

MÔ HÌNH KHU DÂN CƯ AN TOÀN TRƯỚC SẠT LỞ VÀ LŨ QUÉT TRONG ĐÔ THỊ MIỀN NÚI CAO BẰNG:

TIẾP CẬN TÍCH HỢP ĐỊA CHẤT CÔNG TRÌNH VỚI DỮ LIỆU LỚN, IOT VÀ TRÍ TUỆ NHÂN TẠO

Model of Safe Settlement Against Landslides and Flash Floods in the Mountainous Urban Areas of Cao Bang province: An Integrated Approach of Engineering Geology, Big Aata, IoT, and AI

GS. TS. ĐỖ MINH ĐỨC¹, TS. DƯƠNG THỊ TOÀN¹, ThS. HOÀNG HẢI YẾN², ThS. ĐINH THỊ QUỲNH³

Tóm tắt: Sạt lở và lũ quét là thiên tai diễn ra hàng năm trong mùa mưa bão ở các vùng đất dốc Việt Nam nói chung, tỉnh Cao Bằng nói riêng gây nhiều thiệt hại nghiêm trọng về người và tài sản. Đây là thiên tai đa dạng về loại hình, diễn ra với tính bất đồng nhất cao theo cả không gian và thời gian. Với điều kiện địa hình, địa chất không thuận lợi, xây dựng mô hình khu định cư và đô thị hóa an toàn trên đất dốc gắn kết với phát hiện và cảnh báo sớm tai biến sạt lở, lũ quét ở tỉnh Cao Bằng đóng vai trò rất quan trọng trong bối cảnh biến đổi khí hậu. Trên cơ sở kết hợp các tri thức địa chất công trình, IoT, dữ liệu lớn và trí tuệ nhân tạo cho phép xây dựng mô hình định cư an toàn trên đất dốc gồm 3 hợp phần: (1) Xây dựng và tuân thủ các tiêu chí vùng định cư an toàn, (2) Xây dựng bộ công cụ dự báo, cảnh báo sớm cho hành động sớm và (3) Xác định lộ trình triển khai thực hiện phù hợp với điều kiện tự nhiên và kinh tế xã hội của từng địa phương.

Từ khóa: Địa chất công trình, định cư an toàn, lũ quét, sạt lở đất, trí tuệ nhân tạo.

Abstract: Landslides and flash floods are common natural disasters that occur during the rainy and stormy season in the sloping areas of Vietnam in general, and Cao Bang province in particular, causing severe damage to human lives and property. The disasters often occur with high heterogeneity in both space and time. Under the unfavorable

topographical and geological conditions, developing a model for safe settlements and urbanization on sloping lands, integrated with the detection and early warning of landslide and flash flood hazards in Cao Bang province, plays a crucial role in the context of climate change. Based on the combination of engineering geology knowledge, IoT, Big Data, and Artificial Intelligence, a safe settlement model on sloping lands can be developed comprising three components: (1) Developing and adhering to criteria for safe settlement zones; (2) Building a forecasting and early warning toolkit for early action; and (3) Determining an implementation roadmap suitable for the natural and socio-economic conditions of each locality.

Keywords: Artificial intelligence, engineering geology, flash floods, landslides, safe settlements.

Nhận bài ngày 18/01/2026, chỉnh sửa ngày 20/02/2026, chấp nhận đăng ngày 31/3/2026.

I. GIỚI THIỆU

Cao Bằng là một tỉnh miền núi biên giới nằm ở vùng Đông Bắc Việt Nam, nổi bật với cấu trúc tự nhiên vô cùng phức tạp và bị chia cắt mạnh mẽ. Địa hình chủ yếu là đồi núi, chiếm hơn 90% diện tích tự nhiên của tỉnh. Bề mặt địa hình bị chia cắt sâu sắc bởi hệ thống sông suối, tạo ra nhiều thung lũng hẹp, sườn dốc và đèo hiểm

trở. Địa hình có độ cao trung bình khoảng 200m - 300m so với mực nước biển. Về đặc điểm địa chất, tỉnh Cao Bằng có cấu trúc địa chất – kiến tạo phức tạp với sự phân bố đa dạng của nhiều loại đá. Phổ biến nhất là các loại đá trầm tích, đá vôi, cát kết và phiến thạch. Sự đa dạng này tạo nên nền tảng cho Công viên Địa chất Toàn cầu UNESCO Non Nước Cao Bằng, nơi bảo tồn những dấu tích cổ sinh học, đứt gãy địa chất và cảnh quan địa mạo có giá trị quốc tế. Bên cạnh đó, do sự hiện diện của các đứt gãy kiến tạo, kết hợp với lớp vỏ phong hóa dày và độ dốc lớn, kết cấu đất đá ở nhiều khu vực sườn núi khá kém bền vững. Điều này khiến tỉnh Cao Bằng cực kỳ nhạy cảm với các rủi ro thiên tai; đặc biệt, hiện tượng sạt lở đất và lũ quét là những thách thức lớn về mặt không gian cần được theo dõi liên tục trong mùa mưa.

