BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ MÔI TRƯỜNG

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

LÊ VĂN THÌN

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH NGUY CƠ LŨ QUÉT CHO KHU VỰC MIỀN NÚI PHÍA BẮC VIỆT NAM

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội, 2026

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ MÔI TRƯỜNG

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

LÊ VĂN THÌN

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH NGUY CƠ LŨ QUÉT CHO KHU VỰC MIỀN NÚI PHÍA BẮC VIỆT NAM

Ngành: Thủy văn học

Mã số: 9 44 02 24

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

CÁN BỘ HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. GS.TS. Trần Đình Hòa
2. TS. Nguyễn Đăng Giáp

Hà Nội, 2026

LỜI CAM ĐOAN

Luận án này do chính tác giả thực hiện tại cơ sở đào tạo Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, dưới sự hướng dẫn của GS.TS. Trần Đình Hòa và TS. Nguyễn Đăng Giáp. Kết quả nghiên cứu trong luận án là của riêng tác giả và chưa được công bố trong các tài liệu trước đây. Mọi thông tin tham khảo từ các nguồn tài liệu đã được trích dẫn và ghi rõ nguồn theo đúng quy định.

Tác giả



Lê Văn Thìn

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin chân thành cảm ơn Cơ sở đào tạo Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam đã tạo điều kiện thuận lợi để tác giả thực hiện luận án theo đúng quy định của Bộ Giáo dục và Đào tạo và quy chế đào tạo của Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến Thầy hướng dẫn là GS.TS. Trần Đình Hòa và TS. Nguyễn Đăng Giáp đã dành nhiều thời gian của mình để hướng dẫn, chỉ dạy, động viên tác giả hoàn thành luận án này.

Tác giả xin chân thành cảm ơn ban lãnh đạo và các đồng nghiệp trong Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về động lực học sông biển đã luôn sát cánh, góp ý, trao đổi học thuật, động viên và giúp đỡ tác giả rất nhiều trong thời gian làm nghiên cứu sinh.

Tác giả xin chân thành cảm ơn các Thầy trong Bộ môn Thủy văn và Biến đổi khí hậu của Trường Đại học Thủy lợi đã tận tình góp ý và hướng dẫn thêm về chuyên môn cho tác giả trong quá trình nghiên cứu, các nhà khoa học từ Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, Trường Đại học Thủy lợi, Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển, Viện Cơ học, Viện các Khoa học trái đất, Trung tâm dự báo Khí tượng Thủy văn Quốc gia và các quý thầy, cô trong các hội đồng đã đóng góp nhiều ý kiến quý báu để tác giả hoàn thiện luận án.

Tác giả xin dành lời cảm ơn đặc biệt đến gia đình, người thân, bạn bè, đồng nghiệp đã luôn ủng hộ, động viên và tạo điều kiện giúp đỡ trong mọi hoàn cảnh để tác giả hoàn thành được luận án.

Tác giả



Lê Văn Thìn

MỤC LỤC

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU....3
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT....9
MỞ ĐẦU....1
Tính cấp thiết của luận án....1
Mục tiêu luận án....2
Câu hỏi nghiên cứu....3
Luận điểm bảo vệ....3
Đối tượng và phạm vi nghiên cứu....4
Các phương pháp nghiên cứu....4
Ý nghĩa khoa học và thực tiễn....4
Kết cấu luận án....5
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU VỀ LŨ QUÉT....6
1.1. Các khái niệm....6
1.2. Quá trình nghiên cứu lũ quét....13
1.3. Tổng quan nghiên cứu về các đặc trưng lũ quét....20
1.4. Tổng quan các phương pháp xác định nguy cơ lũ quét....26
1.5. Tổng quan các chỉ số xác định nguy cơ lũ quét....36
1.6. Tổng quan tình hình lũ quét và các nghiên cứu về lũ quét trên khu vực miền núi phía Bắc....44
1.7. Những vấn đề còn tồn tại tiếp tục nghiên cứu....48
1.8. Tiểu kết chương 1....52
CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CƠ SỞ KHOA HỌC XÁC ĐỊNH NGUY CƠ LŨ QUÉT CHO KHU VỰC MIỀN NÚI PHÍA BẮC....54
2.1. Cách tiếp cận, phương pháp nghiên cứu và kỹ thuật sử dụng....54
2.2. Xác định ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc....75
2.3. Kiểm chứng ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét với một số trận lũ quét đã xảy ra trên khu vực miền núi phía Bắc....93
2.4. Tiểu kết chương 2....98
CHƯƠNG 3. ÁP DỤNG THỬ NGHIỆM XÁC ĐỊNH NGUY CƠ LŨ QUÉT THEO KHÔNG GIAN VÀ THỜI GIAN CHO LƯU VỰC SÔNG NGHĨA ĐÔ....100

3.1. Giới thiệu khu vực nghiên cứu 100
3.2. Xây dựng mô hình thủy văn GIS cho lưu vực sông Nghĩa Đô 103
3.3. Xác định đặc trưng lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai 120
3.4. Xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét trận lũ ngày 09/09/2024 124
3.5. Xây dựng công cụ mô phỏng nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian 140
3.6. Đánh giá kết quả áp dụng thử nghiệm 145
3.7. Tiểu kết chương 3 150
KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ 152
Những kết quả đạt được 152
Những đóng góp mới 152
Tồn tại và kiến nghị 153
Các hướng nghiên cứu tiếp theo 154
DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ 155
TÀI LIỆU THAM KHẢO 156
PHỤ LỤC 179
Phụ lục I. Thuật toán xác định lưu vực tương ứng với điểm cửa ra 179
Phụ lục II. Dữ liệu lưu lượng lớn nhất qua các năm tại trạm thủy văn Vĩnh Yên 181
Phụ lục III. Danh sách các điểm lũ quét giai đoạn 2010÷2023 182

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1 - 1. Bảng so sánh các khái niệm, thuật ngữ sử dụng 11

Bảng 1 - 2. Vận tốc dòng chảy của một số trận lũ quét 22

Bảng 1 - 3. Tổng hợp thông tin một số trận mưa lớn nhất ở Hoa Kỳ theo Costa (1987) [7].....24

Bảng 1 - 4. Bản đồ ma trận và trọng số quyết định theo AHP [51] 27

Bảng 1 - 5. Điểm khác biệt của hệ thống trong luận án với hệ thống FFGS 51

Bảng 2 - 1. Bảng tra chỉ số CN đối với sử dụng đất nông nghiệp, vùng ngoại ô ứng với điều kiện độ ẩm kỳ trước là trung bình (CN2 và hệ số tổn thất ban đầu $\lambda = 0,2$) [141]62

Bảng 2 - 2. Xác định CN và S theo điều kiện độ ẩm AMC [142].....62

Bảng 2 - 3. Mô tả dữ liệu HYSOGs ở độ phân giải 250m [143] 63

Bảng 2 - 4. Đề xuất xem xét ngưỡng phân cấp mức độ lũ dựa trên công suất đơn vị ..79

Bảng 2 - 5. Phân cấp nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc.....81

Bảng 2 - 6. Hệ số thực nghiệm k theo các nghiên cứu.....85

Bảng 2 - 7. Chi tiết số liệu mặt cắt ngang sử dụng 87

Bảng 2 - 8. Thống kê đặc trưng chỉ số hình dạng mặt cắt (r) theo các suối.....89

Bảng 2 - 9. Thống kê đặc trưng tỉ số w_{bf}/h_{bf} (chỉ số k) theo các suối 89

Bảng 2 - 10. Tương quan xác định lưu lượng tràn bờ.....90

Bảng 2 - 11. Kết quả xác định hệ số trong công thức tính lưu lượng tràn bờ cho khu vực miền núi phía Bắc 91

Bảng 2 - 12. Kết quả khôi phục lưu lượng đỉnh lũ của một số trận lũ quét trên khu vực miền núi phía Bắc [133] 93

Bảng 2 - 13. Kết quả các tham số phục vụ xác định nguy cơ lũ quét của một số trận lũ trên khu vực miền núi phía Bắc.....95

Bảng 3 - 1. Một số thiệt hại lớn điển hình trên khu vực nghiên cứu 102

Bảng 3 - 2. Số liệu và nguồn số liệu sử dụng.....103

Bảng 3 - 3. Danh sách các trạm quan trắc mưa có số liệu trong khu vực nghiên cứu 104

Bảng 3 - 4. Quy đổi chỉ số CN từ nhóm đất thủy văn và sử dụng đất bề mặt.....109

Bảng 3 - 5. Tổng hợp các đại lượng cho lưu vực sông Nghĩa Đô..... 111

Bảng 3 - 6. Tổng hợp các tham số trận lũ phục vụ tính λ 115

Bảng 3 - 7. Số liệu sử dụng khôi phục đường quá trình lũ đơn vị 116

Bảng 3 - 8. Đối chiếu đặc trưng mặt cắt tại mực tràn bờ – trạm thủy văn Vĩnh Yên .122

Bảng 3 - 9. Quan hệ Q_{bf} và các đặc trưng 123
Bảng 3 - 10. Tổng hợp tham số phục vụ tính toán nguy cơ lũ quét lưu vực sông Nghĩa Đô 124
Bảng 3 - 11. Lưu lượng đỉnh, thời gian đạt đỉnh và tổng lượng dòng chảy tại trạm Vĩnh Yên, trận lũ ngày 09/09/2024 127
Bảng 3 - 12. Tổng hợp diễn biến lưu lượng dự kiến tại trạm Vĩnh Yên theo thời gian 135

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1 - 1. Chênh lệch biên độ lũ 2 trận lũ tại Nậm Lay [58] 18

Hình 1 - 2. Hình ảnh dòng chảy lũ quét cuốn trôi vật liệu tại Hồ Bốn, 2023 20

Hình 1 - 3. Công suất đơn vị dòng chảy và kích thước vật liệu bị đẩy trôi [28], đường nét đứt: quan hệ khái quát theo công thức (1-1).....21

Hình 1 - 4. Tác động của dòng chảy đến các đối tượng [71] 23

Hình 1 - 5. Đường lũ đơn vị của 2 lưu vực theo hình dạng [77].....25

Hình 1 - 6. Bản đồ tính nhạy cảm lũ quét bằng phương pháp AHP theo Tariq và cộng sự (2022) [51] 27

Hình 1 - 7. Bản đồ tính nhạy cảm lũ quét tỉnh Quảng Đông – Trung Quốc [50].....28

Hình 1 - 8. Bản đồ tính nhạy cảm lũ quét khu vực Xiqu Gully [86].....29

Hình 1 - 9. Kết quả xây dựng bản đồ tiềm năng lũ quét lưu vực Bâsca Chiojdului bằng phương pháp FR (bên trái) và WOE (bên phải) [87]. 30

Hình 1 - 10. Bản đồ nhạy cảm lũ quét lưu vực Sungai Pinang [88] 30

Hình 1 - 11. Bản đồ nhạy cảm lũ quét khu vực Wadi Ghoweiba [89] 31

Hình 1 - 12. Một tính toán FFPI cụ thể cho một khu vực theo Gregory Smith (2010) [115].....37

Hình 1 - 13. Ứng dụng chỉ số FFPI xây dựng bản đồ lũ quét tiềm tàng tỉnh Sơn La [118] 37

Hình 1 - 14. Chỉ số DFFHI cho lưu vực sông Wang ở Thái Lan [121] 39

Hình 1 - 15. Phương pháp đường tới hạn CL [67] 39

Hình 1 - 16. Xác định đường tới hạn CL ở Việt Nam [122] 40

Hình 1 - 17. Quan hệ R_t và I.....41

Hình 1 - 18. Sản phẩm của hệ thống FFGS.....43

Hình 1 - 19. Bản tin cảnh báo lũ quét của hệ thống VNOFFGS.....43

Hình 1 - 20. Hệ thống cảnh báo lũ quét theo SEAFFGS 44

Hình 1 - 21. Phân vùng lũ quét tỉnh Yên Bái bằng mô hình nơ-ron nhân tạo đa lớp....46

Hình 1 - 22. Kết quả điều chỉnh các khu vực sườn dốc trong nghiên cứu trước đây....47

Hình 1 - 23. Các vị trí ở đỉnh núi thể hiện nguy cơ lũ quét cao theo DFFHI [121].....49

Hình 2 - 1. Khung khái niệm xác định nguy cơ lũ quét 55

Hình 2 - 2. Sơ đồ tổng quát giải quyết bài toán xây dựng bản đồ nguy cơ.....56

Hình 2 - 3. Phương pháp xác định ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét.....57

