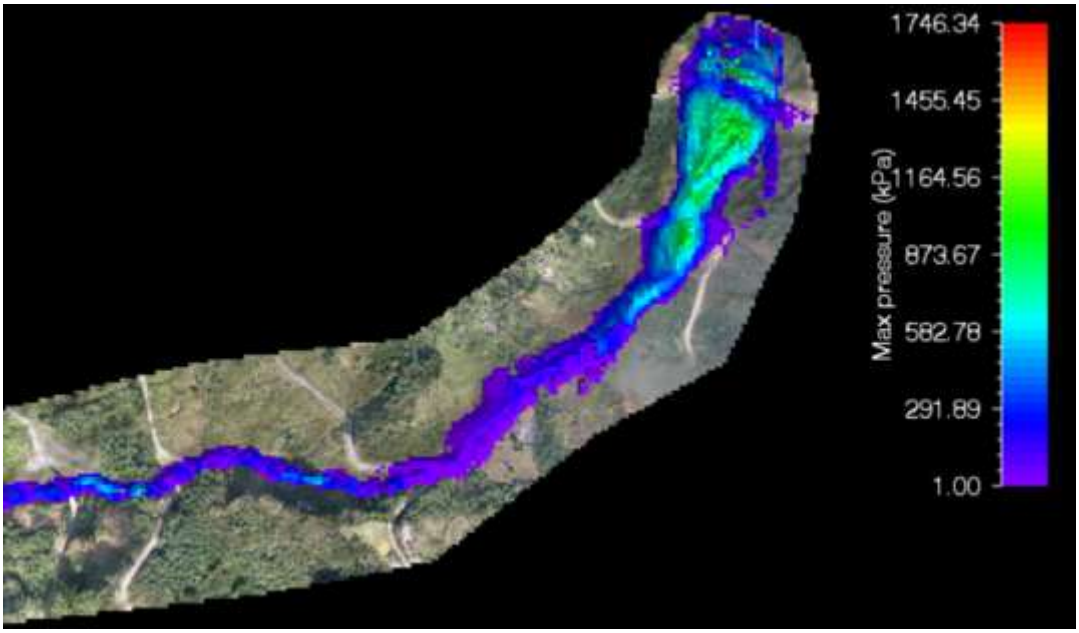
Kết quả tính toán mô hình cho kịch bản 2