Trường hợp điển hình là trong bão Yagi tháng 9 năm 2024. Dù bão Yagi (bão số 3, năm 2024) đã giảm cấp khi đi sâu vào đất liền, nhưng hoàn lưu của bão đã trút lượng mưa khổng lồ xuống các tỉnh miền núi phía Bắc. Cao Bằng trở thành một trong những khu vực chịu ảnh hưởng nghiêm trọng của thiên tai trong khu vực. Sạt lở đất và lũ quét diễn ra trên diện rộng đã cướp đi sinh mạng của hơn 50 người (bao gồm cả tử vong và mất tích). Đau lòng nhất là các thảm kịch sạt lở lấp vùi nhà cửa và phương tiện giao thông tại huyện Nguyên Bình (đặc biệt tại các xã

¹Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội

²Viện Các Khoa học Trái đất, Viện hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

³Viện Địa công nghệ và Môi trường

Email: ducdm@vnu.edu.vn

Yên Lạc, Ca Thành). Theo thống kê, mưa lũ đã làm tốc mái, sập đổ và ngập lụt hơn 1.700 ngôi nhà. Hàng loạt tuyến giao thông huyết mạch bị sạt lở, đứt gãy khiến nhiều khu dân cư bị cô lập hoàn toàn. Hàng nghìn hecta hoa màu mất trắng, trường học, trạm y tế và lưới điện bị tàn phá. Tổng thiệt hại kinh tế do bão Yagi gây ra tại tỉnh ước tính lên tới hơn 880 tỷ đồng.

Các loại hình sạt lở, lũ quét quy mô lớn đã và đang gây ra nhiều thiệt hại ở các vùng đất dốc Việt Nam nói chung, Cao Bằng nói riêng thời gian qua bao gồm: (1) Sạt lở quy mô lớn làm nghẽn dòng chảy và dẫn đến dòng lũ bùn đá, (2) Sạt lở quy mô lớn dạng dòng chảy, các khối trượt sâu sau khi bị kích hoạt (do mưa hoặc động đất) sẽ dịch chuyển thành dòng chảy. Nếu khối trượt dạng này đổ vào các nương xói, rãnh xói sẽ dịch chuyển rất xa, có trường hợp chảy dài đến vài km, (3) Sạt lở quy mô nhỏ đến trung bình trên diện rộng ở các khu tập trung dân cư có mức độ đô thị hóa cao trên đất dốc.

Từ thực tiễn khốc liệt như vậy cho thấy thiên tai ngày càng dị thường và khó lường. Đối với địa hình nhạy cảm như Cao Bằng, việc xác định chính xác các điểm đứt gãy, đánh giá dữ liệu không gian để sơ tán người dân khi có cảnh báo sớm là yếu tố sống còn để giảm thiểu thương vong là rất cần thiết và việc cấp thiết phải thực ngay. Bên cạnh đó, cần xây dựng và phát triển các giải pháp căn cơ, lâu dài với trọng tâm chiến lược cần được đặt vào việc xây dựng các khu định cư an toàn đồng bộ với bộ công cụ phù hợp để cảnh báo, hành động sớm dựa trên nền tảng các tri thức về địa chất công trình, dữ liệu lớn, hệ thống các cảm biến giám sát hiện trường (IoT) và trí tuệ nhân tạo.

II. VẬT LIỆU NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình khu dân cư tập trung an toàn

Nhật Bản rất thành công trong việc xây dựng xã hội có sức chống chịu cao, sẵn sàng ứng phó với thiên tai. Mô hình “Bokomi” - giảm thiểu rủi ro thiên tai dựa vào cộng đồng được coi là một cách tiếp cận bền vững duy nhất để thu hút cộng đồng tham gia các hoạt động giảm thiểu rủi ro và tăng cường hợp tác với chính quyền địa phương. Mô hình BOKOMI đầy mạnh ý tưởng “tự giúp bản thân” theo đó

người dân tự tìm cách bảo vệ bản thân, thực hiện các cuộc diễn tập giảm nhẹ rủi ro cũng như đẩy mạnh ý tưởng “giúp đỡ lẫn nhau” theo đó người dân bảo vệ thị trấn của mình cùng với cộng đồng và hàng xóm [5]. Chính quyền địa phương dựa trên đó, căn cứ vào thể mạnh của mình, đặc biệt là công nghệ, công nghệ thông tin để nâng cao tính tự giác, chủ động của người dân.

Trung Quốc là một trong những quốc gia chịu nhiều tác động và tổn thất do thiên tai gây ra, song cũng là quốc gia có bề dày lịch sử và kinh nghiệm về phòng chống thiên tai. Năm 2018, Trung Quốc đã nghiên cứu và cho triển khai thí điểm mô hình phòng chống thiên tai, giảm thiểu thiên tai cho 1.800 cụm dân cư để tiến tới nhân rộng ra cả nước. Các thành phần (chỉ tiêu) chính trong mô hình “phòng tai, giảm tai áp dụng cho cụm dân cư khu vực nông thôn” tại Trung Quốc bao gồm: i) Cơ sở hạ tầng; ii) Cơ chế chính sách; iii) Con người; iv) Công nghệ thông tin và v) Nguồn lực tài chính và khoa học công nghệ.

