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

TÓM TẮT DỰ THẢO LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Hà Nội – 2026

Công trình được hoàn thành tại:

Trường Đại học Giao thông vận tải

Người hướng dẫn khoa học

1. **PGS. TS. Nguyễn Đức Mạnh**
2. **PGS. TS. Mai Sỹ Hùng**

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ cấp trường họp tại: Trường Đại học Giao thông vận tải

vào hồi: .....giờ ....., ngày .....tháng .....năm 2026

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- **Thư viện Quốc gia Việt Nam**
- **Thư viện Trường Đại học Giao thông vận tải**

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, mưa lớn và mưa cực đoan ngày càng gia tăng, trượt đất đá đang trở thành tai biến địa chất phổ biến và nguy hiểm tại khu vực miền núi Việt Nam. Dưới tác động của mưa kéo dài, lớp đất phong hóa bị bão hòa nước, làm giảm sức chống cắt và gây mất ổn định sườn dốc, hình thành các khối TĐN. Tại khu vực MNTB, với địa hình dốc, địa chất phức tạp và hệ thống khe cạn phát triển, TĐN thường xuyên gây hư hỏng nền mặt đường, hệ thống thoát nước và làm gián đoạn giao thông.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về trượt đất đá, các nghiên cứu chuyên sâu về đặc điểm TĐN và ảnh hưởng của chúng tới ổn định nền đường giao thông miền núi vẫn còn hạn chế. Vì vậy, đề tài "*Nghiên cứu đặc điểm trượt đất nông và ảnh hưởng tới ổn định nền đường khu vực miền núi Tây Bắc*" có ý nghĩa khoa học và thực tiễn cao.

2. Mục đích nghiên cứu

Làm rõ đặc điểm, cơ chế TĐN và đánh giá ảnh hưởng trực tiếp cũng như gián tiếp của TĐN 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, phá hủy nền đường khi mưa lớn.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu:

Đối tượng nghiên cứu là TĐN theo hệ phân loại phổ biến hiện nay trên thế giới, ở taluy nền đường đào các tuyến đường khu vực MNTB.

3.2. Phạm vi nghiên cứu:

Phạm vi không gian là khu vực MNTB Khu vực MNTB (theo Atlat Địa lý Việt Nam 2024 gồm Hòa Bình cũ, Sơn La, Điện Biên, Lai Châu, Lào Cai và Yên Bái cũ), tập trung vào các tuyến quốc lộ (QL) và đường tỉnh (ĐT) hiện hữu. Phạm vi nghiên cứu điển hình là tuyến ĐT128, tỉnh Lai Châu, trong đó nghiên cứu chi tiết đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ dài 20 km.

4. Nội dung nghiên cứu

(1) Khảo sát, phân tích đặc trưng trượt đất đá trên một số tuyến đường MNTB; (2) thiết lập bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá dọc tuyến ĐT128; (3) phân tích đặc điểm, cơ chế TĐN đoạn tuyến nghiên

cứu chi tiết; (4) phân tích ảnh hưởng trực tiếp, gián tiếp của TĐN tới ổn định nền đường đoạn tuyến điển hình và đề xuất các giải pháp kỹ thuật giảm thiểu.

5. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng tổng hợp các phương pháp nghiên cứu gồm: thu thập, xử lý và phân tích tài liệu về địa chất, trượt đất; điều tra, khảo sát thực địa; ứng dụng GIS và viễn thám, AI với các mô hình học sâu được đánh giá bằng các chỉ số thống kê; thực nghiệm trong phòng (chỉ tiêu cơ lý, thành phần hóa học, thành phần khoáng vật của đất); GeoStudio (mô đun SEEP/W và SLOPE/W) cho bài toán thấm – ổn định mái dốc và bằng RAMMS cho dòng chảy chứa vật liệu rời trên lòng khe cạn; phương pháp chuyên gia.

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

Ý nghĩa khoa học: Luận án bổ sung cơ sở dữ liệu tổng quát về TĐN và cách tiếp cận phân vùng nguy cơ trượt đất bằng AI trên hệ thống đường giao thông hiện hữu MNTB. Đồng thời làm rõ đặc điểm, cơ chế TĐN, đánh giá mối quan hệ giữa TĐN, mưa lớn và ổn định nền đường trong điều kiện địa hình khe cạn cắt ngang đường.

Giá trị thực tiễn: Luận án 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; đồng thời đề xuất các giải pháp kỹ thuật có thể áp dụng thực tế nhằm giảm thiểu thiệt hại do TĐN gây ra.

7. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần Mở đầu, Kết luận luận án gồm 4 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

1.1. Trượt đất đá và phân loại

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

Theo Varnes (1978, 1984) [178, 179], Cruden (1991) [65], Cruden và Varnes (1996) [66], trượt đất đá là hiện tượng khối đất, đá hoặc hỗn hợp của chúng bị mất ổn định và dịch chuyển từ sườn dốc xuống phía chân dốc dưới tác động của trọng lực, xảy ra khi trạng thái cân bằng giữa lực giữ và lực gây trượt bị phá vỡ.

Theo Lê Đức An (2008) [1], các yếu tố gây trượt được chia thành hai nhóm chính gồm: nhóm tác động thường xuyên như điều kiện địa chất, địa hình, khí hậu và hoạt động nhân sinh; nhóm tác động tức thời như động đất, mưa lớn cực đoan, nổ mìn hoặc xả lũ.

1.1.2. Phân loại trượt đất đá

Trượt đất đá đa dạng về cơ chế, quy mô và điều kiện phát sinh nên được phân loại theo nhiều tiêu chí khác nhau như độ sâu mặt trượt, quy mô khối trượt, vật liệu và cơ chế dịch chuyển. Trong luận án này, phân loại theo độ sâu mặt trượt của Xavarenxky (1934) [190] được sử dụng làm cơ sở chính để nghiên cứu TĐN (với chiều sâu khoảng 1–5 m) trên các tuyến giao thông MNTB.

1.2. Khái quát nghiên cứu trượt đất nông

1.2.1. Nghiên cứu trượt đất nông trên thế giới

Trên thế giới, nghiên cứu TĐN được triển khai theo nhiều hướng. Ở quy mô khu vực hoặc hành lang tuyến, phân vùng nguy cơ (độ nhạy cảm) trượt đất đá đánh giá khả năng xảy ra trượt tại một khu vực dựa trên điều kiện địa chất, địa hình, chưa bao gồm yếu tố thời gian. Các phương pháp phát triển từ định tính, bán định lượng (chồng lớp có trọng số, AHP) đến định lượng (thống kê, AI); các mô hình học máy và học sâu có khả năng xử lý quan hệ phi tuyến giữa các yếu tố và ngày càng được sử dụng nhiều. Ở quy mô mái dốc, cơ chế TĐN do mưa trong đất không bão hòa được giải thích qua sự dịch chuyển của mặt ướt, suy giảm lực hút dính và gia tăng áp lực nước lỗ rỗng [33], được nghiên cứu bằng thí nghiệm máng trượt, mô hình thấm – ổn định, ngưỡng mưa tới hạn và quan trắc hiện trường.

1.2.2. Nghiên cứu trượt đất nông ở Việt Nam

Ở Việt Nam, trượt đất đá dọc các tuyến giao thông đã được nghiên cứu tại Quảng Nam, Quảng Bình, QL4D, đường Hồ Chí Minh, QL6, QL32...; gần đây nhiều nhóm nghiên cứu ứng dụng học máy, học sâu trong phân vùng nguy cơ. Huỳnh Thanh Bình (2023) [2] thực hiện thí nghiệm máng trượt với mưa cường độ lớn hơn 100 mm/h kéo dài nhiều

ngày và chia quá trình phát triển TĐN theo diễn biến áp lực nước lỗ rỗng thành năm giai đoạn.