Hình 2 - 4. Phương pháp xây dựng đường quá trình lũ tại một vị trí sử dụng phương pháp mô phỏng tổn thất SCS-CN kết hợp đường quá trình đơn vị 58
Hình 2 - 5. Mô hình tỷ lệ trong giả thuyết thứ nhất 59
Hình 2 - 6. Các đại lượng tổn thất trong SCS gồm: 59
Hình 2 - 7. Minh họa tổn thất thấm ban đầu (Ia) và tổn thất thấm liên tục (Fa) 60
Hình 2 - 8. Bản đồ thảm phủ khu vực miền núi phía Bắc năm 2023 của Esri.....61
Hình 2 - 9. Phân loại nhóm đất thủy văn theo USGS cho khu vực MNPB 64
Hình 2 - 10. Phân tích GIS trong thủy văn.....67
Hình 2 - 11. Phương pháp xác định độ dốc lòng dẫn tại điểm A 68
Hình 2 - 12. Sơ đồ thuật toán xác định độ dốc lòng dẫn tại mọi điểm.....69
Hình 2 - 13. Ví dụ xác định độ dốc lòng dẫn tại điểm A trên suối Nậm Bắt (lưu vực 62,68 km²).....70
Hình 2 - 14. Phân loại mô hình thủy văn [152].....71
Hình 2 - 15. Mô phỏng thủy văn cho từng điểm độc lập trong nghiên cứu.....72
Hình 2 - 16. Sơ đồ thuật toán xác định độ dốc lưu vực ô lưới tại mọi điểm.....73
Hình 2 - 17. Độ dốc riêng của ô lưới (Slope) và độ dốc lưu vực ô lưới (WSlope) tại ba điểm lồng nhau trên suối Nậm Bắt 74
Hình 2 - 18. Các trận lũ quét được thu thập trên khu vực miền núi phía Bắc từ năm 2010 đến năm 2023.....77
Hình 2 - 19. Một số hình ảnh mô tả vật liệu bị cuốn trong các trận lũ quét lớn thu thập trên khu vực miền núi phía Bắc.....78
Hình 2 - 20. Một số hình ảnh lũ quét ghi nhận lúc 15h45p ngày 5/7/2023 trên sông tại Pác Mjầu, huyện Bảo Lâm, tỉnh Cao Bằng 80
Hình 2 - 21. Hình ảnh người lội qua dòng nước lũ tại xã Mường Giàng, huyện Quỳnh Nhai, tỉnh Sơn La 2023 (trái) và tại Mù Cang Chải 2023 (phải).....80
Hình 2 - 22. Quy trình xác định nguy cơ lũ quét trong nghiên cứu cho một điểm 82
Hình 2 - 23. Khái quát hình thái lòng dẫn với hệ số hình dạng mặt cắt ngang (r) [160] 84
Hình 2 - 24. Sơ họa vị trí các mặt cắt được thu thập trong luận án phục vụ đánh giá hình thành mặt cắt ngang.....86
Hình 2 - 25. Xác định mặt cắt đơn vị để tìm đặc trưng r cho một mặt cắt điển hình ở khu vực thượng nguồn suối Nam Cường (Bó Lù), huyện Chợ Đồn, tỉnh Bắc Kạn.....88
Hình 2 - 26. Phân bố tỷ số k và hệ số hình dạng r của toàn bộ chuỗi số liệu 89

Hình 2 - 27. Trận lũ xảy ra tại Nậm Păm năm 2021 96
Hình 2 - 28. Trận lũ xảy ra tại Hồ Bốn năm 2023.....97
Hình 2 - 29. Hình ảnh nghi nhận của trận lũ tại Bản Lầu, Mường Khương [171] 98
Hình 2 - 30. Một số hình ảnh tại Lương Sơn, Bảo Yên đợt mưa lũ ngày 14/6/2022 [172] 98
Hình 3 - 1. Bản đồ khu vực nghiên cứu và các trạm quan trắc.....100
Hình 3 - 2. Bản đồ hướng dòng chảy khu vực nghiên cứu 105
Hình 3 - 3. Bản đồ tập trung dòng chảy khu vực nghiên cứu 106
Hình 3 - 4. Bản đồ chiều dài dòng chảy khu vực nghiên cứu 107
Hình 3 - 5. Bản đồ độ dốc lưu vực trạm thủy văn Vĩnh Yên 108
Hình 3 - 6. Bản đồ hệ số CN2 lưu vực sông Nghĩa Đô.....110
Hình 3 - 7. Các đặc trưng thời gian của trận lũ.....111
Hình 3 - 8. Đường quá trình lũ đơn vị khôi phục từ dữ liệu thực đo 117
Hình 3 - 9. Kết quả mô phỏng lại trận lũ ngày 21/8/2022 118
Hình 3 - 10. Đường quá trình lũ đơn vị không thứ nguyên lưu vực sông Nghĩa Đô..118
Hình 3 - 11. Kết quả mô phỏng lại đường quá trình lưu lượng ngày 7/9/2023 119
Hình 3 - 12. Kết quả mô phỏng một số trận lũ trong khoảng thời gian từ năm 2021÷2024 trên lưu vực sông Nghĩa Đô. 119
Hình 3 - 13. Phân tích đặc trưng mặt cắt ngang trạm thủy văn Vĩnh Yên 121
Hình 3 - 14. Đường tần suất lưu lượng đỉnh lũ (Qmax) trạm thủy văn Vĩnh Yên – Số liệu chi tiết trong phụ lục II. 122
Hình 3 - 15. Lượng mưa tích lũy 5 ngày tại các trạm trên toàn lưu vực.....125
Hình 3 - 16. Lượng mưa giờ tại các trạm ngày 09/09/2024.....125
Hình 3 - 17. Kết quả mô phỏng dòng chảy tại trạm thủy văn Vĩnh Yên 09/09/2024 .126
Hình 3 - 18. So sánh kết quả mô phỏng và kết quả quan trắc 09/09/2024.....126
Hình 3 - 19. Bản đồ nguy cơ lũ quét ngày 09/09/2024 khu vực suối Nghĩa Đô.....129
Hình 3 - 20. Lưu lượng lớn nhất và cấp nguy cơ dọc nhánh chính dài nhất của lưu vực trạm Vĩnh Yên, trận lũ ngày 09/09/2024 130
Hình 3 - 21. Bản đồ phân bố vận tốc dòng chảy (m/s) tại các vị trí 132
Hình 3 - 22. Bản đồ phân bố công suất đơn vị (W/m^2) tại các vị trí.....133
Hình 3 - 23. Mô phỏng lũ tại từng thời điểm và kết quả dự báo lưu lượng đỉnh lũ tại trạm thủy văn Vĩnh Yên.....134

Hình 3 - 24. Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét thời điểm 01:00 09/09/2024 136
Hình 3 - 25. Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét thời điểm 03:00 09/09/2024 137
Hình 3 - 26. Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét thời điểm 06:00 09/09/2024 138
Hình 3 - 27. Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét thời điểm 09:00 09/09/2024 139
Hình 3 - 28. Trình tự mô phỏng nguy cơ lũ quét theo thời gian (mỗi giờ) 141
Hình 3 - 29. Giao diện hiển thị kết quả theo từng giờ.....142
Hình 3 - 30. Hiển thị trực quan nguy cơ lũ quét tại một vị trí gần UBND xã Tân Tiến 142
Hình 3 - 31. Thông tin chi tiết được hiển thị khi nhấn vào 143
Hình 3 - 32. Lưu vực tương ứng mà điểm cửa ra được click trên bản đồ theo nguyên tắc "lưu vực ô lưới" được thể hiện 144

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

TT	Từ viết tắt	Ý nghĩa
1	ACTIFF	Hiệp hội đổi mới công nghệ trong dự báo lũ lụt Achieving Technological Innovation in Flood Forecasting
2	AHP	Phân tích thứ bậc Analytic Hierarchy Process
3	ANN	Mạng nơ-ron nhân tạo Artificial Neural Network
4	APFM	Chương trình liên kết về quản lý lũ lụt Associated Programme on Flood Management
5	API	Lượng mưa kỳ trước Antecedent Precipitation Index
6	ASM	[Chỉ số] Độ ẩm đất trung bình Average Soil Moisture
7	ASMC	Điều kiện độ ẩm kỳ trước của đất Antecedent Soil Moisture Condition
8	ASMC I	Điều kiện độ ẩm kỳ trước của đất ở trạng thái khô
9	ASMC II	Điều kiện độ ẩm kỳ trước của đất ở trạng thái trung bình
10	ASMC III	Điều kiện độ ẩm kỳ trước của đất ở trạng thái ướt
11	BOLAM	Mô hình khu vực giới hạn Bologna BOlogna Limited Area Model
12	CL	Đường tới hạn Critical Line
13	CN	Đường cong số Curve Number
14	COSMO-LAMI	Mô hình khu vực giới hạn COSMO Consortium for Small-scale Modeling - Limited Area Model Italy
15	DFFHI	Chỉ số nguy cơ lũ quét động Dynamic Flash Flood Hazard Index
16	ECMWF	Trung tâm dự báo thời tiết trung hạn Châu Âu European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
17	EFAS	Hệ thống cảnh báo lũ lụt Châu Âu European Flood Awareness System
18	EPIC	Chỉ số lượng mưa tích lũy thời đoạn ngắn European Precipitation Index based on a simulated Climatology
19	ERI	Chỉ số chảy tràn cực đại Extreme Runoff Index
20	FAHP	Phân tích Thứ bậc Mờ Fuzzy Analytic Hierarchy Process
21	FFAS	Hệ thống cảnh báo lũ quét Flash Flood Alarm System
22	FFFT	Chỉ số dự báo nguy cơ lũ quét Forecast Flash Flood Threat
23	FFG	[Chỉ số] Ngưỡng dòng chảy tràn Flash Flood Guidance

TT	Từ viết tắt	Ý nghĩa
24	FFGS	Hệ thống hỗ trợ cảnh báo lũ quét Flash Flood Guidance System
25	FFPI	Chỉ số lũ quét tiềm tàng Flash Flood Potential Index
26	FMAP	Lượng mưa dự báo trung bình khu vực Forecasted Mean Areal Precipitation
27	FR	Tỷ lệ tần suất Frequency Ratio
28	GIS	Hệ thống thông tin địa lý Geographic Information System
29	GSMAP	Bản đồ lượng mưa vệ tinh toàn cầu Global Satellite Mapping of Precipitation
30	HGU	Đường lũ đơn vị Hydro Graph Unit
31	HRC	Trung tâm nghiên cứu thủy văn Hoa Kỳ Hydrologic Research Center
32	IDW	Nghịch đảo khoảng cách có trọng số Inverse Distance Weighting
33	JAXA	Cơ quan thám hiểm hàng không vũ trụ Nhật Bản Japan Aerospace Exploration Agency
34	KT	Khí tượng
35	LULC	Sử dụng đất và lớp phủ bề mặt Land Use and Land Cover
36	MLIT	Bộ Đất đai, Cơ sở hạ tầng, Giao thông và Du lịch Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
37	MOLOCH	Mô hình dự báo thời tiết khu vực MOLOCH
38	MRCFFGS	Hệ thống hỗ trợ cảnh báo lũ quét của Ủy hội sông Mê Công Mekong River Commission Flash Flood Guidance System
39	NDVI	Chỉ số khác biệt thực vật chuẩn hóa Normalized Difference Vegetation Index
40	NOAA	Cục Quản lý Khí quyển và Đại dương Quốc gia National Oceanic and Atmospheric Administration
41	NRCS	Cục bảo tồn tài nguyên thiên nhiên Hoa Kỳ Natural Resources Conservation Service
42	NWP	Dự báo thời tiết số trị Numerical Weather Prediction
43	NWS	Cơ quan Khí tượng Quốc gia Hoa Kỳ National Weather Service
44	QĐ	Quyết định
45	RI	Chỉ số mưa Rainfall Index
46	SCS	Cơ quan bảo tồn đất Soil Conservation Service
47	SEAFFGS	Hệ thống hỗ trợ cảnh báo lũ quét khu vực Đông Nam Á Southeast Asia Flash Flood Guidance System

TT	Từ viết tắt	Ý nghĩa
48	SFWV	Trọng số nhân tố Selected Factor Weight Value
49	SPI	Chỉ số năng lượng dòng chảy Stream Power Index
50	STI	Chỉ số vận chuyển trầm tích Stream Transport Index
51	SVM	Máy hỗ trợ vec-tơ Support Vector Machine
52	SWI	Chỉ số nước trong đất Soil Water Index
53	TT	Thông tư
54	TV	Thủy văn
55	TWI	Chỉ số ẩm địa hình Topographic Wetness Index
56	VNAFFG	Hệ thống hỗ trợ phân tích lũ quét cho Việt Nam Vietnam Automated Flash Flood Guidance
57	VNFFGS	Hệ thống hỗ trợ cảnh báo lũ quét Việt Nam Viet Nam Flash Flood Guidance System
58	VNOFFG	Hệ thống tác nghiệp cảnh báo lũ quét cho Việt Nam Viet Nam Operational Flash Flood Guidance System
59	WMO	Tổ chức Khí tượng thế giới World Meteorological Organization
60	WOE	Trọng số dẫn chứng Weight of Evidence

MỞ ĐẦU

Tính cấp thiết của luận án

Lũ quét đã và đang là một trong những loại hình thiên tai nguy hiểm nhất ở khu vực miền núi. Đây là loại hình thiên tai nguy hiểm đặc biệt vào mùa mưa, xảy ra ở khu vực miền núi, có độ dốc lưu vực lớn, khả năng tập trung dòng chảy nhanh. Hàng năm, lũ quét đã gây ra những thiệt hại đáng kể, làm ảnh hưởng nghiêm trọng đến đời sống của người dân vùng miền núi phía Bắc.

Điển hình như chỉ trong năm 2023, hai trận lũ quét lớn đã xảy ra tại Mù Cang Chải (Yên Bái) và Sa Pa (Lào Cai) gây thiệt hại nặng nề. Trận lũ ngày 12/9 tại Sa Pa làm 10 người chết, thiệt hại hàng chục tỷ tiền nuôi cá tầm, cá hồi trong khu vực [1]. Trận lũ ngày 5/8 tại Hồ Bốn, Mù Cang Chải làm ít nhất 3 người chết, hàng trăm ngôi nhà bị cuốn trôi và bị vùi lấp, 52 hộ dân phải di dời khẩn cấp [2]. Lũ quét xuất hiện đột biến và có xu hướng khốc liệt hơn do sự suy giảm về chất lượng thảm phủ cũng như sự gia tăng của thời tiết do biến đổi khí hậu. Năm 2022 ghi nhận tới 310 trận lũ, lũ quét, dẫn đầu về số lượng trong báo cáo tổng kết phòng, chống thiên tai toàn quốc [3]. Phần lớn các loại thiên tai xảy ra là do tác động của mưa lớn.