Trong hoạt động phòng chống thiên tai tại khu vực nông thôn của Philippines, việc sơ tán người dân đến nơi an toàn trước khi thiên tai xảy ra vẫn là một việc khó khăn. Do đó, kiến thức và kỹ năng về phòng chống thiên tai của người dân cần được nâng cao hơn nữa, tập trung vào 2 khía cạnh (1) Sẵn sàng phối hợp cùng lực lượng chức năng tham gia sơ tán và không chủ quan trước thiên tai; (2) Sẵn sàng và có kỹ năng, kiến thức để chuẩn bị trước thiên tai.

Từ những kinh nghiệm trong phòng chống thiên tai ở các nước trên thế giới, có thể thấy các yếu tố quan trọng cho một cộng đồng an toàn trước thiên tai bao gồm: (1) Cơ chế chính sách nhân lực; (2) Nguồn lực tài chính; (3) Cơ sở hạ tầng; (4) Nhân lực; (5) Công nghệ thông tin. Trên cơ sở địa chất công trình, công nghệ quan trắc, giám sát hiện trường bằng IoT, cơ sở dữ liệu lớn và các mô hình tính toán, việc xác định khu định cư an toàn trên đất dốc cần thực hiện các nội dung gồm (1) Bộ tiêu chí xác định khu định cư an toàn, (2) Mô hình dự báo và cảnh báo sớm thiên tai sạt lở, lũ quét và (3) Triển khai ứng dụng cụ thể phù hợp với điều kiện kinh tế xã hội từng địa phương.

Để tăng cường khả năng chủ động ứng phó tai biến sạt lở, lũ quét, bộ tiêu chí cần được xây dựng được được đánh giá dựa trên các nhóm yếu tố điều kiện tự nhiên, lịch sử xảy ra tai biến sạt lở, lũ quét và các thiệt hại, đặc điểm hoạt động nhân sinh, mức độ nguy cơ tai biến, khả năng chống chịu tai biến, các yếu tố kích hoạt tai biến sạt lở, lũ quét) và sắp xếp theo các mức độ an toàn, ít an toàn và không an toàn theo bảng 1, cụ thể như sau:

Bảng 1. Đánh giá mức độ an toàn theo các nhóm yếu tố

TT	Yếu tố	An toàn	Ít an toàn	Không an toàn
1	Điều kiện tự nhiên			
1.1	Địa hình, địa mạo.	Bằng phẳng ít dốc	Dốc lồi, độ dốc =30-45°	Dốc lồi, độ dốc >45°
1.2	Mặt cắt ngang và độ mài dốc	Không phân bậc, thấp hơn 4m	Không phân bậc, cao 4-6m	Cao hơn 6m, có phân bậc
1.3	Đặc điểm thạch học	Đề từ	Bà trầm tích có thể nằm ngược hướng sườn dốc	Các phức hệ, đá mạch, trầm tích có thể nằm nghiêng và sườn dốc
1.4	Kiến tạo	Ít nứt nẻ	Nứt nẻ trung bình	Nứt nẻ mạnh
1.5	Vỏ phong hóa	Đất phong hóa mỏng	Trung bình	Đất phong hóa dày
1.6	Tính chất cơ lý của đất đá	Cứng chắc	Bà phong hóa	Đất bở rời
2	Lịch sử xảy ra tai biến sạt lở, lũ quét và các thiệt hại			
2.1	Tần suất	Không xảy ra	Ít xảy ra	>1 lần/năm
2.2	Cường độ tai biến	Không xảy ra	Trượt nhỏ	Trượt trung bình đến lớn
2.3	Mức độ thiệt hại do tai biến gây ra	Ít	Trung bình	Lớn
3	Các yếu tố đặc điểm hoạt động nhân sinh			
3.1	Khai đào mái dốc	Thấp hơn 3m, dốc < 45°	3-5 m, góc dốc < 45°	Cao hơn 5-6m, dốc > 45°
3.2	Vị trí công trình	Xa mái dốc, sông, suối	Lấn cận mái dốc	Gần mái dốc nguy hiểm, sông, suối
3.3	Hiện trạng sử dụng đất	Rừng phòng hộ	Các loại hình khác	Ven đường, mái dốc
4	Mức độ nguy cơ tai biến			
4.1	Mức độ	Thấp và Rất thấp	Trung bình	Cao và rất cao
4.2	Phạm vi chịu tác động	Bên ngoài	Lấn cận	Trong phạm vi
4.3	Mức độ tổn thương nếu xảy ra tai biến	Không	Ít	Cao
5	Khả năng chống chịu tai biến			
5.1	Đặc điểm cơ sở hạ tầng	Rất kiên cố	Ít được gia cố	Thông thường
5.2	Công trình hộ gia đình	Rất kiên cố	Ít được gia cố	Thông thường
5.3	Công tác dự báo, cảnh báo sớm	Tiếp cận kịp thời đầy đủ	Thông tin chưa thực sự đầy đủ	Không hoặc thông tin không đầy đủ
6	Yếu tố kích hoạt sạt lở, lũ quét	Mưa nhỏ (<20mm/h hoặc 120 mm/ngày)	Mưa nhỏ có thể kéo dài (20-50mm/h hoặc 120-180 mm/ngày)	Mưa lớn, mưa kéo dài (>50mm/h hoặc >180 mm/ngày)

Bên cạnh đó, cần lưu ý các dấu hiệu phát sinh sạt lở, lũ quét (sự phát triển, mở rộng khe nứt, sự hình thành hồ nước tự nhiên trên mái dốc...)