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

Đối với TĐN trên hệ thống đường GTMN hiện hữu ở Việt Nam, luận án chỉ ra các vấn đề chưa được làm rõ: (i) tính đặc thù về quan hệ TĐN – địa hình – địa chất – ổn định nền đường theo từng vùng; (ii) chưa xem xét định lượng ảnh hưởng trực tiếp hay gián tiếp của TĐN tới ổn định nền đường, công trình trên tuyến, đặc biệt ở khu vực địa hình phân cắt bởi khe cạn có dòng chảy tạm thời khi mưa lớn; (iii) các giải pháp phòng chống chưa được xem xét tổng thể theo điều kiện địa hình – địa chất – thủy văn và kinh tế từng vùng; (iv) thiếu cơ sở dữ liệu về TĐN trên mạng lưới đường GTMN; (v) thiếu nghiên cứu đồng bộ kết hợp phân vùng nguy cơ bằng công cụ hiện đại để sàng lọc không gian với nghiên cứu chuyên sâu đặc điểm, cơ chế TĐN, trong khi việc chọn đoạn tuyến nghiên cứu chi tiết theo kinh nghiệm chủ quan tiềm ẩn rủi ro bỏ sót khu vực nguy cơ cao.

Trên cơ sở đó, luận án sử dụng phân vùng nguy cơ trượt đất đá bằng AI 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 chính: phân tích đặc điểm, cơ chế TĐN và đánh giá ảnh hưởng của TĐN tới ổn định nền đường.

CHƯƠNG 2
CƠ SỞ LÝ THUYẾT NGHIÊN CỨU

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

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

Luận án sử dụng bốn mô hình học sâu. Mạng nơ-ron tích chập (CNN) khai thác cấu trúc không gian cục bộ của tổ hợp các lớp bản đồ raster nhiều kênh; mạng nơ-ron sâu (DNN) mô hình hóa quan hệ phi tuyến toàn cục giữa các đặc trưng tại từng điểm ảnh; mạng nơ-ron hồi quy (RNN) và mạng bộ nhớ dài – ngắn (LSTM) vốn được thiết kế cho dữ liệu chuỗi, trong đó LSTM bổ sung cơ chế cổng để duy trì thông tin qua chuỗi dài. Qua phân tích, CNN phù hợp với bản chất dữ liệu raster của bài toán phân vùng không gian, còn RNN, LSTM phù hợp hơn với chuỗi thời gian như chuỗi mưa.

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

Đánh giá hiệu suất các mô hình AI, sử dụng các chỉ số thống kê như TP, TN, FP, FN, PPV, NPV, độ nhạy (SST), độ đặc hiệu (SPF), độ chính xác (ACC), Kappa, RMSE, đường cong ROC và diện tích dưới đường cong (AUC). Để giải thích kết quả dự báo, sử dụng phân tích SHAP dựa trên giá trị Shapley [182]. Giá trị SHAP lượng hóa mức đóng góp của từng yếu tố vào kết quả dự báo của mô hình; nó phản ánh quan hệ thống kê mà mô hình học được, không đồng nghĩa với vai trò nguyên nhân vật lý trực tiếp gây mất ổn định sườn dốc.

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 xảy ra trượt đất, vật liệu rời cùng với nước mưa hình thành dòng chảy vật liệu rời có vận tốc, động năng và khả năng phá hủy lớn.

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

Các mô hình mô phỏng phổ biến gồm mô hình thủy lực trung bình theo chiều sâu, mô hình Herschel–Bulkley, mô hình Voellmy–Salm và mô hình hai pha. Trong đó, mô hình Voellmy–Salm được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng mô phỏng tốt chuyển động của dòng vật liệu rời thông qua hai tham số ma sát μ và ξ.

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

Phần mềm RAMMS dựa trên mô hình Voellmy–Salm để mô phỏng chuyển động của dòng chảy chứa vật liệu rời dựa trên hệ phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng trung bình theo chiều sâu. Trong mô hình này, lực cản dòng chảy gồm hai thành phần chính là ma sát đáy μ và ma sát rối – nhớt ξ, cho phép phản ánh đồng thời ảnh hưởng của pha rắn và pha lỏng trong quá trình lan truyền dòng vật liệu rời.

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

Bài toán thấm và ổn định được giải liên kết bằng GeoStudio: SEEP/W mô phỏng thấm không ổn định trong đất bão hòa và không bão hòa dưới tác động của mưa; trường áp lực nước lỗ rỗng thu được làm đầu vào cho SLOPE/W tính hệ số ổn định FS theo phương pháp cân bằng giới hạn Bishop

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

Mô-đun SEEP/W xây dựng trên cơ sở định luật Darcy mở rộng để

mô phỏng dòng thấm không bão hòa. Mô hình sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm phân tích sự thay đổi áp suất nước lỗ rỗng và trường thấm theo không gian, thời gian dưới tác động của mưa, qua đó đánh giá ảnh hưởng của quá trình thấm đến ổn định mái dốc.

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

SWCC biểu diễn mối quan hệ giữa hàm lượng nước trong đất và lực hút dính trong môi trường đất không bão hòa. Do không có thí nghiệm xác định trực tiếp, SWCC được xác định gián tiếp từ đường cong thành phần hạt theo Arya và Paris (1981) [37].

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

Để đánh giá ổn định mái dốc dưới tác động của mưa và điều kiện bão hòa thay đổi theo thời gian, phương pháp cân bằng giới hạn Bishop được sử dụng để tính toán ổn định mái dốc thông qua hệ số ổn định FS, phản ánh tỷ số giữa lực chống trượt và lực gây trượt. Mái dốc ổn định khi FS > 1, mất ổn định khi FS < 1.

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

Luận án hệ thống ba dạng hư hỏng mặt đường điển hình liên quan TĐN: lún võng cục bộ (do vật liệu trượt tích tụ, va đập và nước ngấm khi rãnh bị lấp gây xói ngầm nền), nứt mép mặt đường (khi taluy âm bị mất ổn định) và bong bật lớp mặt (do nước xâm nhập làm suy giảm dính kết giữa nhựa và cốt liệu)

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

Đối với hệ thống thoát nước, TĐN lấp rãnh dọc, làm tắc cống ngang, gây tràn nước qua mặt đường, xói ngầm và xói taluy âm; khi dòng chảy mang thêm vật liệu rời từ TĐN phía trên, tác động động lực có thể làm nứt vỡ, lệch kết cấu cống và phá hủy nền đường. Các tác động này tạo thành chuỗi liên hoàn từ mất hiệu quả thoát nước tới hư hỏng mặt, nền đường và trượt taluy âm.

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

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 khu vực miền núi phía Tây Bắc Việt Nam, gồm các tỉnh Hòa Bình cũ, Sơn La, Điện Biên, Lai Châu, Lào Cai và Yên Bái cũ, với địa hình cao, chia cắt mạnh và nhiều dãy núi lớn. Khu vực có khí hậu nhiệt đới gió mùa với mùa mưa kéo dài và lượng mưa lớn, phổ biến khoảng (2.400–3.000) mm/năm, nhiều nơi vượt 4.000 mm/năm.