Thiệt hại về người do lũ quét thường do yếu tố bất ngờ, cơn lũ ập đến mà không có sự cảnh báo đã gây ra những thảm họa không lường trước được, đặc biệt là các trận lũ quét thường xảy ra vào ban đêm. Do vậy, cảnh báo sớm được lũ quét sẽ giúp giảm thiểu được các thiệt hại, đặc biệt về người ở các khu vực có nguy cơ.

Hiện nay, một vài hệ thống FFGS (bao gồm SEAFFGS, VNOFFG, MRCFFGS…) đang được sử dụng ở Việt Nam nhằm cảnh báo nguy cơ lũ quét theo thời gian. Đặc điểm của hệ thống này là sử dụng lượng mưa dự báo làm đầu vào trong cảnh báo nguy cơ và nguy cơ được cảnh báo theo tiểu lưu vực (toàn bộ Việt Nam được chia nhỏ thành các tiểu lưu vực). Các bản tin cảnh báo được cập nhật sau mỗi giờ và đưa ra các thông tin cho 1, 3, 6 giờ tiếp theo và được tổng hợp lại theo địa giới hành chính (cấp xã, huyện…)

Do xác định nguy cơ theo tiểu lưu vực, các phụ lưu bên trong không được phân tích riêng biệt, dẫn đến việc cảnh báo thiếu tính chi tiết và không thể xác định được vị trí cụ thể trên từng đoạn suối. Điều này tạo ra một khoảng trống lớn trong việc trả lời hai câu hỏi quan trọng nhất của cảnh báo lũ quét: "ở đâu" và "khi nào". Lấp khoảng trống này là yêu cầu cấp thiết để nâng cao hiệu quả cảnh báo lũ quét.

Lượng mưa là nguyên nhân chính gây ra lũ quét trong tự nhiên, mưa lớn tạo nên dòng chảy ở các khu vực miền núi khốc liệt hơn và tạo thành lũ quét. Về bản chất, toàn bộ quá trình đó sử dụng chu trình thủy văn để mô phỏng, xác định dòng chảy lũ. Khi dòng chảy lũ vượt qua giá trị nào đó sẽ được xem là lũ quét. Trong hệ thống FFGS, ngưỡng lưu lượng tràn bờ được xem xét là ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét.

Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã xây dựng ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét dựa trên lượng mưa, lưu lượng, mực nước... Tuy nhiên, luận án cho rằng bản chất của lũ quét nằm ở sức mạnh của dòng chảy, hay nói cách khác, đó là tác động của dòng chảy lũ đối với lòng dẫn và các đối tượng chịu tác động, điều mà các ngưỡng cảnh báo hiện tại dựa trên lượng mưa, lưu lượng, mực nước… chưa thể hiện một cách rõ ràng. Trong các nghiên cứu địa mạo về lũ lớn, từ những năm 1980, thước đo tác động của lũ đã chuyển từ lưu lượng sang năng lượng của dòng chảy, biểu thị bằng ứng suất tiếp hoặc công suất đơn vị dòng chảy [4]. Công suất dòng chảy được dùng làm chỉ số cho tác động địa mạo của các trận lũ lớn [5], trong đó công suất đơn vị khoảng 300 W/m² được xem là ngưỡng tối thiểu gần đúng để lòng dẫn bắt đầu biến đổi lớn [6]. Ở các lưu vực nhỏ, lũ quét tạo ra ứng suất tiếp và công suất đơn vị lớn gấp hàng trăm lần lũ trên sông lớn, và sức mạnh của lũ do tích độ sâu với độ dốc quyết định, không do độ lớn tuyệt đối của lưu lượng [7]. Trong khi đó, các hệ thống cảnh báo lũ quét hiện hành chủ yếu dựa trên ngưỡng mưa và lưu lượng tràn bờ [8]; công suất dòng chảy mới được dùng để đánh giá tác động địa mạo của lũ và ngưỡng biến đổi lòng dẫn, chưa có ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét nào dựa trên công suất đơn vị dòng chảy và vận tốc dòng chảy để phục vụ cảnh báo sớm. Một dòng chảy có một lượng nước đủ lớn và vận tốc cao sẽ mang năng lượng lớn, có khả năng cuốn trôi nhà cửa, vật liệu thuộc lòng dẫn…và gây ra những hậu quả nghiêm trọng.

Luận án này cũng đề xuất một giải pháp tính toán nguy cơ lũ quét tại mọi vị trí trên mạng lưới sông suối thay vì chỉ cảnh báo chung cho từng tiểu lưu vực như các hệ thống hiện tại. Bằng cách xem mỗi điểm trên sông suối như một cửa ra riêng biệt, lưu vực thượng nguồn tương ứng được xác định và phương pháp SCS-CN kết hợp với đường quá trình lũ đơn vị được áp dụng để tính toán dòng chảy cho từng vị trí cụ thể. Phương pháp này cho phép xác định đoạn suối nào sẽ có nguy cơ lũ quét và thời điểm xảy ra, chuyển từ cảnh báo dạng vùng sang thông tin cụ thể dạng điểm theo không gian.

Do đó, luận án thực hiện ***"Nghiên cứu xây dựng phương pháp xác định nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam"*** nhằm xác định một ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét dựa trên công suất dòng chảy, đồng thời xây dựng một giải pháp tính toán nguy cơ lũ quét đến mọi vị trí (theo không gian và thời gian), từ đó góp phần cảnh báo nguy cơ lũ quét hữu hiệu hơn, hỗ trợ hiệu quả công tác phòng, chống thiên tai khu vực miền núi.

Mục tiêu luận án

- Phân cấp được nguy cơ lũ quét dựa trên công suất dòng chảy, vận tốc dòng chảy và xây dựng bộ công cụ xác định nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian.
- Áp dụng bộ công cụ xác định được nguy cơ lũ quét cho lưu vực nghiên cứu điển hình: lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai.

Luận giải mục tiêu của luận án: Mục tiêu luận án hướng tới xác định ngưỡng phân cấp dựa trên luận điểm rằng mức độ nguy hiểm của lũ quét được quyết định bởi hai yếu tố chính là công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy. Đồng thời giải quyết các bất cập trong xác định nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian. Hiện nay, các bản đồ nguy cơ lũ quét theo không gian dạng điểm đang được xây dựng bằng yếu tố nội tại điểm, trong khi đối với dạng vùng thì chưa đủ mức độ chi tiết xác định nguy cơ trên nhánh suối nào. Do đó, luận án cũng sẽ trình bày giải pháp tính toán nguy cơ lũ quét cho từng vị trí, dựa vào cơ chế hình thành lũ quét để giải quyết bài toán cảnh báo nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian.

Câu hỏi nghiên cứu

- Đại lượng vật lý nào của dòng chảy đặc trưng cho sức tàn phá của lũ quét và có thể dùng làm cơ sở xây dựng ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét đặc trưng cho khu vực miền núi phía Bắc, thay cho các ngưỡng kinh nghiệm dựa trên lượng mưa hay lưu lượng tràn bờ?
- Bằng cách nào để xác định nguy cơ lũ quét đến độ phân giải điểm theo không gian và thời gian mà vẫn phản ánh được cơ chế thủy văn thượng nguồn tại mỗi vị trí, đồng thời bảo đảm tốc độ tính toán đáp ứng yêu cầu vận hành cảnh báo theo thời gian thực?
- Trong điều kiện thiếu số liệu khảo sát đặc trưng của khu vực miền núi phía Bắc, làm thế nào để ước tính được các tham số thủy lực (vận tốc, mực nước…) phục vụ tính toán ngưỡng nguy cơ tại những vị trí không có số liệu mặt cắt?

Luận điểm bảo vệ

- Luận điểm 1. Bản chất nguy hiểm của lũ quét được quyết định bởi công suất đơn vị dòng chảy và vận tốc dòng chảy. Do đó, ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét xây dựng trên hai đại lượng này phản ánh đúng sức tàn phá của dòng chảy lũ, phân biệt được lũ quét với lũ thường, đồng thời lý giải được trên cơ sở vật lý hiện tượng lũ quét không hình thành tại các vị trí đỉnh núi hay trên các sông lớn. Luận điểm này được luận chứng tại Chương 2 (mục 2.2 – xây dựng ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét theo công suất và vận tốc dòng chảy, Bảng 2 - 4 và Bảng 2 - 5) và được kiểm chứng tại mục 2.3 với một số trận lũ quét đã xảy ra trên khu vực miền núi phía Bắc.
- Luận điểm 2. Lũ quét là kết quả cực đoan của phản ứng thủy văn của một lưu vực cụ thể. Vì vậy, khi xem mỗi điểm trên mạng lưới sông suối là cửa ra của một lưu vực thượng nguồn độc lập ("lưu vực ô lưới") và mô phỏng dòng chảy bằng mô hình thủy văn tập trung (SCS-CN kết hợp đường quá trình lũ đơn vị) tích hợp với GIS, nguy cơ lũ quét được xác định đến độ phân giải điểm theo cả không gian

và thời gian, đồng thời vẫn phản ánh được cơ chế thủy văn của lưu vực thượng nguồn tại mỗi vị trí. Việc *sử dụng mô hình thủy văn tập trung để tạo ra kết quả dạng phân bố* trong nghiên cứu này là một cách tiếp cận khác biệt về bản chất so với các mô hình thủy văn phân bố và bán phân bố. Khó khăn chính của cách tiếp cận này là khối lượng và tốc độ tính toán; luận án chứng minh rằng quy trình đề xuất giải quyết được khó khăn này, đạt tốc độ tính toán đáp ứng yêu cầu vận hành cảnh báo theo thời gian thực. Luận điểm này được trình bày tại Chương 2 (mục 2.1 – cách tiếp cận và nguyên tắc "lưu vực ô lưới") và được kiểm chứng ở Chương 3, đặc biệt là mục 3.2 (xây dựng mô hình thủy văn – GIS theo lưu vực ô lưới), mục 3.4 (xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét trận lũ ngày 09/09/2024 theo không gian và thời gian) và mục 3.5 (xây dựng công cụ mô phỏng nguy cơ lũ quét, minh chứng tốc độ tính toán đáp ứng vận hành).

- Luận điểm 3. Hình thái mặt cắt ngang của sông suối nhỏ khu vực miền núi phía Bắc có thể được khái quát hóa bằng hai chỉ số đặc trưng r và k. Nhờ đó, các tham số thủy lực cần thiết cho việc tính toán ngưỡng công suất và vận tốc được ước tính tại mọi vị trí, cho phép áp dụng phương pháp xác định nguy cơ lũ quét ngay cả đối với các lưu vực vừa và nhỏ thiếu số liệu khảo sát chi tiết. Luận điểm này được thể hiện tại Chương 2 (mục 2.2 – khái quát hóa tham số hình thái mặt cắt r và k từ 132 mặt cắt trên 8 hệ thống sông suối, Bảng 2 - 7 ÷ Bảng 2 - 9) và được áp dụng tại Chương 3 (mục 3.3 – xác định đặc trưng lưu vực sông Nghĩa Đô).

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu: lũ quét; ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét; cảnh báo nguy cơ lũ quét.
- Phạm vi nghiên cứu: Lũ quét do mưa (không xét đến lũ quét bùn đá, nghẽn dòng và các yếu tố trượt lở đi kèm) cho các lưu vực vừa và nhỏ khu vực miền núi phía Bắc; Phạm vi áp dụng thử nghiệm: lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai.

Các phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp phân tích thống kê: Sử dụng để phân tích, đánh giá các đặc trưng lưu vực liên quan đến quá trình tính toán nguy cơ lũ quét.
- Phương pháp viễn thám - GIS: Nhằm thu thập các dữ liệu không gian phục vụ tính toán nguy cơ lũ quét.
- Phương pháp mô hình toán thủy văn: Sử dụng mô phỏng dòng chảy lũ từ lượng mưa cho các vị trí tính toán nguy cơ.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Ý nghĩa khoa học:

- Đề xuất chỉ số công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy làm ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét, phản ánh bản chất mức độ nguy hiểm thực sự của dòng chảy lũ.
- Xây dựng giải pháp xác định nguy cơ lũ quét dạng điểm bằng sự kết hợp của nguyên lý thủy văn và các kỹ thuật GIS.

Ý nghĩa thực tiễn:

- Cơ sở khoa học xác định nguy cơ lũ quét là tài liệu tin cậy để tham khảo, áp dụng cho các khu vực hoặc các vùng nghiên cứu khác do sử dụng bản chất nội tại của dòng chảy không phục thuộc vào vị trí địa lý.
- Phương pháp xác định nguy cơ lũ quét hoàn toàn có thể cảnh báo theo không gian và thời gian ở độ phân giải điểm về mức độ và thời gian dự kiến xảy ra lũ quét, hỗ trợ hiệu quả công tác phòng, chống thiên tai.
- Giải pháp xác định nguy cơ lũ quét đến từng vị trí có thể áp dụng cho các vùng thiếu số liệu với độ tin cậy cao.