2.2. Khái quát về mô hình cảnh báo sớm

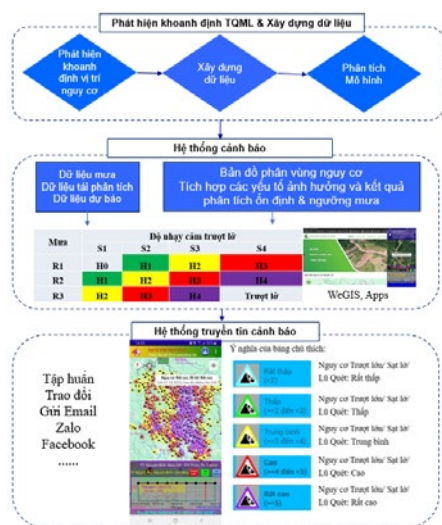
Mô hình cảnh báo sạt lở là hệ thống tích hợp cho phép dự báo hoặc phát hiện sớm nguy cơ sạt lở tại khu vực miền núi dựa trên điều kiện thủy-địa động lực học (mưa, quá trình thấm, thay đổi tính chất đất và sự biến dạng phá hủy địa hình). Một mô hình

cảnh báo thường bao gồm ba thành phần chính: (1) Hệ thống quan trắc và thu thập dữ liệu (trạm quan trắc mưa, cảm biến độ ẩm/áp suất lỗ rỗng, cảm biến chuyển vị); (2) Mô hình tính toán & đánh giá nguy cơ (mô hình thủy thấm, mô hình ổn định sườn, phân tích ngưỡng mưa gây trượt lở); (3) Hệ thống hiển thị và truyền thông tin cảnh báo trên các WEBGIS và Apps sử dụng trên điện thoại [3, 7].

Về cơ sở dữ liệu, hệ thống cảnh báo sạt lở sử dụng một kho dữ liệu không gian – thời gian gồm các lớp: Dữ liệu hiện trạng sạt lở, điều kiện tự nhiên và các yếu tố ảnh hưởng, bản đồ phân vùng nguy cơ và đặc biệt là dữ liệu dự báo mưa trước 5 ngày và theo thời gian thực. Ngoài ra hệ thống còn duy trì kho dữ liệu lịch sử sự kiện sạt lở ghi lại vị trí, thời điểm, quy mô tác động để hiệu chỉnh và đánh giá hiệu quả cảnh báo. Về hiển thị và cập nhật, mô hình cảnh báo sạt lở thường sử dụng giao diện WebGIS kết hợp hiển thị các điểm sạt lở hiện tại, lớp cảnh báo theo thời gian trước 5 ngày, theo thời gian thực từng giờ và các chỉ số cảnh báo (mức độ nguy cơ sạt lở, quy mô sạt lở, phạm vi ảnh hưởng) [3].

2.3. Quy trình và dữ liệu xây dựng mô hình cảnh báo

Hình 1 minh họa quy trình xây dựng và vận hành mô hình cảnh báo sạt lở đất trên nền tảng WebGIS và Ứng dụng trên điện thoại, bao gồm ba hợp phần chính: (1) Phát hiện khoanh định và xây dựng dữ liệu, (2) Hệ thống cảnh báo, (3) Hệ thống truyền tin cảnh báo.



Hình 1. Quy trình xây dựng mô hình và bộ công cụ cảnh báo

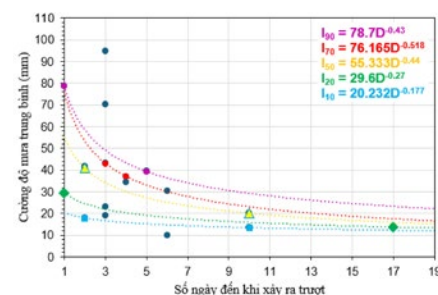
Trước hết, giai đoạn phát hiện – khoanh định sạt lở và xây dựng dữ liệu được thực hiện thông qua việc thu thập và tổng hợp thông tin đầu vào như kết quả điều tra, khảo sát thực địa, ảnh viễn thám, ảnh UAV và dữ liệu đo đạc chi tiết. Tiếp đó, các phương pháp phân tích thống kê, trí tuệ nhân tạo, phương pháp bản đồ, cùng với mô hình cơ học đất không bão hòa (GeoSlope, LS-Rapid) được sử dụng để xác định phạm vi sạt lở tiềm năng và xây dựng cơ sở dữ liệu đầu vào cho mô hình. Cơ sở dữ liệu này bao gồm các thông tin về điều kiện địa chất, bề dày vỏ phong hóa, đặc điểm dòng chảy, độ cao địa hình, hướng và độ dốc, phân cắt ngang, phân cắt sâu, mật độ sông suối, hệ số ẩm ướt, hệ số năng lượng dòng chảy và các yếu tố môi trường khác.