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

MNTB là khu vực núi cao, hiểm trở, sườn dốc, chia cắt mạnh; khí hậu nhiệt đới gió mùa với lượng mưa trung bình năm phổ biến (2.400–3.000) mm, tại các trung tâm mưa Lai Châu, Điện Biên đạt tới 4.692 mm; lượng mưa 24 giờ có thể vượt 100 mm. Khảo sát hiện trạng tháng 3–6/2023 được thực hiện trên 8 tuyến: QL12, QL4H, ĐT128 (Lai Châu); QL4G, QL37, QL6 (Sơn La – Hòa Bình); QL4D, QL279 (Lào Cai), tổng chiều dài 397 km. Vị trí, kích thước khối trượt được xác định bằng GPS cầm tay, máy đo laser, thước dây và đối chiếu với DEM. Kết quả ghi nhận 643 điểm trượt các loại, trong đó có 594 điểm TĐN (Bảng 3.1)

Bảng 3.1. Mật độ trượt và tỷ lệ TĐN trên các tuyến khảo sát

Tỉnh	Tuyến	Chiều dài (km)	Số điểm trượt	Số điểm TĐN	Mật độ (điểm/km)	Tỷ lệ TĐN (%)
Lai Châu	ĐT128	90,0	294	284	3,27	96,6
	QL4H	40,6	101	95	2,49	94,1
	QL12	52,0	48	42	0,92	87,5
	Tổng/TB	*182,6*	*443*	*421*	*2,23*	*92,73*
Sơn La	QL4G	45,6	31	29	0,68	93,5
	QL37	30,5	50	47	1,64	94,0
	QL6	50,8	34	26	0,67	76,5
	Tổng/TB	*126,9*	*115*	*102*	*0,99*	*88,0*
Lào Cai	QL279	44,0	38	31	0,86	81,6
	QL4D	43,7	47	40	1,08	85,1
	Tổng/TB	*87,7*	*85*	*71*	*0,97*	*83,35*

Mật độ trượt dao động từ 0,67 điểm/km (QL6) đến 3,27 điểm/km (ĐT128); tỷ lệ TĐN từ 76,5% (QL6) đến 96,6% (ĐT128). Theo tỉnh, tỷ lệ TĐN trung bình là 83,35% (Lào Cai), 88,0% (Sơn La) và 92,73%

(Lai Châu). ĐT128 tỉnh Lai Châu có mật độ và tỷ lệ TĐN cao nhất (3,27 điểm/km; 96,6%). Tuyến có độ dốc lớn (30–45)^0, độ cao trên 900m, nằm gần đới đứt gãy Lai Châu – Điện Biên. Đặc điểm địa chất với các thành tạo đá phân phiến mạnh, xen kẹp đá phiến, đá vôi và đá vôi sét có tính tương đồng lớn với các khu vực phát sinh trượt chủ yếu tại MNTB. ĐT128 được chọn là tuyến nghiên cứu điển hình.

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

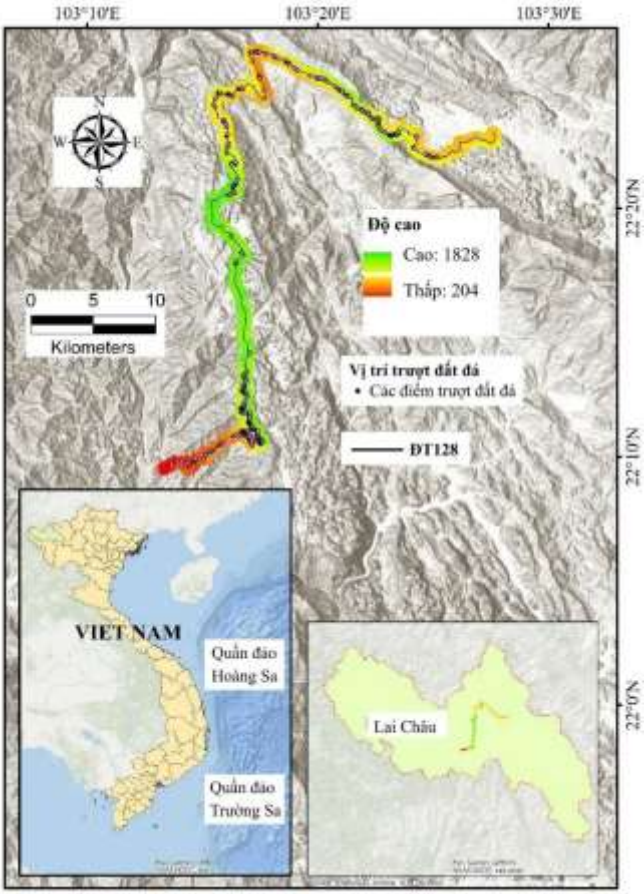
Tuyến ĐT128 đi qua khu vực có địa hình dốc lớn, bị chia cắt mạnh và mang đặc trưng điển hình của MNTB. Khu vực nghiên cứu có các hệ tầng chủ yếu gồm Bến Khế, Sinh Vinh, Bó Hiềng, Nậm Pìa và Yên Châu với thành phần chủ yếu gồm đá phiến, cát kết, quarzit và đá vôi, đồng thời chịu ảnh hưởng của các đới đứt gãy lớn như Sông Đà và Điện Biên – Lai Châu.

Lượng mưa trung bình giai đoạn 2010–2024 đạt khoảng 2.271,8 mm/năm, tập trung chủ yếu vào các tháng VI và VII. Cùng với mạng lưới sông suối, khe cạn phân bố dày đặc và địa hình dốc lớn, đây là những điều kiện thuận lợi cho phát sinh TĐN.

Thảm thực vật dọc tuyến gồm rừng tự nhiên, cây bụi, thảm cỏ và đất canh tác nông nghiệp; tuy nhiên sự suy giảm diện tích rừng do khai thác và canh tác đã làm gia tăng nguy cơ trượt đất trong khu vực nghiên cứu.

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

Dữ liệu trượt được thu thập trong dải rộng 500 m dọc tuyến qua khảo sát tháng 3/2023, tài liệu của cơ quan quản lý giao thông tỉnh Lai Châu và các đợt bổ sung năm 2024, 2025, ghi nhận 294 điểm trượt trên toàn tuyến (Hình 3.1). Nghiên cứu lựa chọn 14 yếu tố ảnh hưởng: độ cao, độ dốc, độ cong, hướng dốc, chỉ số độ ẩm địa hình (TWI), chỉ số sức mạnh dòng chảy (SPI), tích lũy dòng chảy (trích xuất từ mô hình số độ cao – DEM 12,5 m của USGS); chỉ số thực vật NDVI (ảnh Sentinel-2); lượng mưa trung bình năm và lượng mưa lớn nhất 24 giờ; địa chất và khoảng cách tới đứt gãy (bản đồ 1:200.000); khoảng cách tới đường và tới sông suối. Các lớp được đưa về cùng lưới 12,5 m. Phân tích tương quan Pearson với ngưỡng ±0,7 dẫn tới loại bỏ yếu tố khoảng cách tới đường, còn 13 yếu tố đưa vào mô hình.