Kết cấu luận án

Kết cấu luận án gồm 3 chương, không bao gồm mở đầu, kết luận và phụ lục bao gồm:

Chương 1: Tổng quan các vấn đề nghiên cứu về lũ quét: Chương này trình bày các khái niệm, quá trình nghiên cứu lũ quét ở trên thế giới và Việt Nam, tổng quan các nghiên cứu về đặc trưng lũ quét, tổng quan các phương pháp xác định nguy cơ lũ quét, và tổng quan các chỉ số đánh giá nguy cơ lũ quét. Chương này cũng nêu những vấn đề còn tồn tại cần tiếp tục nghiên cứu và định hướng nghiên cứu của luận án.

Chương 2: Nghiên cứu xây dựng cơ sở khoa học xác định nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc: Chương này trình bày cách tiếp cận, phương pháp nghiên cứu và các kỹ thuật sử dụng trong luận án; Xác định ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc và kiểm chứng ngưỡng cảnh báo cho một số trận lũ quét đã xảy ra trên khu vực miền núi phía Bắc.

Chương 3: Áp dụng thử nghiệm xác định nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian cho lưu vực sông Nghĩa Đô: Chương này trình bày chi tiết cách áp dụng quy trình xác định nguy cơ lũ quét vào tính toán nguy cơ lũ quét cho lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai bao gồm việc xây dựng mô hình thủy văn GIS cho các lưu vực ô lưới, xác định các đặc trưng lưu vực sông Nghĩa Đô, xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét cho trận lũ ngày 09/09/2024 và xây dựng công cụ mô phỏng nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian cho lưu vực sông Nghĩa Đô.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU VỀ LŨ QUÉT

1.1. Các khái niệm

1.1.1. Khái niệm và phân loại lũ quét

Theo quan điểm cổ điển, lũ quét được xem như một hiện tượng xuất hiện lượng nước khổng lồ thoát ra tại một vị trí nào đó và cuốn trôi đi mọi thứ mà chúng đi qua. Tuy nhiên về bản chất, *"lượng nước khổng lồ"* luôn được sinh ra bởi một nguyên nhân nào đó, có thể là một trận mưa lớn, hay một sự cố công trình...

Một số khái niệm về lũ quét được trình bày dưới đây:

Hiệp hội đổi mới công nghệ trong dự báo lũ lụt (ACTIFF) - 2004:

Lũ quét là một trận lũ có nguy cơ gây ra thiệt hại nghiêm trọng ở một vị trí quan trọng trong lưu vực mà thời gian hình thành lũ từ khu vực thượng nguồn đến vị trí đó ít hơn thời gian cần thiết để kích hoạt các biện pháp cảnh báo, phòng tránh và giảm nhẹ nguy cơ. Do đó, với công nghệ hiện tại, ngay cả khi được dự báo thì khoảng thời gian còn lại không đủ để thực hiện các biện pháp phòng ngừa (ví dụ: sơ tán, dựng hàng rào ngăn lũ...) [9]

Chương trình liên kết về quản lý lũ lụt (APFM) – 2006:

Lũ quét xảy ra do sự tích tụ và giải phóng đột ngột của lượng nước bề mặt từ khu vực miền núi thượng nguồn, có thể do mưa lớn, mây vần vũ, sạt lở đất, lở băng hoặc sự cố công trình kiểm soát lũ... Lũ quét có đặc điểm là sự gia tăng đột ngột của dòng chảy gây ra vận tốc dòng chảy rất lớn. Lưu lượng dòng chảy nhanh chóng đạt đỉnh và giảm đột ngột. Lũ quét đặc biệt phổ biến ở các khu vực miền núi và sa mạc, tuy nhiên, nguy cơ lũ quét có thể ở bất kể khu vực nào có địa hình dốc và tốc độ dòng chảy bề mặt cao, các sông suối nhỏ chảy trong các hẻm núi hẹp và có lượng mưa lớn. Lũ quét có sức tàn phá lớn hơn các loại lũ lụt khác vì bản chất không thể đoán trước và dòng chảy mạnh bất thường mang theo nồng độ trầm tích và mảnh vụn lớn, gây ra không đủ thời gian phản ứng và có sức tàn phá lớn đối với cơ sở hạ tầng, con người, động vật, đồng ruộng và bất cứ thứ gì mà chúng đi qua [10].

Cơ quan Khí tượng Quốc gia Hoa Kỳ (NWS), thuộc Cục Quản lý Khí quyển và Đại dương Quốc gia (NOAA) – 2010:

Lũ quét là dòng nước lớn chảy nhanh và dữ dội tràn vào khu vực bình thường khô ráo, hoặc là hiện tượng mực nước trong suối, khe dâng nhanh vượt mực lũ đã được quy định trước, bắt đầu trong vòng 6 giờ kể từ sự kiện gây lũ (ví dụ: mưa lớn, vỡ đập, tắc nghẽn do băng). Ngưỡng thời gian thực tế có thể khác nhau giữa các vùng. Lũ đang diễn ra cũng có thể chuyển thành lũ quét khi mưa lớn làm nước lũ dâng lên đột ngột [11].

Tổ chức Khí tượng thế giới (WMO) – 2009:

Lũ quét là hiện tượng nước lũ dâng cao nhanh chóng do lượng mưa quá lớn hoặc các sự kiện vỡ đập. Lũ quét do mưa gây ra là hiện tượng dòng nước phát triển quá mức trong vòng vài giờ - thường là dưới 6 giờ kể từ khi mưa, lũ quét thường xảy ra ở khu vực miền núi hoặc khu vực có bề mặt không thấm nước rộng như khu vực đô thị. Mặc dù hầu hết các trận lũ quét quan sát được là do mưa gây ra, nhưng các sự kiện như vỡ đập tự nhiên hoặc nhân tạo cũng gây ra việc giải phóng đột ngột một lượng lớn trong thời gian ngắn và gây hậu quả thảm khốc ở hạ lưu [12].

Tại Việt Nam, một số nhà khoa học đã đưa ra những khái niệm về lũ quét:

Cao Đăng Dư và Lê Bắc Huỳnh (2000)***:*** Lũ quét thường là những trận lũ lớn, xảy ra bất ngờ, tồn tại trong một thời gian ngắn (lên nhanh, xuống nhanh), dòng chảy xiết có hàm lượng chất rắn cao và có sức tàn phá lớn [13].

Lã Thanh Hà và Ngô Trọng Thuận (2009): Lũ quét hình thành do mưa kết hợp với các tổ hợp bất lợi về điều kiện mặt đệm (địa hình, địa mạo, lớp phủ...) sinh ra dòng chảy bùn đá trên các sườn dốc (lưu vực, sông suối), dòng chảy lũ truyền rất nhanh gây ra những tàn phá bất ngờ và nghiêm trọng ở khu vực sườn núi và dọc sông mà nó tràn qua [14].

Các nhà khoa học đã đưa ra rất nhiều khái niệm về lũ quét, một vài đặc điểm chính của lũ quét có thể được liệt kê như sau: (1) Lũ xảy ra trong thời gian ngắn với biên độ dao động lớn về mực nước; (2) Dòng chảy có vận tốc lớn; (3) Có hàm lượng chất rắn cao; (4) Có sức tàn phá lớn; và (5) Trong khoảng 6 giờ.

Qua đó có thể thấy, hầu hết các đặc điểm về lũ quét đang được các nhà khoa học đánh giá một cách định tính: biên độ dao động lớn; vận tốc lớn; hàm lượng chất rắn cao; sức tàn phá lớn... là những thứ không xác định được rõ ràng. Chính điều này đã làm cho việc xác định một trận lũ quét khó khăn hơn. Vì điều này, các nhà khoa học đã kiên trì trong nhiều năm nhằm xác định một chỉ số về ngưỡng cụ thể để khẳng định một trận lũ là lũ quét và phân biệt với lũ thường.

Do hiện tượng lũ quét là hiện tượng rất phức tạp, vì vậy, các nhà khoa học đã phân loại lũ quét theo nguyên nhân hình thành, đặc trưng dòng chảy để nghiên cứu riêng từng dạng. Danh sách dưới đây đã được Kenvin Sene liệt kê các dạng của lũ quét trong cuốn Flash Flood xuất bản năm 2013 [15], luận án chỉ liệt kê các loại xuất hiện ở Việt Nam:

Lũ sông suối (River flooding): Mực nước và lưu lượng tăng nhanh trên các sông, suối, lạch do mưa lớn cục bộ hoặc mưa lớn trên diện rộng.

Lũ bùn đá (Debris Flow): Dòng bùn, đá và các vật chất khác dịch chuyển nhanh do mưa lớn.

Lũ đô thị (Urban flooding): Nước mặt hoặc dòng chảy phù sa hoặc lũ tràn sông qua khu vực đô thị mà hệ thống thoát nước không đáp ứng đủ nhu cầu tiêu nước.

Nghẽn dòng (Outburst floods): Lũ tràn qua rào chắn dòng chảy tự nhiên cũng có tác động tương tự như vỡ đập.

Vỡ đập (Dam break): Nước tràn qua đỉnh hoặc vỡ thân đập dẫn đến khối nước lớn tràn nhanh xuống hạ lưu. Ngoài ra, việc xả tràn hay qua xi-phông cũng có thể là một nguyên nhân gây lũ quét.

Vỡ đê (Levee breaches): Nước tràn qua đỉnh đê hoặc vỡ thân đê gây lũ tại các khu vực cần được bảo vệ.

Ở Việt Nam, sự phân loại lũ quét phong phú hơn rất nhiều [13, 16, 14, 17, 18] tùy vào từng quan điểm về đặc điểm, quy mô phát triển hay hàm lượng vật chất mà được phân loại khác nhau. Dựa trên kết quả tổng hợp, Lê Như Ngà (2017) [19] đã phân loại thành 4 loại như sau:

Lũ quét nghẽn dòng: có thể do vỡ đập tự nhiên hoặc đập nhân tạo. Nghẽn dòng tự nhiên sinh ra do lòng dẫn sông suối tại một số nơi, một cách tự nhiên, hoặc bị thắt đột ngột hoặc bị cong đột ngột hoặc cả hai tạo ra các nghẽn dòng do dồn ứ, tích lũy vật liệu như là đất đá, cành cây, cây cối…

Lũ quét sườn dốc: được sinh ra do quá trình hình thành nhanh và hội tụ mạnh dòng chảy mặt khi di chuyển xuống phía dưới do mưa lớn trên bề mặt sườn dốc kết hợp với các điều kiện bất lợi về lớp phủ bề mặt, địa hình và địa mạo. Lũ này có thể được hình thành khi (1) cường độ mưa rất lớn, vượt quá khả năng thấm và tổn thất tự nhiên của bề mặt và/hoặc (2) mưa có cường độ không quá lớn nhưng trước đó đã có mưa kéo dài nhiều ngày làm cho bề mặt đến mức bão hòa.

Lũ bùn đá: thường do sạt lở đất đá với khối lượng rất lớn (sạt lở núi) ở đầu nguồn hoặc ven sông suối trong thời gian lũ lụt. Đất đá sạt lở bị hóa lỏng, hòa cùng với dòng nước, theo trọng lực quét xuống phía dưới.

Lũ hỗn hợp: là tập hợp của 2 hoặc cả 3 loại lũ quét trên.

Năm 2014, Thủ tướng Chính phủ ra Quyết định số 46/2014/QĐ-TTg [20] ngày 15/08/2014 Quy định về dự báo, cảnh báo và truyền tin thiên tai (và đã được thay thế bằng QĐ 03/2020/QĐ-TTg ngày 12/01/2020 với nội dung tương tự), trong đó khái niệm lũ quét được định nghĩa như sau:

Lũ quét là lũ xảy ra bất ngờ trên các lưu vực sông suối nhỏ miền núi, dòng chảy xiết, thường kèm theo bùn đá, lũ lên nhanh, xuống nhanh, có sức tàn phá lớn.

Trên thế giới, có 03 loại hình thiên tai thường gắn liền với nhau và đôi khi chúng xảy ra đồng thời: Lũ quét (flash flood), lũ bùn đá (debris flow) và sạt lở đất (landslide).

Các quan điểm về lũ quét cổ điển [14] có thiên hướng mô tả lũ bùn đá hơn là lũ quét, trong khi đó các quan điểm hiện nay về lũ quét [12, 15, 20] mô tả gần hơn về một dạng lũ nước với mức độ lên xuống nhanh. Quan điểm và đối tượng nghiên cứu về lũ quét được làm rõ dưới đây:

Thứ nhất là về lũ quét: Luận án thống nhất sử dụng khái niệm tại QĐ số 03/2020/QĐ-TTg: Lũ quét là lũ xảy ra bất ngờ trên các lưu vực sông suối nhỏ miền núi, dòng chảy xiết, thường kèm theo bùn đá, lũ lên nhanh, xuống nhanh, có sức tàn phá lớn.

Bản chất: Lũ quét là một dạng lũ, do đó, để xác định lũ quét theo phương pháp mô phỏng vật lý truyền thống cần sử dụng các mô hình thủy văn – thủy lực. Trong đó mô tả, thể hiện sự tương tác của nước và bề mặt dẫn đến quá trình hình thành dòng chảy của một lưu vực cụ thể. Trong luận án, lũ quét tại một điểm được xem xét dựa vào sự tập trung dòng chảy của một lưu vực tương ứng với cửa ra tại điểm đó.

Thứ hai là về sạt lở đất: Cũng theo Quyết định số 03/2020/QĐ-TTg, sạt lở đất được định nghĩa là hiện tượng đất bị sạt, trượt, lở do tác động của mưa, lũ hoặc dòng chảy.