Tiếp theo, hệ thống cảnh báo được xây dựng dựa trên bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở, trong đó các yếu tố địa hình, địa chất, thủy văn và khí tượng được tích hợp với kết quả phân tích ổn định mái dốc và ngưỡng mưa gây sạt lở. Bảng độ nhạy cảm sạt lở được thiết lập để liên kết giữa cường độ mưa (R_1, R_2, R_3) và các cấp độ nhạy cảm (S_1-S_4), từ đó xác định mức cảnh báo nguy cơ theo thời gian thực, bao gồm các cấp: H0 (an toàn), H1 (nguy cơ thấp), H2 (trung bình), H3 (cao) và H4 (rất cao). Các thông tin cảnh báo sẽ hiển thị và cập nhật trên hệ thống WEBGIS và các Apps chạy trên điện thoại di động.

Trong quy trình trên thông tin các thông tin quan trọng sử dụng cảnh báo đó là: (i) Phân vùng nguy cơ sạt lở và (ii) dữ liệu mưa và ngưỡng mưa gây sạt lở. Việc phân vùng nguy cơ được xây dựng theo hướng tích hợp cả sạt lở quy mô lớn và sạt lở đất, nhằm phục vụ cảnh báo sớm bảo đảm phù hợp với yêu cầu thực tế. Các phương pháp thông dụng để thực hiện phân vùng nguy cơ là kết hợp giữa kinh nghiệm của các chuyên gia (phương pháp thứ bậc AHP), với phương pháp hồi quy logistic, mô hình tích hợp học máy và tính toán định lượng. Dữ liệu đầu vào cho các mô hình gồm điều kiện tự nhiên (địa chất, địa hình – địa mạo, địa chất thủy văn, địa chất công trình) và các hoạt động của con người. Trong đó phương pháp mô hình học máy tích hợp (RF+Bagging) là mô hình tốt nhất trong

3 mô hình. Trên cơ sở đó khu vực nghiên cứu được phân chia thành các mức độ cấp độ nguy cơ sạt lở hoặc mức độ nhạy cảm (S_1-S_4).

Điều kiện mưa bão là một trong những yếu tố kích hoạt, thúc đẩy các khối trượt. Ngưỡng mưa gây sạt lở là thông số quan trọng trong mô hình cảnh báo. Một trong phương pháp hữu hiệu để xác định ngưỡng mưa dựa vào phân tích dữ liệu thống kê lịch sử sạt lở và các sự kiện đã từng xảy ra trong từng khu vực theo điều kiện địa hình và tiểu vùng khí hậu [1, 2, 4, 6]. Ví dụ đối với khu vực Nguyễn Bình, để xác định ngưỡng mưa gây sạt lở đã thực hiện thống kê các sự kiện từ năm 2000 đến nay, dữ liệu mưa được cung cấp bởi các trạm đo của Tổng cục khí tượng thủy văn Việt Nam. Dữ liệu sạt lở được thu thập từ các nguồn thông tin trên các báo cáo thiệt hại do thiên tai của địa phương, trên các trang website và các nguồn tài liệu của các đề tài dự án đã thực hiện. Hình 2 thể hiện mối tương quan giữa cường độ–thời gian mưa ($I-D$) đối với các sự kiện sạt lở lớn tại khu vực Nguyễn Bình giai đoạn 2000 đến nay. Các đường cong biểu diễn các ngưỡng xác suất $I_{90}, I_{70}, I_{50}, I_{20}$ và I_{10} , tương ứng với điều kiện mưa mà trên đó lần lượt có 90%, 70%, 50%, 20% và 10% các sự kiện sạt lở đã được ghi nhận. Các đường cong này là cơ sở xác định đặc điểm gây sạt lở, trong đó I là cường độ mưa trung bình (mm/ngày) và D là thời gian mưa trước khi xảy ra sạt lở (ngày).



Hình 2. Cơ sở xác định ngưỡng mưa gây sạt lở từ dữ liệu mưa gây sạt lở thống kê

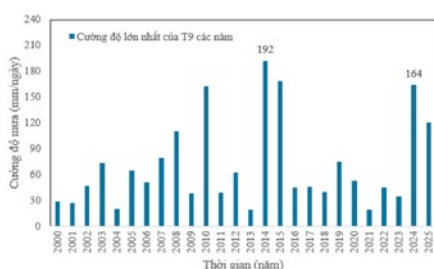
Xem xét đặc điểm mưa gây sạt lở lớn tại một số khu vực thuộc huyện Nguyễn Bình trong đợt bão Yagi năm 2024 cho thấy đây là một trong những đợt mưa có cường độ rất lớn và mang tính chất cực đoan tại khu vực nghiên cứu. Theo dữ liệu thống kê lượng mưa ngày trong tháng