Hình 3.1. Vị trí khu vực nghiên cứu và các điểm trượt

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

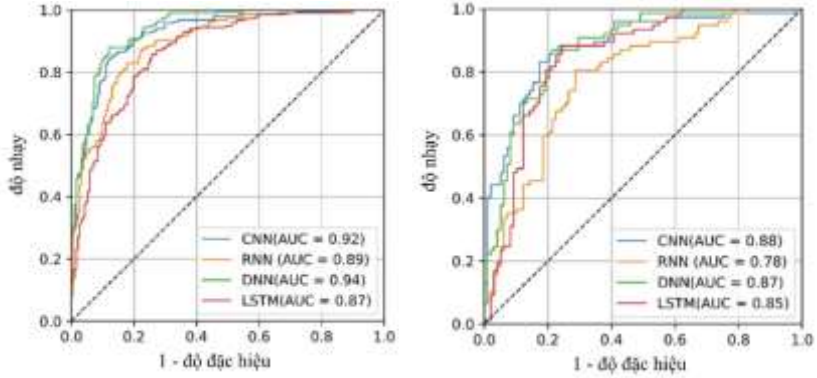
Quy trình nghiên cứu gồm 6 bước: (1) thu thập dữ liệu 294 điểm trượt và 13 yếu tố, đồng bộ lưới (12,5×12,5) m trong ArcGIS; (2) chia điểm trượt thành 70% (206 mẫu) để huấn luyện và 30% (88 mẫu) để kiểm chứng, kèm 294 điểm không trượt làm mẫu đối chứng; (3) xây dựng và huấn luyện bốn mô hình CNN, DNN, RNN, LSTM; (4) đánh giá hiệu suất bằng các chỉ số ở mục 2.1; (5) lập bản đồ 5 cấp nhạy cảm bằng mô hình có hiệu suất tốt nhất; (6) xác thực bản đồ bằng các điểm trượt không tham gia huấn luyện.

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

Bảng 3.2. Hiệu suất dự báo của mô hình AI

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

Ở giai đoạn đào tạo, DNN có ACC (87,47%), Kappa (0,748) và AUC (0,94) cao nhất, RMSE (0,125) thấp nhất; CNN đứng thứ hai (ACC 85,01%, Kappa 0,700, AUC 0,92). Ở giai đoạn xác thực, CNN có ACC (80,00%), Kappa (0,592) và AUC (0,88) cao nhất, RMSE (0,200) thấp nhất; DNN đạt ACC 79,43%, AUC 0,87; LSTM đạt ACC 75,43%, AUC 0,85; RNN thấp nhất với ACC 67,43%, Kappa 0,310, AUC 0,78 (Bảng 3.2, Hình 3.2).

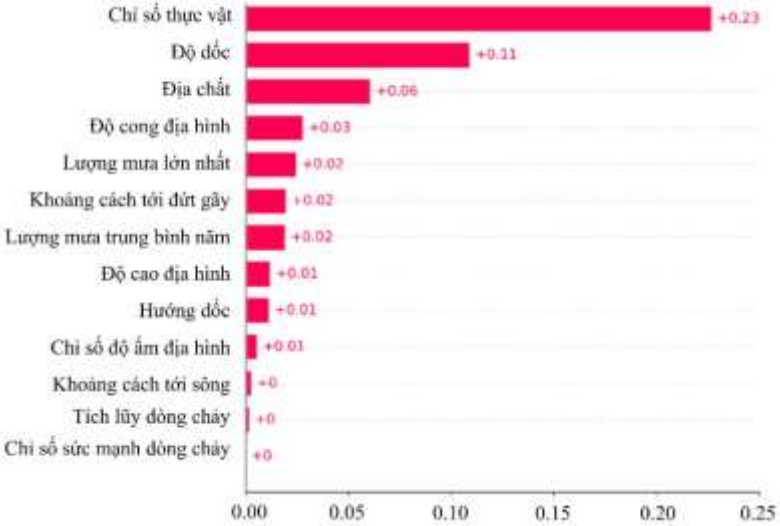


a) Giai đoạn đào tạo b) Giai đoạn xác thực

Hình 3.2. Phân tích AUC của các mô hình sử dụng nghiên cứu

Xét cả hai giai đoạn, CNN cho hiệu suất cân bằng và ổn định, được chọn để lập bản đồ phân vùng.

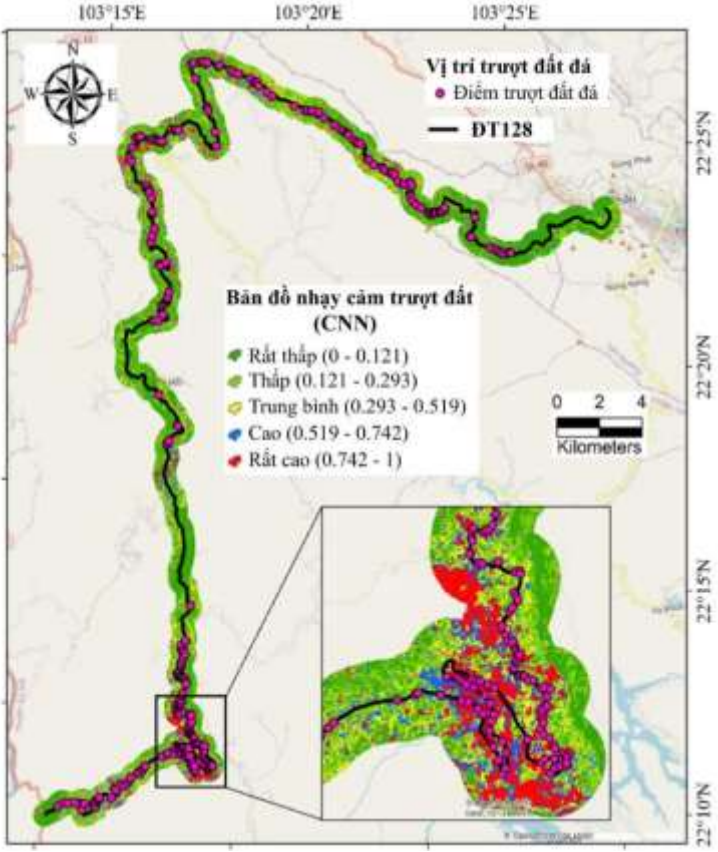
Phân tích SHAP (Hình 3.3) cho thấy chỉ số thực vật (giá trị SHAP trung bình 0,23) và độ dốc (0,11) có mức đóng góp thống kê lớn nhất vào kết quả dự báo của mô hình, tiếp theo là địa chất (0,06) và độ cong địa hình (0,03); các yếu tố còn lại, trong đó có lượng mưa lớn nhất và lượng mưa trung bình năm (0,02), có mức đóng góp thấp khi xét riêng lẻ. Các giá trị này phản ánh tương quan thống kê giữa yếu tố đầu vào và kết quả dự báo, không không đồng nghĩa với vai trò nguyên nhân vật lý trực tiếp gây mất ổn định sườn dốc. Đóng góp thấp của các yếu tố mưa chủ yếu do dữ liệu mưa mang tính khí hậu dài hạn, được chia ít lớp (2–4 lớp) và biến thiên không gian nhỏ trong hành lang tuyến hẹp, không có nghĩa mưa có vai trò kích hoạt thấp; chỉ số thực vật và độ dốc là yếu tố điều kiện nền, còn mưa lớn kéo dài là yếu tố kích hoạt quyết định thời điểm trượt.



Hình 3.3. Giá trị SHAP trung bình của các yếu tố đầu vào

Bản đồ phân vùng bằng CNN được chia thành năm cấp: 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). 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 3.4).



Hình 3.2. Bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất đá tuyến ĐT128

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

Kết quả khảo sát hiện trạng tháng 3/2024 ghi nhận 74 điểm trượt, theo phân loại Xavarensky có 2 điểm trượt bề mặt, 69 điểm TĐN (mặt trượt < 5 m) và 3 điểm trượt sâu, TĐN chiếm 93,25%.

Các điểm TĐN phân bố trong hầu hết các hệ tầng địa chất dọc tuyến với mật độ trung bình 3,45 điểm/km; trong đó hệ tầng Bó Hiềng ghi nhận số lượng lớn nhất với 34 điểm (49,3%), còn hệ tầng Bến Khế –

phụ hệ tầng dưới có mật độ lớn nhất đạt 5,5 điểm/km.