Hình PL13.1. Chiều cao bồi lắng

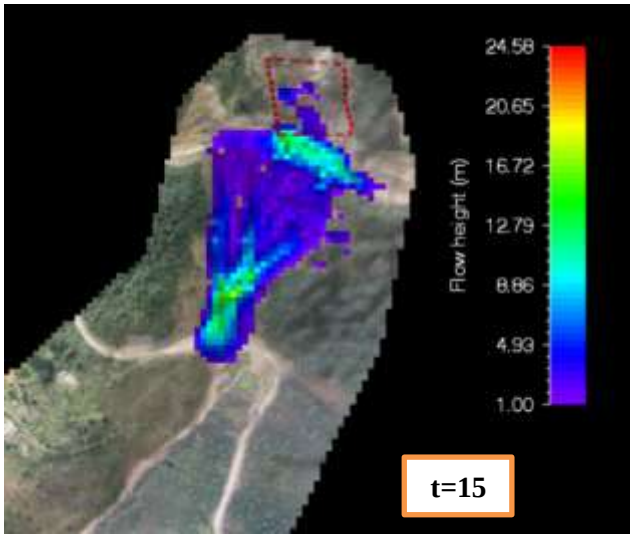


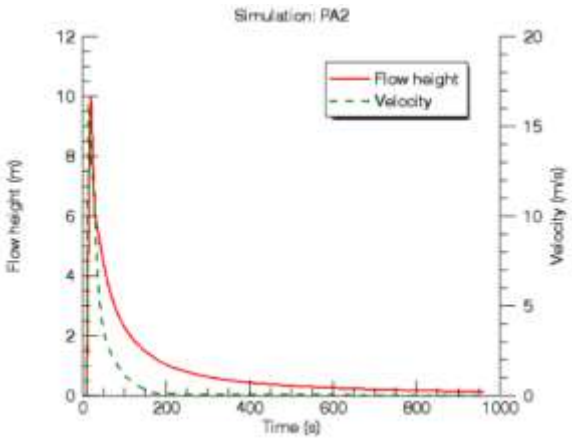
Hình PL13.2. Vận tốc lớn nhất



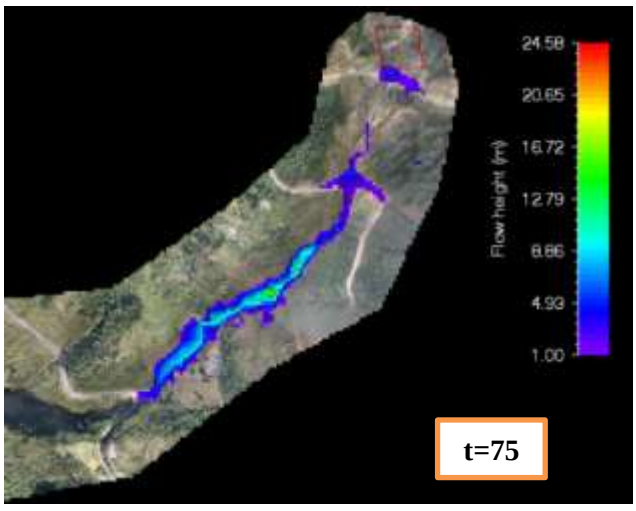
Hình PL13.3. Áp lực lớn nhất

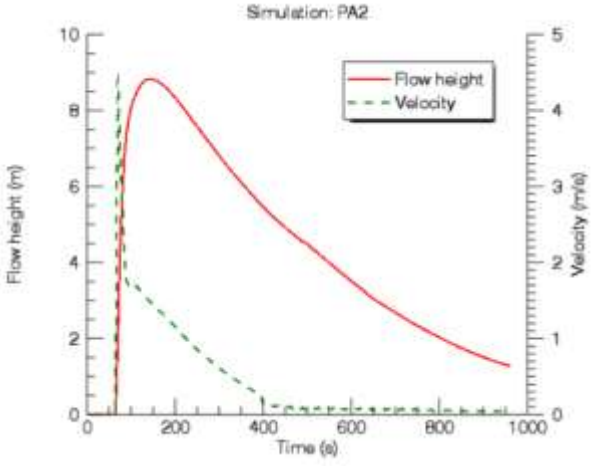
**) Vị trí số 1:*



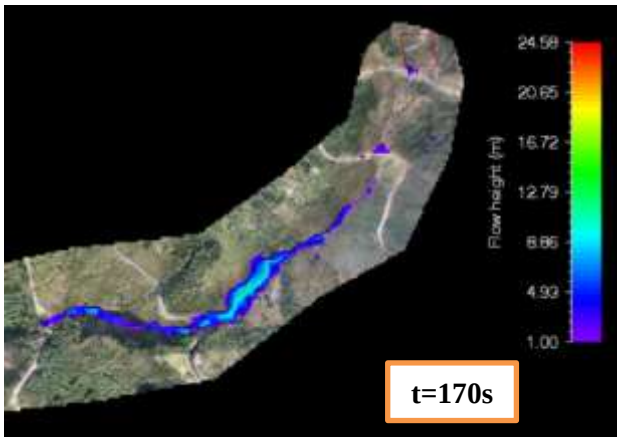


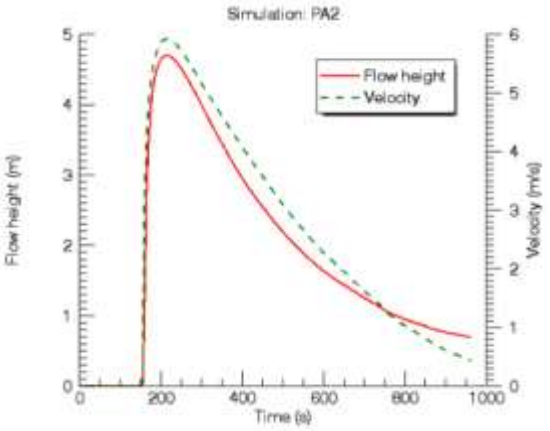
**) Vị trí số 2:*





*) *Vị trí số 3:*





*) *Vị trí cầu:*