Bản chất: Sạt lở đất là quá trình tương tác của các yếu tố mưa, lũ, hoặc dòng chảy đến sự ổn định một vị trí cụ thể. Do đó, nó mang yếu tố nội tại. Mưa lớn tại một điểm có thể gây ra sạt lở đất tại điểm đó nhưng có thể không gây ra lũ quét tại điểm đó. Ngược lại, lũ quét tại một điểm, có thể không do mưa lớn gây ra tại điểm đó, mà do mưa lớn ở lưu vực thượng nguồn điểm đó gây nên.

Thứ ba là về lũ bùn đá: Do trong các loại hình thiên tai (22 loại hình thiên tai quy định trong Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật phòng, chống thiên tai và Luật đê điều) của Việt Nam không quy định về lũ bùn đá (thuộc nhóm các loại thiên tai khác). Luận án cho rằng, lũ bùn đá có cơ chế hình thành là sự kết hợp của một trong hai loại hình thiên tai lũ quét, sạt lở đất hoặc cả hai. Bản chất hình thành được thể hiện qua 3 cơ chế sau:

Cơ chế 1: Lũ bùn đá hình thành do nguyên nhân chính là lũ quét: Là hiện tượng lũ quét tác động lên lòng dẫn và kéo theo các vật liệu lòng dẫn, gây hàm lượng vật chất lớn. Loại cơ chế này cần được xác định theo nhóm lũ quét. Thời gian xảy ra sự kiện có thể diễn ra trong một vài giờ. Để tính toán cho cơ chế này, cần kết hợp tính toán mô phỏng thủy văn và mức độ xói mòn bề mặt.

Cơ chế 2: Lũ bùn đá hình thành do nguyên nhân chính là sạt lở đất: Là hiện tượng mưa lớn tại một vị trí, gây ra sạt lở lớn và dòng chảy bề mặt kết hợp. Toàn bộ dòng chảy vật chất này di chuyển với mức độ rất nhanh về hạ du, gây thiệt hại đáng kể (như sự kiện Làng Nủ - Lào Cai năm 2024, sự kiện Hướng Hóa – Quảng Trị năm 2020…). Loại cơ chế này có thể quét toàn bộ một khu vực rộng lớn, có thể ở quy mô một xã, một làng. Thời gian xảy ra sự kiện có thể chỉ diễn ra trong vài phút. Để tính toán cho cơ chế này, cần tính toán dưới dạng sạt lở đất (ổn định khối trượt).

Cơ chế 3: Lũ bùn đá hình thành do nguyên nhân kết hợp: lũ quét và sạt lở đất. Là hiện tượng mưa gây ra sạt lở nhỏ, lượng đất/đá này di chuyển xuống chân đồi/núi và đi vào lòng dẫn kết hợp với dòng chảy lũ → cuốn trôi về hạ du. Loại hình này nếu diễn ra lũ quét hoặc sạt lở đất độc lập chỉ gây tác động nhỏ, tuy nhiên sự kết hợp này mang một sức mạnh lớn hơn rất nhiều lần, đặc biệt nếu các sạt lở nhỏ gây tắc nghẽn dòng chảy dẫn đến bị phá vỡ. Thời gian xảy ra sự kiện có thể diễn ra trong một vài giờ. Để tính toán cho cơ chế này, cần tính toán cả hai cơ chế lũ quét (thủy văn) và sạt lở đất (sự ổn định khối sạt/trượt) và đưa ra nghiên cứu tổng hợp nhằm kết hợp thành dòng lũ bùn đá.

Qua phân tích trên, luận án này hướng tới loại hình thiên tai lũ quét dạng lũ nước thuần túy với đặc trưng lên nhanh, xuống nhanh trên các lưu vực sông suối nhỏ miền núi, được thể hiện như định nghĩa trong QĐ số 03/2020/QĐ-TTg và được nghiên cứu thông qua mô hình thủy văn (mô phỏng mưa – dòng chảy). Trong luận án này, các yếu tố nghẽn dòng, bùn đá hay trượt lở đi kèm đều không được xem xét.

1.1.2. Khái niệm và phân loại bản đồ

Trong việc đánh giá nguy cơ/rủi ro lũ quét, việc chỉ ra các vị trí có nguy cơ cao theo cấp độ phân loại thường được sử dụng, do vậy, các bản đồ tương ứng được xây dựng nhằm trực quan hóa nguy cơ/rủi ro lũ quét theo không gian.

Bản đồ điều tra lũ quét (flash flood inventory mapping): là bản đồ ghi nhận và mô tả các sự kiện lũ quét hoặc sạt lở đất đã xảy ra trong quá khứ và hiện tại. Bản đồ này cung cấp thông tin về vị trí, loại hình (ví dụ: lũ quét, sạt lở đất, trượt lở), và các đặc điểm khác như diện tích, hình dạng, hoặc trạng thái hoạt động. Các bản đồ được xây dựng dựa trên các phương pháp như khảo sát thực địa, phân tích ảnh hàng không, hình ảnh vệ tinh, và dữ liệu lịch sử. Trong GIS, lũ quét/sạt lở có thể được biểu diễn dưới dạng vùng (polygon), đường (polyline, như lũ bùn đá hẹp), hoặc điểm (cho các sự kiện nhỏ). Bản đồ điều tra là cơ sở để xây dựng các mô hình nhạy cảm, nguy cơ, và rủi ro, đồng thời giúp xác nhận độ chính xác của các mô hình này.

Bản đồ nhạy cảm với lũ quét (flash flood susceptibility mapping): là bản đồ thể hiện khả năng hoặc xác suất xảy ra lũ quét/sạt lở đất trong tương lai tại một khu vực cụ thể, dựa trên các yếu tố điều kiện như địa chất (loại đất/đá), góc dốc, hình thái địa hình, và cách sử dụng đất. Khác với bản đồ nguy cơ, bản đồ nhạy cảm không xem xét yếu tố thời gian (tần suất hoặc thời điểm xảy ra). Các bản đồ này có thể được xây dựng bằng phương pháp định tính (heuristic, dựa trên đánh giá của chuyên gia) hoặc định lượng (dựa trên phân tích thống kê hoặc mô hình vật lý). Chúng cho biết nơi nào có điều kiện địa hình, địa chất, thổ nhưỡng, thảm phủ... thuận lợi cho sự hình thành lũ quét. Chúng thường được sử dụng để xác định các khu vực có nguy cơ cao để lập kế hoạch sử dụng đất hoặc quản lý rủi ro.

Bản đồ nguy cơ lũ quét (flash flood hazard mapping): là bản đồ thể hiện mức độ nguy hiểm của lũ quét tại các vị trí trong khu vực nghiên cứu. Theo bộ thuật ngữ giảm nhẹ rủi ro thiên tai của Liên Hợp Quốc, hiểm họa (hazard) là quá trình, hiện tượng có thể gây thiệt hại về người, tài sản, kinh tế, xã hội hoặc môi trường, và mỗi hiểm họa được đặc trưng bởi vị trí, cường độ hay độ lớn, tần suất và xác suất [21]. Thông tư 97/2025/TT-BNNMT gọi khái niệm này là hiểm họa lũ quét, tức khả năng phát sinh lũ quét tại những khu vực nhất định, có thể gây thiệt hại đến tính mạng, tài sản, hạ tầng, kinh tế, xã hội và môi trường [22].

Bản đồ rủi ro lũ quét (flash flood risk mapping): là bản đồ thể hiện mức thiệt hại có thể xảy ra do lũ quét. Rủi ro thiên tai là khả năng thiệt hại về người, tài sản có thể xảy ra trong một khoảng thời gian, xác định theo xác suất, là hàm của hiểm họa, mức độ phơi bày, tính dễ bị tổn thương và năng lực ứng phó [23]. Thông tư 97/2025/TT-BNNMT định nghĩa rủi ro do lũ quét là khả năng thiệt hại hoặc các tổn thất có thể xảy ra do lũ quét [22].

Mặc dù các loại bản đồ này đã được Javier Hervas và Peter Bobrowsky chỉ ra vào năm 2009 [24], trong quá trình nghiên cứu nguy cơ các loại hình thiên tai trước đây, một số nhà khoa học đã sử dụng nhầm lẫn giữa khái niệm "bản đồ nhạy cảm" và khái niệm "bản đồ nguy cơ", thậm chí là "bản đồ rủi ro" [25, 26]. Phần lớn các nghiên cứu hiện nay đều tập trung vào bản đồ nhạy cảm và bản đồ nguy cơ, trong đó phần lớn là xây dựng các bản đồ nhạy cảm.

Ở Việt Nam mới đây, hệ thống thuật ngữ và sản phẩm bản đồ nêu trên đã được thể chế hóa trong Thông tư số 97/2025/TT-BNNMT ngày 31/12/2025 của Bộ Nông nghiệp và Môi trường Quy định kỹ thuật điều tra, thành lập bản đồ hiện trạng, bản đồ phân vùng nguy cơ, phân vùng rủi ro do sạt lở đất, lũ quét tỷ lệ 1:10.000 và 1:2.000. Theo Thông tư này, ba nhóm sản phẩm được quy định gồm: bản đồ hiện trạng, bản đồ phân vùng nguy cơ và bản đồ phân vùng rủi ro; trong đó, để chuyển từ phân vùng nguy cơ sang phân vùng rủi ro còn có bước trung gian là bản đồ phân vùng hiểm họa; bản đồ phân vùng rủi ro được lập bằng cách tổng hợp bản đồ phân vùng hiểm họa, mức độ phơi bày và tính dễ bị tổn thương [22]. Kết quả phân vùng được phân loại theo tối đa năm cấp độ: rất thấp, thấp, trung bình, cao và rất cao (tương ứng Cấp 5 đến Cấp 1).

Bảng 1 - 1. Bảng so sánh các khái niệm, thuật ngữ sử dụng

Khái niệm theo Hervás & Bobrowsky (2009)	**Thuật ngữ sử dụng trong luận án**	**Sản phẩm tương ứng theo TT 97/2025/TT-BNNMT**
Inventory mapping	Bản đồ điều tra	Bản đồ hiện trạng
Susceptibility mapping	Bản đồ nhạy cảm	Bản đồ phân vùng nguy cơ

Khái niệm theo Hervás & Bobrowsky (2009)	Thuật ngữ sử dụng trong luận án	Sản phẩm tương ứng theo TT 97/2025/TT-BNNMT
Hazard mapping	Bản đồ nguy cơ	Bản đồ phân vùng hiểm họa
Risk mapping	Bản đồ rủi ro	Bản đồ phân vùng rủi ro

Trong luận án, mục tiêu là xác định được ngưỡng phân cấp nguy cơ (hazard) lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc, được xây dựng trên cơ sở công suất và vận tốc dòng chảy cùng yếu tố kích hoạt là mưa, thể hiện đồng thời theo không gian và thời gian - tương ứng với bản đồ phân vùng hiểm họa theo phân loại của Thông tư 97/2025/TT-BNNMT. Bản đồ xây dựng là bản đồ nguy cơ lũ quét và được sử dụng xuyên suốt trong luận án.

Theo định nghĩa hiểm họa nêu trên, nguy cơ lũ quét có thể đánh giá qua cường độ, tần suất hoặc xác suất xuất hiện. Luận án đánh giá theo cường độ: nguy cơ lũ quét tại một vị trí, một thời điểm được biểu thị bằng cấp cường độ của dòng chảy lũ (công suất đơn vị dòng chảy và vận tốc dòng chảy) sinh ra từ trận mưa thực đo hoặc dự báo, chia 5 cấp từ rất thấp đến rất cao; bản đồ nguy cơ lũ quét của luận án là bản đồ các cấp này theo không gian và thời gian.

1.1.3. Các khái niệm khác được sử dụng trong luận án

Lưu vực ô lưới: là lưu vực thủy văn hoàn chỉnh được xác định dựa trên thuật toán hướng dòng chảy trong thủy văn. Mỗi điểm A trên khu vực nghiên cứu đại diện cho một lưu vực, lưu vực này xem điểm A là cửa ra của lưu vực, bao gồm các ô lưới có hướng dòng chảy đi qua điểm A theo thuật toán hướng dòng chảy. Các giá trị tại điểm A là giá trị bình quân các ô lưới thuộc lưu vực có cửa ra là A.

Ví dụ, khi xác định lưu lượng tại một điểm A, lưu vực ô lưới tương ứng là khu vực có dòng chảy hội tụ về điểm A, với các tham số như độ dốc, lượng mưa được lấy giá trị bình quân từ các pixel trong lưu vực đó. Tương tự, điểm B hay C sẽ có lưu vực ô lưới riêng, dù các lưu vực này có thể chồng lấn hoặc bao gồm nhau. Cách tính giá trị bình quân này cho các lưu vực lồng nhau trình bày ở phần kỹ thuật mô phỏng thủy văn.

Ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét: là các giá trị định lượng hoặc tiêu chí được thiết lập để phân cấp khả năng xuất hiện của lũ quét. Trong luận án, ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét sử dụng hai đặc trưng bao gồm công suất đơn vị dòng chảy và vận tốc dòng chảy. Ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét được chia thành 5 cấp: rất thấp, thấp, trung bình, cao và rất cao.

Tổng công suất dòng chảy (stream power): là năng lượng cung cấp trong một đơn vị thời gian cho một đơn vị chiều dài dòng chảy, bằng tốc độ chuyển thế năng của nước

thành động năng khi nước chảy xuống theo độ dốc lòng dẫn [27], được tính bằng tích của khối lượng riêng của nước, gia tốc trọng trường, lưu lượng và độ dốc lòng dẫn.