Các khối trượt chủ yếu có quy mô nhỏ (29,0%) đến trung bình (50,7%). Kiểu trượt phổ biến nhất là trượt phẳng chiếm 76,81%, trong khi trượt xoay chiếm 21,74% và thường xuất hiện tại các khu vực có tầng phủ phong hóa dày.

Hình dạng khối trượt chủ yếu dạng vòng cung (68,1%), tập trung nhiều trong hệ tầng Bó Hiềng và Bến Khế. Phần lớn các khối trượt có chiều cao lớn hơn 10 m chiếm 66,7% và phân bố trên các sườn dốc $(30–40)^0$, phản ánh mối liên hệ chặt chẽ giữa điều kiện địa hình dốc, địa chất phong hóa mạnh và sự phát sinh TĐN.

Hình thái mặt trượt chủ yếu là mặt trượt gần phẳng (76,81%). Ngoài ra, một số điểm trượt có mặt trượt cong và bậc thang nhưng chiếm tỷ lệ không đáng kể.

Trong hệ tầng Bó Hiềng (10,7 km dọc tuyến), khảo sát ghi nhận 6 điểm lộ (TD1–TD6) đánh dấu sự thay đổi thạch học giữa đá vôi, sét vôi, đá phiến sét, cát kết và bột kết, với lớp phong hóa là sét bột kết lẫn đá vụn; sự biến đổi này không thể hiện trên bản đồ 1:200.000. Trên cơ sở đó, luận án lập sơ đồ địa chất công trình tỷ lệ 1:20.000 thể hiện 69 điểm TĐN và chọn 8 vị trí đại diện để xây dựng mặt cắt chi tiết.

3.3.2. Mối liên hệ lượng mưa với trượt đất nông

Thống kê các sự kiện TĐN giai đoạn 2019–2024 cho thấy TĐN gắn chặt với mùa mưa; nhiều vị trí trượt lặp lại, điển hình tại km17+250 (khoảng 25.000 m^3 ngày 28/8/2019 và 15.500 m^3 ngày 08/8/2023). Phần lớn sự kiện xảy ra khi lượng mưa ngày từ mưa vừa đến mưa to, trong khoảng (30–100) mm; luận án đề xuất đây là khoảng ngưỡng mưa kích hoạt TĐN cho khu vực nghiên cứu.

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

Từ 69 điểm TĐN, 32 điểm được lấy mẫu đất tầng phủ thí nghiệm chỉ tiêu cơ lý; 6 vị trí đại diện các hệ tầng được phân tích thành phần hóa học và khoáng vật. Tầng phủ chủ yếu là sét, sét pha lẫn mảnh vụn đá sét bột kết hoặc đá phiến phong hóa và dăm sạn, trạng thái cứng đến nửa cứng, nguồn gốc tàn tích, có chỗ sườn tích; cấu trúc phân lớp không rõ ràng và không đồng nhất theo phương đứng và dọc tuyến.

Về khoáng vật, mica (muscovit + illit + phlogophit) chiếm (43–65)%, thạch anh (19–36)%, kaolinit (5–17)%. Về hóa học, SiO_2 chiếm (44,5–61,8)%, Al_2O_3 (19,8–23,5)% và Fe_2O_3 (5,9–10,2)%. Đối chiếu với các nghiên cứu về ảnh hưởng của mica tới sức chống cắt [159],

[131], theo đó tác động làm giảm sức chống cắt đã rõ rệt khi hàm lượng mica trên (10–20)%, nhất là khi đất bão hòa.

Hàm lượng hạt mịn (D < 0,08 mm) dao động (54,4–82,2)% (trung bình 65,1%), trong đó hạt sét (D < 0,002 mm) (10,6–38,0)% (trung bình 19,3%) và hạt bụi (33,8–56,0)% (trung bình 45,8%); các đường cong thành phần hạt có hình dạng tương đối đồng nhất, phản ánh nguồn gốc phong hóa tại chỗ. 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)%. Hệ số thấm bão hòa tại ba vị trí ĐT128-22, ĐT128-37, ĐT128-60 lần lượt là $1{,}10\times10^{-5}$; $0{,}97\times10^{-5}$ và $0{,}83\times10^{-5}$ m/s. Đất tầng phủ có hạt mịn chiếm ưu thế, giàu sét, khả năng giữ nước lớn và dễ suy giảm sức kháng cắt khi bão hòa; đặc điểm này phù hợp với mật độ TĐN cao và hiện tượng trượt lặp lại tại hệ tầng Bó Hiềng.

3.4. Nhận xét chương 3

Kết quả điều tra xác định TĐN là loại hình mất ổn định taluy nền đào chủ yếu trên các tuyến MNTB đã khảo sát, trong đó ĐT128 có mật độ trượt và tỷ lệ TĐN cao nhất. Phân vùng nguy cơ bằng AI, với mô hình CNN cho kết quả kiểm chứng tốt nhất, xác định đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ là khu vực tập trung nguy cơ cao. Trên đoạn này, TĐN chủ yếu dạng phẳng, quy mô trung bình, phát triển trong tầng phủ sét giàu mica, giàu hạt mịn – điều kiện vật liệu bất lợi khi bão hòa, làm cơ sở cho phân tích cơ chế ở Chương 4.

CHƯƠNG 4
TRƯỢT ĐẤT NÔNG VỚI ỔN ĐỊNH NỀN ĐƯỜNG ĐOẠN TUYẾN NGHIÊN CỨU ĐIỂN HÌNH

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

Đoạn tuyến dài 20 km là đường cấp IV miền núi (TCVN 4054-2005), nền rộng 7,5 m, mặt 5,5 m, lề tối thiểu 1,0 m (gia cố 0,5 m). Mái đào có hệ số mái m = 0,75 và m = 1, mặt đường bê tông nhựa trên lớp móng cấp phối đá dăm. Hệ thống thoát nước gồm rãnh dọc bê tông hoặc đá xây, hố thu và cống ngang; tại khe tụ thủy km14+100 và km11+800 bố trí cống hộp (1,5×1,5) m. Rãnh thường bị bồi lấp, gãy vỡ và cửa cống bị tắc khi có đất đá trượt. Các biện pháp đã áp dụng (tường rọ đá tại km17+250, nạo vét và sửa chữa rãnh, vá mặt đường) chủ yếu mang tính khôi phục trước mắt.

4.2. Phân tích trượt đất nông bằng mô phỏng số

Ba mặt cắt ĐT128-22, ĐT128-37 và ĐT128-60 được được chọn vì

đại diện điều kiện địa chất – địa kỹ thuật của hệ tầng Bó Hiềng và Bến Khế, có số liệu hình thái, địa hình UAV và mẫu đất, đồng thời nằm trong vùng nhạy cảm cao hoặc rất cao theo mục 3.2. Mặt cắt 2D được xây dựng từ DEM chụp bằng UAV, gồm lớp 1 là tàn tích và lớp 2 là đá; chiều dày tầng phủ (6–8) m. Các giả thiết chính: (i) do chưa có thí nghiệm xác định thông số hiệu dụng (c′, φ′), giá trị c, φ từ thí nghiệm cắt phẳng được dùng làm thông số sức kháng cắt đại diện, nên kết quả được dùng chủ yếu để phân tích xu thế biến đổi ổn định; (ii) thông số lớp 2 tham khảo TCVN 11823-2017; (iii) SWCC và hàm thấm được xác định gián tiếp từ thành phần hạt; (iv) do không có số liệu quan trắc, mực nước ngầm ban đầu được giả thiết ở sâu, gần đáy mặt cắt. Điều kiện biên là chuỗi mưa liên tục từ 02/8 đến 07/8/2023 theo dữ liệu vệ tinh GPM, lượng mưa (16–37) mm/ngày, ngay trước sự kiện trượt ngày 08/8/2023.