9 từ năm 2000 đến nay (Hình 3), cường độ mưa ngày lớn nhất đạt 192mm/ngày, tương ứng với phân vị cực đại P1d100. Trong khi đó, lượng mưa ngày trong trận bão Yagi đạt 164 mm/ngày, lớn hơn đáng kể so với phân vị thứ 99 của chuỗi số liệu tháng 9 ($P_{1d99}=121$ mm/ngày). Điều này cho thấy trận mưa do bão Yagi thuộc nhóm các sự kiện mưa hiếm gặp, chỉ chiếm khoảng 1% trong tổng số các trận mưa tháng 9 trong chuỗi số liệu quan trắc.

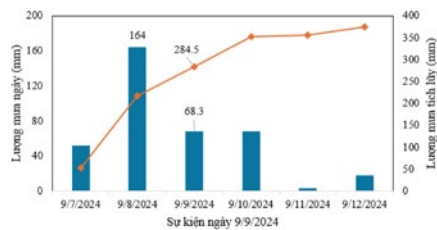
Xét trên toàn bộ dữ liệu mưa ngày của tất cả các tháng trong năm từ năm 2000 đến nay, giá trị cực đại đạt 207 mm/ngày (P1d100), trong khi phân vị thứ 99 là 78 mm/ngày. So sánh với các giá trị này cho thấy cường độ mưa của bão Yagi vẫn nằm trong nhóm phân vị khoảng 1% lớn nhất của chuỗi số liệu.

Như vậy, trận mưa do bão Yagi tháng 9/2024 có thể được xem là một sự kiện mưa cực đoan, đóng vai trò là tác nhân chính kích hoạt các trận sạt lở tại khu vực nghiên cứu. Diễn biến lượng mưa trong trận bão này được thể hiện trên Hình 4, cho thấy cường độ mưa cực đại xảy ra vào ngày 8/9, trong khi các hiện tượng sạt lở bắt đầu xuất hiện từ ngày 8/9 và đặc biệt xảy ra mạnh vào rạng sáng ngày 9/9. Điều này cho thấy đây là trận mưa ngắn ngày nhưng có cường độ rất lớn, có khả năng kích hoạt sạt lở ngay trong quá trình mưa lớn, mưa cực đoan và sau đó.

Việc phân tích đặc điểm hình thái của các trận mưa cực đoan như sự kiện bão Yagi, kết hợp với các đường cong cường độ-thời gian của các trận mưa đã ghi nhận trong lịch sử (Hình 2), cung cấp cơ sở quan trọng để xác định ngưỡng mưa và xây dựng hệ thống cảnh báo sạt lở hiệu quả và đáng tin cậy hơn cho khu vực nghiên cứu.



Hình 3. Dữ liệu cường độ mưa lớn nhất của tháng 9 các năm từ 2000 đến nay



Hình 4. Diễn biến trận mưa Yagi tháng 9/2024

2.4. Hệ thống WEBGIS và Apps ứng dụng trên điện thoại

Hệ thống truyền tin cảnh báo đóng vai trò truyền tải kết quả đến người sử dụng thông qua nền tảng WebGIS, Apps trên điện thoại. App “Sạt lở Việt Nam” đã được phát triển dựa trên dữ liệu thu thập và khảo sát cập nhật trong nhiều năm, ứng dụng “Sạt lở Việt Nam” không chỉ cảnh báo cho khu vực nghiên cứu mà cảnh báo cho các khu vực miền núi khác trên toàn quốc. Ứng dụng “Sạt lở Việt Nam” hỗ trợ cả IOS và Android. Ứng dụng có các tính năng sau: (1) Cảnh báo đa thiên tai: Trượt lở, Sạt lở, Lũ quét và Mưa lớn. (2) Cập nhật liên tục 20 phút/lần (3) Chi tiết đến các xã (cũ) trong toàn quốc. Có thể xem các thông tin hướng dẫn trong video trên Youtube hoặc website <https://truotlo.com>.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phát hiện sớm các vị trí có nguy cơ sạt lở

Trong điều kiện thực tiễn của tỉnh Cao Bằng, giải pháp trước mắt cần thành lập hệ thống các bản đồ và cơ sở dữ liệu về rủi ro và kịch bản ứng phó phục vụ quản lý, kiểm soát rủi ro sạt lở, lũ quét nói riêng, tai biến thiên nhiên nói chung trên các vùng đất dốc. Từ đó khoanh định được các khu vực có rủi ro cao.

Bên cạnh các giải pháp chủ động phòng chống thiên tai trong mùa mưa bão, đối với dạng địa tai biến về sạt lở, lũ bùn đá, lũ quét cần lưu ý điểm quan trọng nhất là cần chủ động rà soát dọc các suối nhánh, dòng chảy để phòng ngừa hiện tượng sạt lở hay cây gãy đổ gây nghẽn dòng chảy. Lưu ý, trên một dòng chảy có thể có một hay nhiều điểm nghẽn.