Công thức: $\Omega = \rho g Q S$

trong đó:

Ω: tổng công suất dòng chảy

ρ: khối lượng riêng của nước (1000 kg/m^3)

g: gia tốc trọng trường (9,8 m/s^2)

Q: lưu lượng dòng chảy (m^3/s)

S: độ dốc lòng sông

Đơn vị: Watt/mét (W/m)

Công suất đơn vị dòng chảy (unit stream power): là tổng công suất dòng chảy tính trên một đơn vị diện tích đáy lòng dẫn, bằng tỷ số giữa tổng công suất dòng chảy và bề rộng lòng dẫn [28].

Công thức: $\omega = (\rho g Q S)/w$

trong đó:

ω: công suất đơn vị dòng chảy

w: độ rộng lòng sông

Đơn vị: Watt/m^2 (W/m^2)

1.2. Quá trình nghiên cứu lũ quét

1.2.1. Quá trình nghiên cứu lũ quét trên thế giới

Lũ quét là một hiện tượng tự nhiên và xuất hiện trong suốt quá trình lịch sử nhân loại, tuy nhiên, nghiên cứu chính thức về lũ quét bắt đầu muộn hơn rất nhiều. Vào những thời kỳ ban đầu của nghiên cứu về thủy văn, dựa trên những quan sát trong tự nhiên, Bernard Palissy vào năm 1575 đã cho rằng nước trên các dòng suối có nguồn gốc từ mưa [29] và từ đó mở đầu các nghiên cứu về chu trình của nước. Các mô phỏng ban đầu còn thô sơ dẫn đến sự tính toán thiếu chính xác về lượng nước hình thành từ mưa do bỏ qua các quá trình thẩm thấu, bốc hơi… và đã được các nhà khoa học kiên trì nghiên cứu để đặt nền móng cho thủy văn hiện đại.

Các dữ liệu ban đầu được ghi nhận bao gồm dữ liệu về mưa và mực nước trên sông, những quan sát về dòng chảy lũ trên sông cũng bắt đầu được ghi lại. Năm 1863, Grimaldi đã mô tả về một trận lũ lụt kinh hoàng xảy ra tại miền Nam nước Ý [30] vào ngày 27/9/1793 là một thảm họa thiên nhiên kinh hoàng, cướp đi sinh mạng của hơn 300 nghìn người. Trận lũ đã phá hủy hoàn toàn nhà cửa, đường và trang trại, giết rất

nhiều phụ nữ và trẻ em, mở ra một tuyến thoát mới và tràn ra một vùng rộng lớn.

Các nghiên cứu ban đầu về lũ quét hầu hết là sự mô tả về các sự kiện lũ quét, bao gồm thiệt hại, quy mô, đặc điểm và lượng mưa, thậm chí là ước tính lưu lượng lũ trên sông [31, 32]. Hầu hết các sự kiện có lượng mưa lên tới hàng trăm milimet trong vòng 24 giờ. Các ghi chép này có ý nghĩa rất lớn trong việc hình thành các khái niệm về lũ quét về sau.

Những đánh giá chi tiết về thủy văn của các trận lũ quét bắt đầu được quan tâm hơn nhằm làm rõ đặc điểm trận lũ. Năm 1976, Katzer đã công bố một tính toán các tham số trận lũ quét xảy ra tại thung lũng Las Vegas, Nevada ngày 3/7/1975 [33] bao gồm: đỉnh lũ, mô-đun đỉnh lũ, vận tốc dòng chảy, tổng lượng lũ và thời gian trễ của trận mưa. Kết quả tính toán cho thấy mô-đun đỉnh lũ dao động từ 1,55÷3,56$m^3/s.km^2$ và vận tốc trung bình mặt cắt từ 0,6÷5m/s, thời gian trễ của trận mưa bình quân từ 2÷4 giờ.

Trong khoảng thời gian này, các nghiên cứu chỉ tập trung vào đánh giá các trận lũ đã xảy ra mà chưa thể đưa ra được những dự đoán nguy cơ có thể xảy ra lũ quét [34]. Mặc dù vậy, đây là tiền đề giúp hiểu rõ hơn về mức độ của trận lũ thông qua các thông số thủy văn thủy lực cụ thể, từ đó làm cơ sở phân cấp quy mô trận lũ quét trong các nghiên cứu sau này.

Trước tình hình lũ quét ngày một xảy ra nhiều hơn và chưa thể dự báo được loại hình thiên tai đặc biệt nguy hiểm này, ngày 29/01/1978, Hiệp hội Khí tượng Hoa Kỳ đã tuyên bố về một mối quan ngại và xem lũ quét là một vấn đề quốc gia [35]. Tuyên bố nêu rõ 9 hành động và 2 khuyến nghị hành động, trong đó, 9 hành động tập trung vào việc tăng cường khả năng dự báo được lượng mưa số trị và lũ quét kết hợp nâng cao nhận thức cộng đồng về phòng, chống thiên tai. Hai khuyến nghị tập trung vào trách nhiệm của địa phương và các hành động phối hợp nhằm giảm thiểu thiệt hại của lũ quét. Đây là lần đầu tiên lũ quét được xem xét cần thiết phải có dự báo ở quy mô quốc gia trước những thiệt hại lớn do loại hình thiên tai này gây ra.

Trên cơ sở tuyên bố đó, có nhiều chương trình nghiên cứu về lũ quét đã được triển khai. Ban đầu là cải thiện về dự báo mưa số trị với thời đoạn dự báo mưa được đưa ra 6 lần mỗi ngày, giá trị lượng mưa này sẽ được so sánh với ngưỡng mưa đã được xác định từ trước trong hướng dẫn dự báo dịch vụ thời tiết quốc gia Hoa Kỳ năm 1979 [36], thông tin cảnh báo lũ quét ban đầu đưa ra với mục tiêu trong thời đoạn nhỏ hơn 4 giờ. Tiếp đến là áp dụng các nghiên cứu có liên quan đến độ ẩm bề mặt nhằm cải thiện lượng mưa cảnh báo hiệu quả hơn. Bên cạnh đó, một hệ thống cảnh báo lũ quét (FFAS) cũng được phát triển ở quy mô quốc gia. Tất cả dữ liệu đầu vào của hệ thống và thông tin cảnh báo đều phụ thuộc vào lượng mưa radar hoặc vệ tinh thu nhận được.

Tuy nhiên, hệ thống cảnh báo này không đạt được kỳ vọng do có khả năng bỏ sót

hoặc dự báo không chính xác về lượng mưa [37]. Do đó, một hệ thống cảnh báo khác được thiết lập ở các tiểu bang với đầy đủ thiết bị từ quan trắc đến cảnh báo nhằm hỗ trợ tốt hơn công tác cảnh báo lũ quét. Hệ thống với thiết bị quan trắc mưa và mực nước trên sông, đồng thời sử dụng các thiết bị cảnh báo như điện thoại, radio nhằm cảnh báo nguy cơ lũ quét. Ở thời điểm ban đầu, các tình nguyện viên được sử dụng để vận hành các thiết bị quan trắc.

Vấn đề quan trọng nhất lúc này là thống nhất được ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét trên toàn quốc, làm thế nào để có thể dự báo dòng chảy trên sông (mực nước) và từ đó đưa ra kết quả tính toán lượng mưa sao cho lượng mưa này có thể đủ làm dòng chảy trên sông có thể vượt ngưỡng cho phép và đưa ra cảnh báo. Đây chính là tiền thân của hướng dẫn lũ quét (FFG) sau khi xác định được đầy đủ quy trình trong việc xây dựng hệ thống.

Năm 1992, Sweeney mới viết nên hướng dẫn hiện đại hóa lũ quét lưu vực (Modernized Areal Flash Flood Guidance) và đăng tải trên bản ghi nhớ hướng dẫn kỹ thuật NWS HYDRO 44 [38]. Trong đó mô tả đầy đủ các khái niệm cũng như hướng dẫn các bước tính toán xác định ngưỡng mưa sinh lũ. Khái niệm FFG cũng được hình thành (mặc dù lưu lượng tràn bờ đã được Emmett (1975) nghiên cứu trước đó gần 20 năm [39]), mô tả về một lượng mưa bình quân đủ để sinh ra lũ lụt trên các sông suối nhỏ. Cơ sở của FFG là tính toán các giá trị ngưỡng mưa hiệu quả trong một khoảng thời gian cần thiết để gây ra lũ, lượng mưa hiệu quả này được hiểu là lượng mưa dư sau tổn thất do thẩm thấu, giam giữ và bốc hơi trên lưu vực để hình thành dòng chảy tràn trên bề mặt. Sau đó, các ngưỡng FFG được các trung tâm dự báo xác định cụ thể cho từng khu vực.

Tuy có những hướng dẫn khá cụ thể, các trung tâm dự báo lưu vực lại đưa ra các kết quả khá khác nhau về kết quả xác định ngưỡng FFG [40], điều này gây tranh cãi và không mang lại sự thống nhất. Cũng trong thời gian này, Geograkakos cũng trình bày một mô hình khí tượng thủy văn tổng hợp nhằm dự báo tổng hợp mưa và lũ quét [41] trong nỗ lực xây dựng hệ thống dự báo theo thời gian thực. Bộ lọc Kalman được mở rộng và cung cấp khả năng dự báo xác suất theo thời gian thực về sự xuất hiện lũ lụt và cường độ lũ lụt.

Năm 1999, tự nhận thấy một số thiếu sót trong quy trình xác định FFG hiện có của mình, NWS đã xác định rằng cần phải cải thiện hướng dẫn lũ quét và chỉ số FFG trên toàn bộ đất nước [42]. Hệ thống thông tin địa lý (GIS) và cơ sở dữ liệu độ cao địa hình kỹ thuật số đã được sử dụng để phát triển hệ thống ở quy mô quốc gia về ngưỡng dòng chảy. Trung tâm nghiên cứu thủy văn Hoa Kỳ (HRC) đã thực hiện cải thiện vấn đề này. Quy trình tính toán FFG chính thức được hoàn thiện trên cơ sở đường lũ đơn vị với phạm vi cho các lưu vực được xác định từ 5÷1000km²) [42] dựa trên các thuật toán tiêu

chuẩn xác định FFG do Sweeney và Geograkakos công bố.

Phương pháp này bao gồm việc xác định lưu lượng tràn bờ ($Q_{bankfull}$) trong điều kiện có số liệu về mặt cắt chi tiết và trong điều kiện thiếu số liệu địa hình. Theo đó, trong điều kiện có đủ số liệu về mặt cắt, phương pháp tính toán thủy văn và thủy lực trên lòng dẫn được mô tả trong cuốn Thủy văn ứng dụng của Ven Te Chow và cộng sự (1988) [43] được áp dụng để xác định lưu lượng tràn bờ. Trong điều kiện thiếu số liệu mặt cắt, lưu lượng ứng với tần suất 50% (chu kỳ lặp lại 2 năm mỗi lần) được thực hiện để xác định thay thế lưu lượng tràn bờ. Từ kết quả tính lưu lượng tràn bờ, xác định lưu lượng hiện tại để tính ra lưu lượng cần thiết gây lũ tràn bờ và tính ngược lại lượng mưa hiệu quả để tạo ra lưu lượng bổ sung, từ đó đưa ra kết quả dự báo mưa sinh lũ quét.

Hơn hai mươi năm sau, hệ thống hướng dẫn lũ quét (FFGS) với phạm vi phủ sóng toàn cầu đã cung cấp các sản phẩm hướng dẫn và đánh giá theo thời gian thực cho hơn 60 quốc gia, phục vụ gần 3 tỷ người [44]. Bản thân hệ thống FFGS là một hệ thống phức tạp với các mô hình khí tượng toàn cầu và mô hình thủy văn kết hợp. Các dữ liệu quan sát vệ tinh toàn cầu đến các dữ liệu quan trắc ở cấp quốc gia (radar…) được tích hợp vào hệ thống và là đầu vào trong công tác dự báo nguy cơ lũ quét. Trong FFGS có rất nhiều sản phẩm, trong đó, các sản phẩm quan trọng gồm có [45]: (1) độ ẩm đất trung bình (ASM); (2) ngưỡng dòng chảy tràn (FFG); (3) lượng mưa dự báo trung bình khu vực (FMAP); và (4) chỉ số dự báo nguy cơ lũ quét (FFFT).

Từ những năm 2010 trở lại đây, dưới sự phát triển của công nghệ GIS, viễn thám, hàng loạt các nghiên cứu về lũ quét theo phương pháp chồng chập nhân tố đã được tiến hành nhằm đánh giá tính nhạy cảm (susceptibility) với lũ quét. Hướng tiếp cận này khá đơn giản: đánh giá mức độ thường xuyên xảy ra lũ quét của một khu vực qua tổ hợp nhiều yếu tố như độ dốc, lượng mưa trung bình năm và các đặc trưng khác nào đó về đặc điểm địa hình [46, 47, 48]. Do cấu trúc đơn giản, phần lớn nghiên cứu theo hướng này mới chỉ khoanh được các vùng nhạy cảm cao với lũ quét, chưa xác định được nguy cơ xảy ra lũ quét (điều kiện cụ thể để xảy ra lũ quét). Thông thường, các nghiên cứu này sử dụng phương pháp phổ biến như các phương pháp chồng chập nhân tố: AHP [49, 50], tỷ lệ tần suất FR [51], trọng số dẫn chứng WOE [52]… hoặc các thuật toán học máy như hồi quy tuyến tính, hồi quy logistic, máy vectơ hỗ trợ (SVM) và cây quyết định [53]…

Các nghiên cứu này thường đưa ra bản đồ là những khu vực có nguy cơ chịu tác động của lũ quét. Dù không chỉ ra được thời điểm hay điều kiện cụ thể phát sinh lũ quét, các bản đồ dạng này vẫn hỗ trợ cơ quan quản lý trong quy hoạch sử dụng đất và bố trí, di dời dân cư.