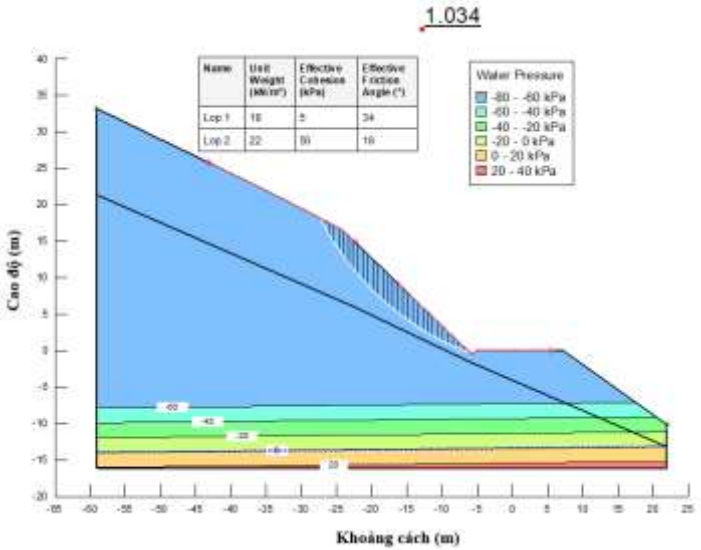
Bảng 4.1. Bảng tổng hợp các chỉ tiêu cơ lý của đất

Mặt cắt	Lớp đất	γ (kN/m^3)	c (kPa)	φ (^{0})	K (m/s)
ĐT128-22	Lớp 1	18	5,0	34,0	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	

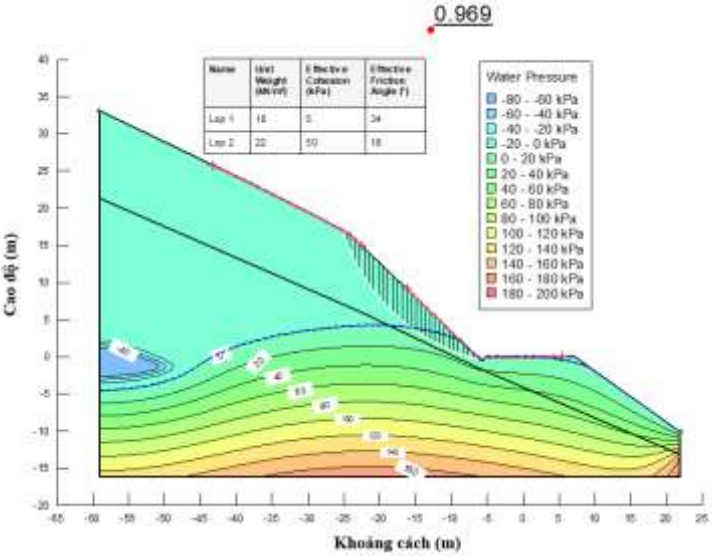
Tính toán ổn định mái dốc thực hiện theo hai trường hợp: điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa - tại thời điểm chưa xảy ra mưa và điều kiện sau chuỗi mưa - sau khi đất chịu tác động của chuỗi mưa. Kết quả tính toán tại mặt cắt ĐT128-37 được thể hiện trên Hình 4.1 và 4.2. Tổng hợp kết quả tính toán hệ số ổn định FS được tổng hợp trong Bảng 4.2.

Bảng 4.2. Bảng 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 4.1. Hệ số ổn định ở điều kiện ban đầu trước chuỗi mưa mặt cắt ĐT128-37



Hình 4.2. Hệ số ổn định ở điều kiện sau chuỗi mưa mặt cắt ĐT128-37

Trước chuỗi mưa, lớp phủ chủ yếu ở trạng thái không bão hòa với độ bão hòa Sr phổ biến (0,4–0,6); áp lực nước lỗ rỗng âm (−80 ÷ 0) kPa, tương ứng lực hút dính (0–80) kPa góp phần duy trì sức kháng cắt. Sau chuỗi mưa, Sr tăng lên phổ biến (0,90–0,98), cục bộ ≥ 0,995; vùng áp lực âm thu hẹp, ranh giới $u_w = 0$ dâng lên, áp lực nước lỗ rỗng dương ở vùng sâu tăng, tại mặt cắt ĐT128-37 có khu vực đạt (160–180) kPa. Hệ số ổn định giảm từ FS = (1,034–1,048) xuống FS = (0,941–0,991) (Bảng 4.2, Hình 4.1, Hình 4.2); mặt trượt nguy hiểm nằm trong lớp phủ phong hóa ở độ sâu khoảng (2–5) m, tương đồng với TĐN quan sát ngoài thực địa. Tại ĐT128-22 và ĐT128-37, FS giảm dưới 1 khi Sr phổ biến mới đạt (0,95–0,98), tức mất ổn định có thể xảy ra trước khi toàn bộ lớp phủ bão hòa hoàn toàn; ở ĐT128-60 (taluy thoải hơn), một số vùng đạt Sr ≥ 0,995 khi FS < 1. Kết quả mô phỏng cho thấy cơ chế TĐN chủ yếu do mưa kéo dài làm giảm lực hút dính, tăng độ bão hòa và áp lực nước lỗ rỗng, dẫn tới giảm sức kháng cắt; xu thế này phù hợp với các nghiên cứu của Huỳnh Thanh Bình (2023) [2] và Lương Nguyễn Hoàng Phương và nnk (2023) [24].

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 TĐN gây tràn lấp mặt đường và rãnh dọc, nước mưa bị ứ đọng hoặc chảy tràn qua mặt đường, làm gia tăng hư hỏng kết cấu áo đường. Kết quả khảo sát ghi nhận 45 vị trí hư hỏng mặt đường tương ứng với 69 điểm TĐN, trong đó bong bật lớp mặt chiếm tỷ lệ lớn nhất (65,2%), còn lún võng và nứt mép chiếm 2,9% cho mỗi dạng.

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

TĐN gây bồi lấp rãnh dọc, tắc cống ngang và phá hủy kết cấu rãnh. Điều tra tại 69 điểm TĐN ghi nhận 100% các điểm gây vùi lấp rãnh dọc và 35 điểm làm hư hỏng kết cấu rãnh thoát nước, chiếm 50,7%.

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

Khe cạn nghiên cứu cắt ĐT128 tại 4 vị trí: số 1 (km17+250), số 2 (km14+100), số 3 (km11+800) và số 4 (km10+300, nơi nền đường bị phá hủy và được thay bằng cầu). Từ đỉnh khe đến vị trí cầu, lòng khe dài khoảng 1,29 km, cao độ giảm từ 1.495 m xuống 965,5 m, gồm bốn phân đoạn dài 202,04 m; 522,72 m; 355,75 m và 210,09 m với độ dốc

trung bình tương ứng 65%, 25%, 50% và 98% (Hình 4.3). Dọc lưu vực có trên 10 vị trí đã và có nguy cơ tiếp tục trượt; các điểm TĐN ở thượng nguồn (km17+250) được xem là nguồn phát sinh vật liệu rời.