Chủ động phát hiện các dấu hiệu phát sinh khối trượt quy mô lớn như các khe nứt kéo dài trên mái dốc. Cần lưu ý, một số khe nứt sẽ không dẫn ngay đến sạt lở. Các hoạt động trên đất dốc có thể xóa

nhòa dấu vết của khe nứt, nhưng một khi đã xuất hiện khe nứt, mái dốc sẽ không thể tự “liền lại” được nữa và nguy cơ sạt lở luôn tiềm ẩn.

Tiếp theo cần có cảnh báo và hành động sớm:

(1) Mưa là yếu tố chủ yếu kích hoạt sạt lở. Các hệ thống quan trắc mưa hiện tại cần có mật độ cao hơn, đồng thời nghiên cứu ứng dụng và bổ sung các hệ thống trang thiết bị phát hiện sớm mưa lớn cực đoan;

(2) Các hệ thống quan trắc chuyên sâu về biến dạng địa hình, địa kỹ thuật, địa chất thủy văn hay dịch chuyển của mái dốc; nâng cao độ chính xác công tác dự báo qua ứng dụng phân tích dữ liệu lớn và trí tuệ nhân tạo;

(3) Tăng cường truyền thông thông tin cảnh báo sớm, đảm bảo chính quyền các cấp, đặc biệt là người dân trong vùng bị tác động của sạt lở nắm bắt thông tin kịp thời, chính xác và hiểu rõ các hành động cần triển khai khi có yêu cầu.

(4) Khi rủi ro sạt lở đạt đến mức rủi ro cấp 1 theo nghị định của Chính phủ, chính quyền địa phương cần hạn chế người và phương tiện lưu thông lân cận các khu vực nguy cơ cao, tới rủi ro cấp 2 và cao hơn, cần cấm các phương tiện lưu thông qua các khu vực nguy cơ cao; di chuyển dân trong khu vực nguy cơ cao đến nơi an toàn và chỉ quay lại khi không còn cảnh báo nguy cơ sạt lở.

(5) Phát huy hiệu quả vai trò của các cán bộ cơ sở xã, thôn, các tổ đội xung kích phòng tránh thiên tai, như phát hiện sớm các dấu hiệu sạt lở, các khu vực suối, dòng chảy bị ách tắc, nghẽn dòng để kịp thời ứng phó.

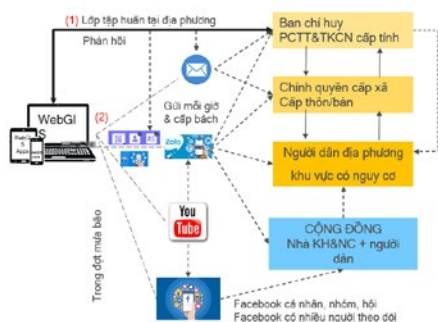
(6) Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, chính quyền và người dân cần chuẩn bị kịch bản ứng phó cho những tình huống cực đoan khó khăn nhất có thể xảy ra.

3.2. Các hình thức truyền thông tin cảnh báo

Để việc phòng chống thiên tai và cảnh báo được hiệu quả thì các thông tin ứng dụng và cảnh báo phải được tiếp cận tới địa phương và người dân một cách kịp thời (Hình 5). Một số hoạt động cần thực hiện để triển khai hiệu quả hệ thống cảnh báo gồm: (1) Truyền thông trực tiếp và (2) Truyền thông trực tuyến (online) nhằm

tiếp cận hiệu quả và mở rộng bao phủ của mạng lưới cảnh báo.

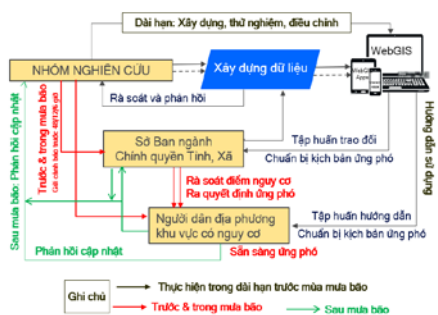
(1) Hình thức trực tiếp được thực hiện thông qua các buổi làm việc với chính quyền địa phương, hội thảo chuyên đề và các lớp tập huấn cộng đồng tại khu vực có nguy cơ sạt lở. Tại đây, giới thiệu cơ chế hoạt động của hệ thống WebGIS cảnh báo, hướng dẫn người dân và cán bộ địa phương cách truy cập, đọc bản đồ và phản hồi thông tin khi có tình huống bất thường. Các ý kiến góp ý và phản hồi từ cộng đồng được tổng hợp để điều chỉnh giao diện và nội dung cảnh báo cho phù hợp thực tế.



Hình 5. Quy trình truyền tin cảnh báo

(2) Hình thức online được triển khai thông qua hệ thống truyền tin đa phương tiện, bao gồm Email, Zalo, Facebook, YouTube và mạng điện thoại di động. Dữ liệu cảnh báo được cập nhật tự động từ WebGIS và gửi đi theo chu kỳ mỗi giờ hoặc ngay khi xuất hiện tín hiệu nguy cơ cao. Hệ thống tận dụng các kênh mạng xã hội có lượng người theo dõi lớn và nhóm Zalo cộng đồng để lan tỏa nhanh thông tin cảnh báo đến người dân vùng có nguy cơ, đồng thời kết nối ngược lại phản hồi từ hiện trường về trung tâm điều hành.