Một cách tiếp cận khác được các nhà khoa học châu Á áp dụng khá phổ biến trong nghiên cứu lũ quét là sử dụng đường tới hạn CL theo hướng dẫn phương pháp thiết lập

tiêu chí cảnh báo lũ bùn đá và sạt lở dựa trên chỉ số lượng mưa do Bộ Đất đai, Cơ sở hạ tầng, Giao thông và Du lịch (MLIT) Nhật Bản ban hành năm 2005 [54]. Mặc dù hướng dẫn này nhằm sử dụng cho lũ bùn đá và sạt lở đất, các nhà khoa học đã có sự chuyển đổi linh hoạt sang cho vấn đề lũ quét nhằm đánh giá nguy cơ lũ quét dựa trên lượng mưa thời đoạn và lượng mưa kích hoạt.

1.2.2. Quá trình nghiên cứu lũ quét ở Việt Nam

Các ghi chép về lũ lụt ở Việt Nam bắt đầu từ triều Lý, các trận lụt lớn được mô tả một cách sơ sài như năm 1037 (Đinh Sửu): lụt to, năm 1050 (Canh Dần): tháng sáu lụt lớn, năm 1053 (Quý Tỵ): từ tháng 7 đến tháng 8 lụt lớn, năm 1120 (Canh Thân): lụt đến tận cửa Đại Hưng… [55]. Cụm từ về lũ quét hầu hết không được nhắc đến trong các mô tả, phần lớn là "tràn qua", "cuốn trôi mọi thứ"…

Năm 1985, Trần Đức Hải trong một chương trình "Nghiên cứu tính toán và dự báo dòng chảy lũ sông ngòi Việt Nam" đã thực hiện nghiên cứu "Một vài nhận xét về dòng chảy từ sườn dốc" [56]. Nghiên cứu đã chỉ ra đặc điểm hình thành dòng chảy từ sườn dốc ở vùng núi có rừng (dòng chảy mặt bão hòa và dòng sát mặt). Đã xác định mối quan hệ giữa hệ số tổn thất và chỉ số tiêu ẩm đặc trưng bằng mô-đun dòng chảy trước lũ. Nghiên cứu cũng đã xây dựng quan hệ giữa hệ số dòng chảy, giữa tốc độ truyền lũ lớn nhất với diện tích lưu vực và một số vấn đề ảnh hưởng của rừng đến dòng chảy lũ. Đây có thể nói là một trong những khởi đầu trong nghiên cứu về lũ quét ở Việt Nam được công bố.

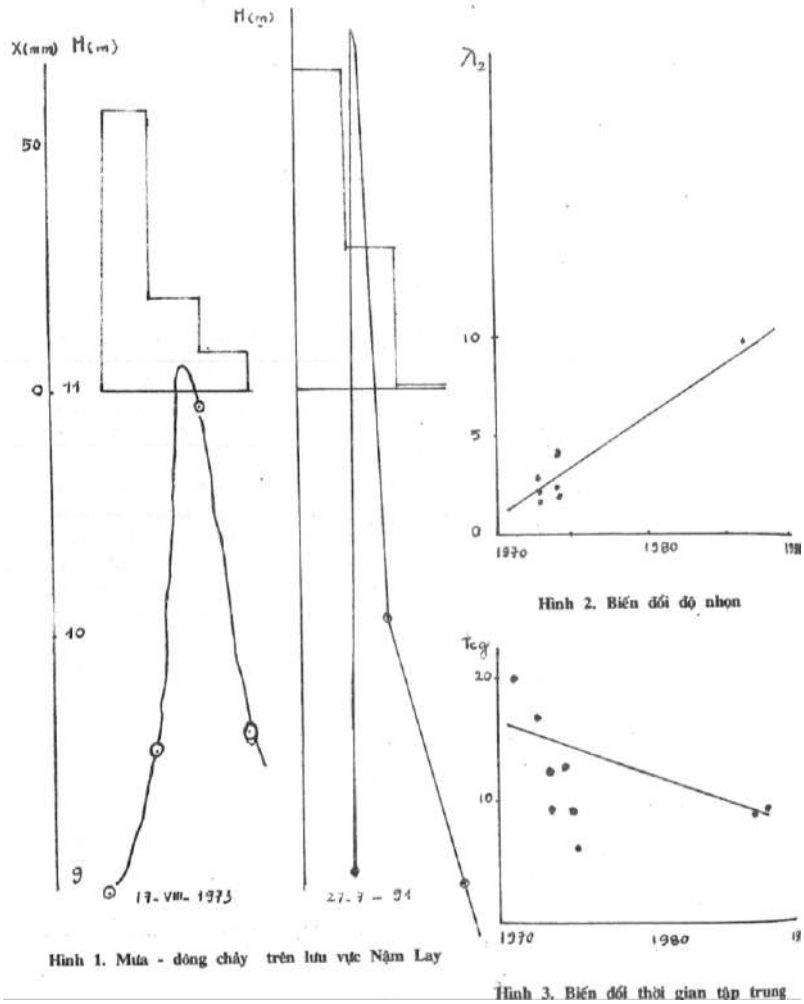
Ngày 27/6/1990, một trận lũ quét kinh hoàng đã xảy ra tại thị xã Lai Châu, quét đi toàn bộ phần thấp nhất của thị xã, cuốn trôi hơn 300 người, 104 người chết và hơn 200 người bị thương. Đây là trận lũ lớn nhất trong giai đoạn này. Tiếp đến năm 1991, tại thị xã Sơn La lại xảy ra một trận lũ quét vào ngày 27/7, làm chết 21 người, 11 người mất tích, hàng trăm ngôi nhà bị sập [57]. Những thiệt hại này đã thúc đẩy các chương trình/dự án đầu tư nhiều hơn cho nghiên cứu về lũ quét, dù trong giai đoạn này vẫn còn nhiều khó khăn.

Năm 1992, tại Hội nghị khoa học Viện Khí tượng Thủy văn, Đoàn Quyết Trung đã trình bày bài "Nhận xét bước đầu về lũ quét" [58] chỉ ra các vấn đề về dòng chảy sườn dốc nói chung. Trong đó khẳng định việc sinh lũ ở Việt Nam chủ yếu do cơ chế bão hòa hình thành, tức là do lớp dòng chảy sát mặt (mà trong các nghiên cứu trên thế giới còn gọi là runoff). Khi đất bão hòa mà tiếp tục gây ra lượng mưa, lớp mưa trên cùng gọi là dòng chảy bão hòa.

Trong nghiên cứu đó, Đoàn Quyết Trung đã chỉ ra vấn đề về suy giảm chất lượng thảm phủ làm tăng mạnh biên độ lũ. Vào thời điểm đánh giá, hai trận lũ tại lưu vực Nậm Lay được đưa ra so sánh (trận lũ vào tháng 8 năm 1973 và trận lũ vào tháng 7 năm 1991),

kết quả cho thấy với lượng mưa gần như tương tự nhau (85,3mm năm 1973 và 94,2mm năm 1991), biên độ lũ năm 1991 gấp hơn 2 lần (về mực nước). Nghiên cứu đã chỉ ra thời gian tập trung dòng chảy lũ đã suy giảm từ 10-12 giờ (năm 1973) xuống chỉ còn khoảng 4 giờ (năm 1991), đó là nguyên nhân chính gây ra sự chênh lệch về biên độ lũ.

Cũng trong giai đoạn đó (1992÷1995), Cao Đăng Dư cùng Lê Bắc Huỳnh đã thực hiện nghiên cứu đề tài khoa học cấp nhà nước "Nghiên cứu nguyên nhân hình thành và các giải pháp phòng chống lũ quét". Trong đó đã đưa ra một khái niệm về bản chất của lũ quét, những nhận định về lượng mưa sinh lũ quét và đặc điểm lưu vực sinh lũ quét. Về lượng mưa sinh lũ quét, Cao Đăng Dư cho biết lũ quét xảy ra do những trận mưa lớn. Các ngưỡng mưa gây lũ quét cũng biến đổi ở phạm vi rất lớn, từ 100 mm/giờ đến 220 mm/ngày.



Hình 1 - 1. Chênh lệch biên độ lũ 2 trận lũ tại Nậm Lay [58]

Hầu hết các lưu vực phát sinh lũ quét đều có độ dốc bình quân lớn hơn 30% và độ che phủ của rừng thấp hơn 10% bề mặt lưu vực. Đồng thời, đất đai là yếu tố quan trọng trong việc hình thành dòng chảy. Nếu đất có tính thấm tốt sẽ hạn chế được quá trình hình thành dòng chảy mặt, ngược lại nếu tính thấm kém, thì dòng chảy mặt của cơn lũ quét sẽ tăng lên [59].

Quan trọng nhất, là sự nhận định về bản chất của hiện tượng lũ quét. Lê Bắc Huỳnh mô tả: "Thực chất của lũ quét là hiện tượng chảy tập trung trong một thời gian ngắn của lượng mưa, bùn đá, rác bẩn với khối lượng lớn từ mặt lưu vực nhỏ nhất vùng núi dốc vào mạng sông suối tạm thời và thường xuyên tạo thành dòng lũ bùn rác bẩn trong lòng

dẫn, rồi bồi lấp bùn cát, rác bẩn ở những khu trũng, vùng thấp và một phần cùng với nước tiêu thoát ra sông chính. Trong quá trình chuyển động, hầu như nó quét sạch các khu vực mà nó tràn qua" [60].

Nhận định này nêu ra vấn đề tập trung dòng chảy một cách mờ nhạt và làm nổi bật hàm lượng bùn, vật chất trong lũ quét, đặc biệt là sự nhấn mạnh yếu tố "quét sạch". Đây là một trong những nhận định tồn tại nhiều năm trong góc nhìn về lũ quét, làm cho hiện tượng này trở nên khó xác định hơn.

Các khái niệm về lũ quét ở Việt Nam cho đến năm 2013 vẫn không có sự thống nhất, đặc biệt là luôn gắn liền với lũ bùn đá, sạt lở đất. Trung tâm Khí tượng thủy văn Quốc gia đã từng đưa thông tin về lũ quét như sau (năm 2013): Cho đến nay vẫn chưa có định nghĩa thống nhất về lũ quét. Sau đây là một trong những ý kiến chung của các chuyên gia đã nghiên cứu về vấn đề này: "Lũ quét là hiện tượng lũ bùn đá, lũ lớn được hình thành từ mưa, xảy ra cực nhanh, có sức tàn phá rất lớn" [61]. Sự gắn chặt lũ quét với lũ bùn đá, sạt lở đất đã tạo ra nhiều nghiên cứu với các sản phẩm là "bản đồ lũ quét sạt lở đất" (cảnh báo được cho cả hai loại hình riêng biệt) [62]. Mãi đến năm 2014, lần đầu tiên khái niệm lũ quét được đưa vào trong quy định của pháp luật [20]: Lũ quét là lũ xảy ra bất ngờ trên các lưu vực sông suối nhỏ miền núi, dòng chảy xiết, thường kèm theo bùn đá, lũ lên nhanh, xuống nhanh, có sức tàn phá lớn.

Cho đến nay, khái niệm về lũ quét vẫn không có sự thay đổi, tuy nhiên nó đã trả lại đúng bản chất của loại hình thiên tai này, đó là "lũ". Đặc điểm của loại lũ này là xảy ra bất ngờ, lên nhanh xuống nhanh, yếu tố "bùn đá" chỉ là yếu tố đi kèm. Và quan trọng nhất, do là một dạng lũ nên để có thể xác định được lũ quét, rất cần việc áp dụng một phương pháp tính toán thủy văn/thủy lực để đưa ra các đặc trưng cơ bản của dòng chảy đặc biệt này.

Từ năm 2000 đến năm 2004, nước ta xảy ra rất nhiều trận lũ quét ở quy mô lớn, gây chết hàng chục người mỗi trận: năm 2000 tại Sa Pa (tháng 7) làm 20 người chết, tại Lai Châu (tháng 10) làm 39 người chết; năm 2002 tại Bắc Quang, Hà Giang (tháng 8) làm 25 người chết, Hà Tĩnh (tháng 9) làm 52 người chết; năm 2004 tại Hà Giang làm 45 người chết… Trước tình hình đó, Ban Chỉ đạo Phòng, chống lụt bão Trung ương đã ra chỉ thị về công tác phòng, chống lụt bão trong các năm tới, bắt đầu từ năm 2005 với phương châm "chủ động phòng tránh – đối phó kịp thời – khắc phục khẩn trương" thay thế cho phương châm trước đây là "đối phó – khắc phục" nhằm thể hiện rõ quyết tâm của Nhà nước trong công tác phòng, chống thiên tai [63]. Công văn cũng phân công rõ trách nhiệm của từng Bộ, Ngành và căn cứ trên chỉ đạo đó, Bộ Tài nguyên và Môi trường đã xây dựng một chương trình phòng tránh lũ quét trên phạm vi toàn quốc theo 2 giai đoạn: Giai đoạn 1 là xây dựng dự án phòng tránh lũ quét cho 14 tỉnh miền núi Bắc Bộ

(2009 – 2012) và giai đoạn 2 cho 19 tỉnh miền Trung và Tây Nguyên (2012 – 2017).