Hình 4.3. Địa hình phần khe cạn và vị trí một số điểm TĐN tạo vật liệu rời phạm vi nghiên cứu (ảnh UAV 11/2024)

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

Phân tích diễn biến mưa (dữ liệu GPM, đối chiếu với các trạm trong vùng) trong một tháng trước bốn sự kiện TĐN tại km17+250 (28/8/2019, 17/8/2020, 05/5/2021, 08/8/2023) cho thấy cả bốn sự kiện đều có giai đoạn mưa tiền định trước trận mưa kích hoạt: lượng mưa tích lũy khoảng (80–300) mm, thời gian thường trên (12–14) ngày, và trượt xảy ra đúng ngày hoặc ngay sau ngày mưa lớn đột xuất. Không sự kiện nào chỉ do mưa lớn đơn lẻ. Kết quả này nhất quán với cơ chế suy giảm lực hút dính từ mô phỏng SEEP/W ở mục 4.2, trong đó sự kiện 08/8/2023 được dùng làm điều kiện biên.

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

Tại km10+300, nền đường và cống ngang (hoàn thành cuối năm 2006) được khai thác bình thường đến 12/2017, khi thảm thực vật lưu

vực còn dày và chưa xuất hiện TĐN km17+250. Từ đợt mưa lũ năm 2018, TĐN phát triển ở thượng lưu, thảm thực vật suy giảm; ảnh vệ tinh giai đoạn 2017–2023 cho thấy vùng trượt phát triển từ dạng rẻ quạt (cao độ 1.495–1.580 m) thành hệ trượt phân nhánh với nhiều rãnh xói. Dòng chảy mang vật liệu rời đã phá hủy nền đường tại km10+300, dẫn tới việc xây dựng cầu bê tông cốt thép (BTCT), đưa vào sử dụng tháng 12/2021.

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

Địa hình sử dụng DEM độ phân giải 2,0 m chụp bằng UAV tháng 1/2024. Vùng phát sinh được xác định là vùng hội tụ vật liệu từ các TĐN liên tiếp tại đỉnh khe (độ dốc khoảng 45°), với hai kịch bản chiều dày vật liệu H = 10 m và H = 15 m. Giá trị ban đầu $\mu = 0,1$ (ước lượng theo $\mu \approx \tan 6° \approx 0,105$ của vùng lắng đọng) và $\xi = 200$ m/s² (dòng sệt – bùn, phù hợp tầng phủ giàu hạt mịn) được hiệu chỉnh theo lưới thử ($\mu \pm 0,05$; $\xi \pm 50$ m/s²), so sánh với chiều cao bồi lắng quan sát tại vị trí số 3 (3–4 m) và vị trí cầu (2–3 m). Bộ thông số phù hợp nhất là $\mu = 0,15$, $\xi = 200$ m/s² (H = 10 m) và $\mu = 0,2$, $\xi = 250$ m/s² (H = 15 m). Phân tích độ nhạy với H = 10 m, $\mu = 0,10–0,25$ và $\xi = 200–350$ m/s² cho vận tốc tại vị trí cầu (7,5–9,1) m/s và áp lực (190–221) kPa, tức biến động (14,0–17,6)% trên toàn miền khảo sát và (2,0–3,8)% trong lân cận bộ thông số đã hiệu chỉnh.

Bảng 4.3. Kết quả mô phỏng RAMMS tại 4 vị trí khe cạn cắt qua ĐT128

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 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

Để đánh giá kết quả, luận án tham chiếu các ngưỡng áp lực từ nghiên cứu khác: nền đường bắt đầu hư hỏng khi áp lực từ 30 kPa và

xác suất phá hủy cục bộ tăng đáng kể khi trên 50 kPa [137]; 100 kPa được đề xuất là ngưỡng phá hủy nền đường không có biện pháp bảo vệ [114] và là ngưỡng tới hạn gây tổn hại nghiêm trọng đối với kết cấu kiên cố như cống hộp, mố cầu [182]. Luận án lấy khoảng 100 kPa làm mốc nguy hiểm. Đối chiếu với Bảng 4.3: tại vị trí số 1, áp lực 674 kPa và 560 kPa, vận tốc 18 m/s và 16,5 m/s, vượt xa ngưỡng, phù hợp với hiện trạng nền đường bị phá hủy nhiều lần từ 2018; tại vị trí số 2, áp lực chỉ (30–70) kPa, thực địa cho thấy vị trí này ít bị ảnh hưởng hơn do đoạn từ vị trí 1 đến vị trí 2 (độ dốc 25%) phân tán động năng; tại vị trí số 3, áp lực 161 kPa và 130 kPa vượt ngưỡng, thực tế ghi nhận tắc cống ngang, hư hỏng một phần nền đường và lấp mặt đường; tại vị trí cầu km10+300, áp lực 200 kPa và 184 kPa, vận tốc (7,5–8) m/s, bồi lắng (2,5–3,5) m, đủ khả năng phá hủy lớp đất đá bảo vệ móng mố, trụ và gây xói lòng khe, phù hợp với hiện trạng xói lở từ năm 2022.

4.4.5. Trượt đất nông với dòng chảy tạm trên khe cạn khi mưa lớn với ổn định công trình cầu km10+300

Sau khi cầu đi vào khai thác, TĐN km17+250 tiếp tục tái trượt (đặc biệt ngày 08/8/2023), cung cấp vật liệu cho dòng chảy lòng khe, gây xói mòn, sụt trượt mái dốc dưới cầu và taluy âm hạ lưu, hư hỏng kết cấu bảo vệ mố M1, lún và nứt mặt đường sau mố. Khảo sát tháng 11/2024, sau mưa lũ tháng 8–9/2024, ghi nhận lòng khe bị xói sâu, lộ đáy móng tường chắn trước mố M1, lộ bệ móng trụ T1 và xuất hiện vết nứt ngang cọc nhồi trụ T1. Từ 02/2024 cầu bị hạn chế lưu thông trong mùa mưa bão; từ 08/2025, theo thông báo của Sở GTVT Lai Châu, cầu cấm ô tô, chỉ cho xe máy và người đi bộ qua.

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 trong phạm vi nghiên cứu điển hình

Đánh giá dựa trên hiện trạng các sự kiện thực tế đối với một vị trí TĐN (km17+250): tại vị trí số 1, nền đường bị phá hủy và lấp đất khoảng 60 m, khối lượng đất đá cần dọn khoảng 10.000 m³; vị trí số 2 khoảng 3.000 m³; vị trí số 3 khoảng 2.000 m³ và mặt đường bị bong bật; cầu km10+300 được đánh giá khó sửa chữa do chi phí tương đương xây mới, cần thay bằng cầu mới với khoảng 2 km đường dẫn hoặc chuyển sang tuyến mới dài (15–17) km. Tính theo suất vốn đầu tư (Quyết định 816/QĐ-BXD ngày 22/8/2024) và các quy định hiện hành, tổng thiệt hại ước tính khoảng 180 tỷ đồng, trong đó chi phí xây

dựng 153,6 tỷ đồng. Thiệt hại về người, phương tiện và do gián đoạn giao thông không được xem xét trong luận án.