Trên cơ sở kết quả thử nghiệm thực tế và các phản hồi trong mùa mưa bão 2025 tại một số địa phương, nghiên cứu này đề xuất quy trình vận hành và cập nhật hệ thống cảnh báo sạt lở theo hướng liên thông giữa các bên tham gia, được thể hiện trong Hình 6 dưới đây.



Hình 6. Đề xuất nâng cao hiệu quả của mô hình và hệ thống truyền tin cảnh báo

Quy trình đề xuất được thiết kế gồm ba giai đoạn chính:

(1) Trước và trong mùa mưa bão: Rà soát, cập nhật, hiệu chỉnh dữ liệu nền (địa hình, địa chất, mưa, ngưỡng sạt lở) và chạy mô hình dự báo tự động trên WebGIS, App. Tập huấn và hướng dẫn sử dụng ứng dụng Web/App để chủ động theo dõi và chuẩn bị kịch bản phòng tránh.

(2) Trong quá trình mưa bão: Hệ thống hoạt động tự động, cập nhật cảnh báo mỗi giờ, đồng thời kết nối hai chiều giữa chính quyền – người dân – nhóm nghiên cứu. Thông tin được truyền qua email, Zalo, WebGIS và mạng xã hội để đảm bảo truyền tải nhanh, đa kênh và kịp thời.

(3) Sau mưa bão: Các bên tham gia tiến hành đánh giá lại hiệu quả cảnh báo, cập nhật các vị trí có sạt lở thực tế, thu nhận phản hồi từ địa phương để hiệu chỉnh ngưỡng mưa và dữ liệu đầu vào. Giai đoạn này đặc biệt quan trọng nhằm hoàn thiện cơ sở dữ liệu và nâng cao độ chính xác cho các mùa sau.

IV. KẾT LUẬN

(1) Với điều kiện địa hình, địa chất không thuận lợi, xây dựng mô hình khu định cư và đô thị hóa an toàn trên đất dốc gắn kết với phát hiện và cảnh báo sớm tai biến sạt lở, lũ quét ở tỉnh Cao Bằng đóng vai trò rất quan trọng trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

(2) Để ứng phó hiệu quả với thiên tai trên các vùng đất dốc, nhất là trong bối cảnh biến đổi khí hậu cần kết hợp các giải pháp trước mắt, trung hạn và dài hạn

hướng đến mục tiêu quản lý rủi ro và đảm bảo an toàn tính mạng, tài sản người dân.

3. Kết hợp các tri thức địa chất công trình, IoT, dữ liệu lớn và AI cho phép xây dựng mô hình định cư an toàn trên đất dốc gồm 3 hợp phần: (1) Xây dựng và tuân thủ các tiêu chí vùng định cư an toàn, (2) Xây dựng bộ công cụ dự báo, cảnh báo sớm cho hành động sớm và (3) Xác định lộ trình triển khai thực hiện phù hợp với điều kiện tự nhiên và kinh tế xã hội của từng địa phương trong tỉnh Cao Bằng.

Lương Thanh (BT)

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Aleotti, "A warning system for rainfall-induced shallow failures," Engineering Geology, vol. 73, no. 3–4, pp. 247–265, 2004.
- [2]. N. Caine, "The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows," Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, vol. 62, no. 1–2, pp. 23–27, 1980.
- [3]. M. Đ. Đức, T. T. Dương, Q. K. Đặng, M. Đ. Đào, and T. Q. Đình, "Dự báo, cảnh báo sớm tai biến trượt đất đá tại vùng đất dốc và kiến nghị áp dụng cho tỉnh Lâm Đồng," trong Hội thảo đánh giá thực trạng, nguyên nhân và giải pháp chống sạt trượt, ngập lụt cục bộ trên địa bàn tỉnh Lâm Đồng, Lâm Đồng, Việt Nam, 22 Sep. 2023.
- [4]. F. Huang, J. Chen, W. Liu, J. Huang, H. Hong, and W. Chen, "Regional rainfall-induced landslide hazard warning based on landslide susceptibility mapping and a critical rainfall threshold," Geomorphology, vol. 408, p. 108236, 2022.
- [5]. JICA Hyogo Disaster Reduction Learning Center and Kobe City Fire Bureau, BOKOMI Guide Book. Kobe, Japan, 2010.
- [6]. B. Peng and X. L. Wu, "Optimizing rainfall-triggered landslide thresholds for daily hazard warning in the Three Gorges area," Natural Hazards and Earth System Science, vol. 24, no. 11, pp. 3991–4013, 2024.
- [7]. Truotlo.com, "Hệ thống cảnh báo sạt lở đất," [Online]. Available: <http://truotlo.com>; <http://yenbai.truotlo.com>. [Accessed: 2025].