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

4.6.1. Nhóm giải pháp phòng chống trượt đất nông

Căn cứ cơ chế mất ổn định do tăng áp lực nước lỗ rỗng và suy giảm lực hút dính, giải pháp phòng chống TĐN cần kết hợp đồng bộ thoát nước (rãnh đỉnh, bậc nước, lỗ khoan thoát nước nghiêng), gia cố sâu và bảo vệ bề mặt. Luận án đề xuất 8 giải pháp chia hai nhóm. Nhóm kết cấu truyền thống gồm đinh đất kết hợp khung BTCT với lớp chống xói bề mặt bằng: (1) đá xây; (2) bê tông phun; (3) tấm bê tông đúc sẵn có hoặc không có lỗ trồng cỏ; (4) trồng cỏ truyền thống. Nhóm sinh thái công nghệ mới gồm: (5) đinh đất, khung BTCT, có hoặc không có lưới thép, phun bùn kết hợp hạt cỏ; (6) tương tự nhưng phun hỗn hợp hạt cỏ với chất kết dính (hydroseeding); (7) đinh đất, khung BTCT, lưới thép và lưới chống xói 3D polime độ bền cao; (8) đinh đất kết hợp lưới thép cường độ cao tích hợp lưới chống xói 3D, thay cho khung BTCT. Thông số tham khảo: lỗ khoan đường kính khoảng 110 mm, thép gân (25–40) mm bơm vữa xi măng, đinh dài 7,5 m, ô khung từ (2×2) m đến (3×3) m.

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

Để giảm động năng dòng chảy tạm trên khe cạn, luận án đề xuất 2 biện pháp ngăn giữ vật liệu rời: (1) tường rọ đá có cửa thoát nước, dùng rọ thép mạ nhôm kẽm bọc PVC, các tầng rọ bố trí không liên tục, cứ 2 m có khoảng hở 50 cm để thoát nước và giữ hạt thô; kết cấu này được triển khai tại phân đoạn 2 và 3 của khe cạn nghiên cứu từ 10/2024, bước đầu cho thấy hiệu quả giảm tác động của dòng chảy lòng khe tới nền đường và đã được áp dụng rộng rãi; (2) hàng rào lưới thép cường độ cao (cường độ kéo đứt tối thiểu 1.770 MPa), bố trí sau tường rọ đá để giữ vật liệu kích thước nhỏ hơn. Các giải pháp dừng ở mức đề xuất nguyên lý và xác định cơ sở tải trọng thiết kế.

4.7. Nhận xét chương 4

TĐN ảnh hưởng tới nền đường theo hai cơ chế: trực tiếp, qua tràn lấp, hư hỏng mặt đường và hệ thống thoát nước; gián tiếp, qua việc cung cấp vật liệu rời làm tăng động năng dòng chảy trên khe cạn. Kết

quả mô phỏng SEEP/W – SLOPE/W và RAMMS, trong phạm vi các giả thiết đã nêu, phù hợp với hiện trạng hư hỏng quan sát được và là cơ sở đề xuất các nhóm giải pháp.

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 taluy nền đường đào chủ yếu, chiếm 88,02%. Tuyến ĐT128 (Lai Châu) 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 chọn nghiên cứu điển hình.

Trên cơ sở 294 điểm trượt và 13 yếu tố ảnh hưởng dọc tuyến ĐT128, bốn mô hình học sâu (CNN, RNN, DNN, LSTM) đã được xây dựng để dự báo nguy cơ trượt đất đá; CNN cho hiệu suất cao nhất ở giai đoạn kiểm chứng (AUC 0,88; ACC 80%; AUC huấn luyện 0,92) và được dùng lập bản đồ phân vùng. 18% phạm vi tuyến thuộc mức nhạy cảm cao và rất cao; đoạn Chăn Nưa – Sìn Hồ dài 20 km được chọn nghiên cứu chi tiết.

Đoạn tuyến điển hình có 69/74 điểm TĐN (93,25%), tập trung tại hệ tầng Bó Hiềng (49,3%); quy mô trung bình chiếm 50,7%; chiều cao khối trượt phổ biến trên 10 m (66,7%); xảy ra chủ yếu trên sườn dốc (30–40)° (58,0%); mặt trượt chủ yếu gần phẳng (76,81%). Đất tầng phủ là sét phong hóa giàu mica (43–65)%, hàm lượng hạt mịn (54,4–82,2)% và chỉ số dẻo IP = (11–28)%.

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.

TĐN từ taluy dương vừa gây hư hỏng trực tiếp nền mặt đường (bong bật lớp mặt 65,2%; hư hỏng rãnh 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. Mô phỏng RAMMS cho áp lực dòng chảy tại vị trí số 1, số 3 và cầu km10+300 vượt ngưỡng tham chiếu 100 kPa, phù hợp với hiện trạng hư hỏng, phá hủy đã ghi nhận.

Luận án đề xuất 8 giải pháp công trình phòng chống TĐN và 2 biện pháp ngăn giữ vật liệu rời; theo luận án, các giải pháp có cơ sở khoa học để mở rộng áp dụng cho các tuyến có điều kiện tương tự ĐT128

trên địa bàn MNTB, sau khi được thiết kế chi tiết và kiểm chứng thêm.

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

Các kết luận mang tính điển hình cho ĐT128 (Lai Châu). So với nghiên cứu TĐN do mưa ở vùng khí hậu tương đồng (Durmaz và nnk, 2023), cơ chế hai giai đoạn mưa tiền định – mưa kích hoạt có nét tương đồng, song tầng phủ giàu hạt mịn và không đồng nhất là điểm khác biệt, nên kết quả cần hiệu chỉnh, kiểm chứng khi áp dụng cho khu vực khác. Mô hình phân vùng dùng DEM 12,5 m và bản đồ địa chất 1:200.000, chưa phản ánh đầy đủ điều kiện chi tiết dọc hành lang tuyến hẹp; cỡ mẫu 294 điểm trên 90 km còn hạn chế, tiềm ẩn nguy cơ quá khớp cục bộ. Mô hình SEEP/W – SLOPE/W đơn giản hóa 2D, dùng mưa ngày; thông số c, φ từ thí nghiệm cắt phẳng nhanh không cố kết (TCVN 4199:1995) phản ánh ứng suất tổng, chưa phải c′, φ′; mực nước ngầm ban đầu là giả thiết. Mô hình RAMMS dựa trên 2 vị trí kiểm tra thực địa và giả thiết vật liệu đồng nhất, chưa xét sự phân lớp vật liệu. Các giải pháp mới ở mức nguyên lý, chưa thiết kế kỹ thuật chi tiết và kiểm toán kết cấu.

4. Kiến nghị

Tích hợp bản đồ phân vùng nguy cơ trượt đất vào quy hoạch tuyến và thiết kế đường mới; xem xét đầy đủ yếu tố địa chất công trình, tầng phủ phong hóa và khe tụ thủy khi khảo sát, thiết kế, lựa chọn hướng tuyến; tăng cường kiểm tra, duy tu hệ thống thoát nước, gia cố mái dốc và kiểm soát vật liệu rời tại các khe cạn ở khu vực có nguy cơ TĐN cao dọc ĐT128, nhất là trong mùa mưa; xây dựng hệ thống theo dõi, cảnh báo sớm dựa trên lượng mưa tích lũy nhiều ngày; đầu tư nâng cấp dữ liệu nền (DEM độ phân giải cao từ LiDAR, UAV và bản đồ địa chất công trình chi tiết).

5. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Mở rộng khảo sát, đánh giá TĐN trên nhiều tuyến GTMN có điều

kiện tương tự để kiểm chứng kết quả; bổ sung dữ liệu mưa theo giờ và mô phỏng nhiều kịch bản cường độ – thời gian mưa nhằm xác lập đường cong ngưỡng phục vụ cảnh báo sớm; bổ sung DEM độ phân giải cao và bản đồ địa chất công trình tỷ lệ lớn để nâng cao độ tin cậy của bản đồ phân vùng; thí nghiệm cắt chậm cố kết hoặc ba trục CD để xác định c′, φ′ và lắp đặt piezometer quan trắc mực nước ngầm; thử nghiệm hiệu quả thực tế các giải pháp đề xuất và tích hợp hệ thống giám sát, cảnh báo sớm TĐN.

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