Sau khi triển khai kết thúc giai đoạn 1 vào năm 2012, giai đoạn 2 được thực hiện với Dự án "Điều tra, khảo sát, xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ lũ quét khu vực miền Trung, Tây nguyên, và xây dựng hệ thống thí điểm phục vụ cảnh báo cho các địa phương có nguy cơ cao xảy ra lũ quét phục vụ công tác quy hoạch, chỉ đạo điều hành phòng tránh thiên tai thích ứng với biến đổi khí hậu". Sau nhiều lần điều chỉnh dự án, Bộ Tài nguyên và Môi trường đã bổ sung nội dung hợp tác với Trung tâm nghiên cứu Thủy văn Hoa Kỳ (HRC) để xây dựng hệ thống hỗ trợ cảnh báo lũ quét Việt Nam VNFFGS (bao gồm 2 hệ thống con: hệ thống tác nghiệp cảnh báo lũ quét VNOFFG và hệ thống hỗ trợ phân tích lũ quét VNAFFG). Đây là bước tiếp cận phương pháp cảnh báo lũ quét tiên tiến nhất thế giới lúc bấy giờ (thực hiện giai đoạn 2016-2018). Đến năm 2025, ở Việt Nam đang vận hành 2 hệ thống tác nghiệp bao gồm VNFFGS và SEAFFGS (SEAFFGS thay thế cho MRCFFGS).

Song song với sự phát triển đó, là các nghiên cứu độc lập về lũ quét theo các chương trình các cấp được tiến hành, trong đó chủ yếu là xây dựng bản đồ nhạy cảm với lũ quét theo phương pháp chồng chập đa nhân tố [64, 65, 66] và ngưỡng mưa sinh lũ quét theo phương pháp đường tới hạn CL [67].

1.3. Tổng quan nghiên cứu về các đặc trưng lũ quét

1.3.1. Đặc trưng dòng chảy lũ quét

Dòng chảy lũ quét là một dòng chảy nguy hiểm và có những đặc trưng quan trọng để có thể nhận diện, mặc dù khó có thể phân loại một cách rõ ràng, các đặc trưng sau đây thường xuất hiện trong các trận lũ quét.

1. Về khả năng cuốn trôi vật liệu của dòng chảy lũ

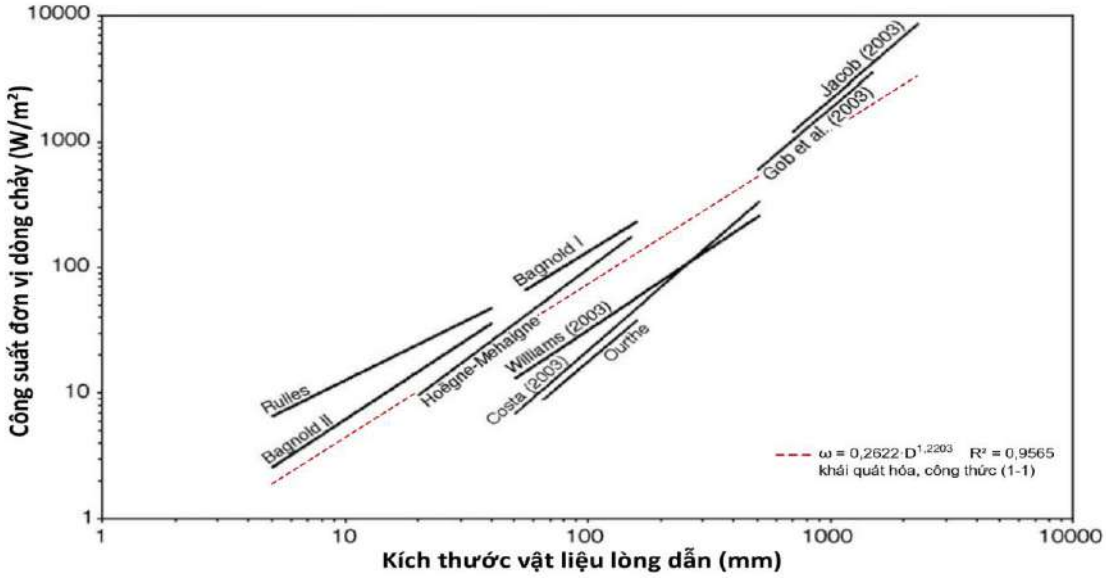
Do có năng lượng lớn, các vật cản trên đường đi của dòng chảy lũ sẽ có khả năng bị cuốn trôi, trong nhiều trường hợp, kích thước vật liệu có thể từ vài chục xăng-ti-mét đến vài mét. Hình 1 - 2 mô tả kích thước đá bị cuốn trôi trong trận lũ tại Hồ Bốn, 2023.



Hình 1 - 2. Hình ảnh dòng chảy lũ quét cuốn trôi vật liệu tại Hồ Bốn, 2023

Khả năng cuốn trôi vật liệu của dòng chảy đã được một số nhà khoa học thực hiện nghiên cứu, trong đó điển hình là Petit và cộng sự (2005) [28]. Ông và các cộng sự đã

chỉ ra được quan hệ giữa công suất đơn vị của dòng chảy và kích thước vật liệu có khả năng bị cuốn trôi dựa trên các đánh giá về các trận lũ quét của nhiều nhà nghiên cứu khác nhau và thể hiện như hình dưới đây.



Hình 1 - 3. Công suất đơn vị dòng chảy và kích thước vật liệu bị đẩy trôi [28], đường nét đứt: quan hệ khái quát theo công thức (1-1)

Công thức tổng quan của sự tương quan này thể hiện như sau:

$$\omega = aD^b \qquad (1\text{-}1)$$

Trong đó, a, b là hệ số và D là đường kính (mm); ω là công suất đơn vị dòng chảy (W/m²). Công suất đơn vị dòng chảy là tỷ số giữa tổng công suất dòng chảy (W/m) và bề rộng dòng chảy (m). Mỗi nghiên cứu đặc trưng cho một khu vực, do vậy cần khái quát hóa quan hệ trong bài toán tổng thể.

Lưu ý, công thức (1-1) là công thức hồi quy thực nghiệm, hệ số a mang thứ nguyên $(W/m^2).mm^{-b}$ để cân bằng đơn vị, còn b là số mũ không thứ nguyên; quan hệ chỉ có ý nghĩa trong khoảng D đã khảo sát.

Đường nét đứt trong Hình 1 - 3 là quan hệ (1-1) khái quát từ các quan hệ do nhiều nhà khoa học xây dựng, hồi quy lũy thừa qua 18 điểm đầu mút của 9 đường quan hệ. Kết quả cho thấy a = 0,262 và b = 1,22 có thể được sử dụng để xây dựng tương quan công suất đơn vị dòng chảy và kích thước vật liệu bị đẩy trôi. Với lũ quét, có thể xem xét khả năng cuốn trôi mọi thứ trên đường đi, do vậy kích thước hạt là tương đối lớn. Theo Marchi và cộng sự (2016) [5], công suất đơn vị dòng chảy của các trận lũ quét ở Châu Âu thu thập được dao động từ 100÷5.000 W/m² và tổng công suất dòng chảy của các trận lũ quét thu thập dao động từ 580÷410.000 W/m.

2. Về vận tốc dòng chảy lũ

Vận tốc dòng chảy lũ là một yếu tố thường được nhắc tới khi xét đến lũ quét, do yếu tố nhanh mà trận lũ hình thành và rõ ràng vận tốc lớn làm cho dòng chảy mang năng lượng lớn. Nhanh ở đây có thể được hiểu bằng chỉ số vận tốc, dòng chảy trên các dòng sông cổ như sông Hồng, sông Cửu Long mang nguồn năng lượng lớn nhưng có vận tốc chưa đủ lớn, vì vậy, lũ trên các đoạn sông này không gọi là lũ quét.

Vận tốc dòng chảy được nghiên cứu rất nhiều trong lũ quét, tuy nhiên chủ yếu tập trung vào việc xác định thông số vận tốc cho các trận lũ đã xảy ra trong quá khứ mà chưa có nghiên cứu phân loại cụ thể. Tổng hợp sau đây thể hiện các giá trị vận tốc của các trận lũ quét đã xảy ra trong quá khứ ở trong nước và trên thế giới được các nhà nghiên cứu tổng hợp, đánh giá.

Bảng 1 - 2. Vận tốc dòng chảy của một số trận lũ quét

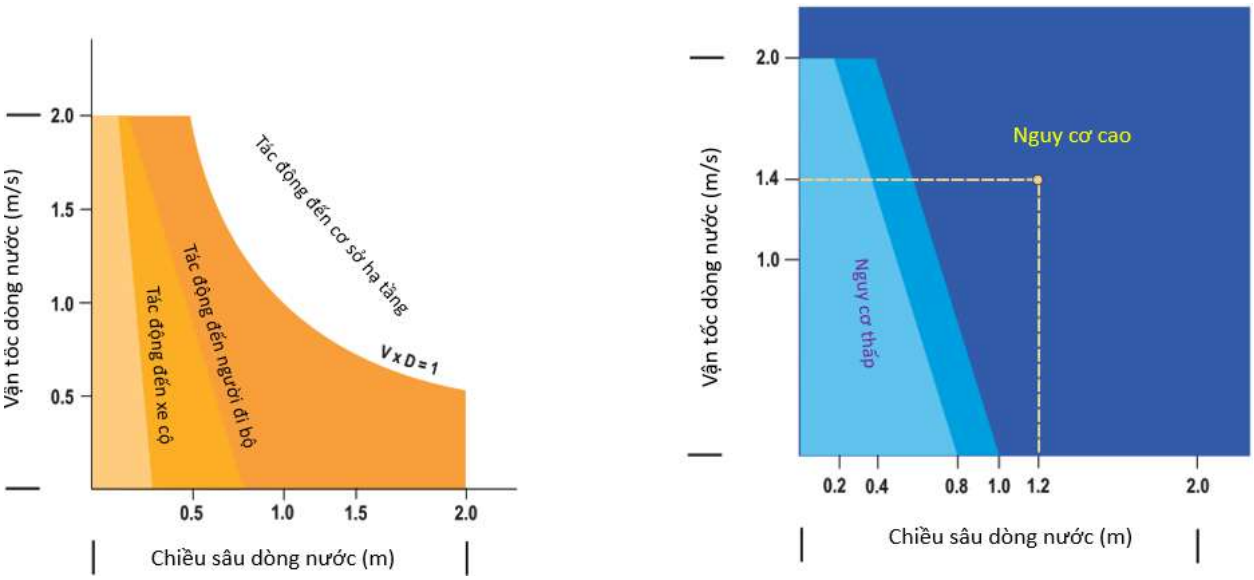
TT	Khu vực	Khoảng vận tốc (m/s)	Tham chiếu
1	Colorado, Hoa Kỳ	2,7 ÷ 9,1	Clements và Casani (2016) [68]
2	Mandra, Hy Lạp	4,0 ÷ 8,7	Spyrou và cộng sự (2020) [69]
3	Catalonia, Tây Ban Nha	3,8 ÷ 10,2	Martín-Vide và cộng sự (2023) [70]

Tuy nhiên vận tốc dòng chảy chỉ là một tham số của dòng chảy lũ quét, một trận lũ quét thường có vận tốc cao, nhưng việc một dòng chảy có vận tốc cao không thể kết luận được đó là dòng chảy lũ quét. Dòng chảy trên các mái dốc hoặc mái nhà hay thậm chí là qua vòi nước là một điển hình cho minh chứng này.

3. Về mức độ nguy hiểm của dòng chảy lũ

Mức độ nguy hiểm của dòng chảy lũ với các đối tượng đã được Bộ Cơ sở hạ tầng và phát triển địa phương (Úc) trình bày trong Hướng dẫn phát triển đồng bằng ngập lũ năm 1986 và sửa đổi năm 2005 [71]. Mặc dù hướng dẫn cho đồng bằng ngập lũ, tài liệu này lại chỉ ra các tham số về bản chất dòng chảy (các tham số nội tại của dòng nước: vận tốc, mực nước) không phụ thuộc vào điều kiện địa hình, do đó hoàn toàn có thể sử dụng để tham khảo cho các dòng chảy ở khu vực khác.

Hình 1 - 4 cho thấy mức độ tác động của dòng chảy đến các đối tượng có liên quan đến chiều sâu dòng chảy và vận tốc dòng chảy. Trong đó, lũ quét thường sẽ gây nguy hại đến cơ sở hạ tầng. Do vậy, tích vận tốc và độ sâu dòng chảy phải lớn hơn 1,0 m^2/s, dòng chảy lũ quét thường tác động đến người, phương tiện và cơ sở hạ tầng, trong đó đáng chú ý là phương tiện giao thông như xe ô tô cá nhân có thể dễ dàng bị tác động nếu đi qua khu vực xảy ra lũ quét.



Hình 1 - 4. Tác động của dòng chảy đến các đối tượng [71]

Khi đó, mức độ sâu tối thiểu cần thiết để gây mất an toàn cho xe là 0,3m [72] với dòng chảy ở mức khá ổn định (như qua ngầm tràn…), đối với lũ quét thường xảy ra trên các sông, suối nhỏ, sự xáo trộn dòng do có độ nhám lớn làm khả năng đẩy trôi suy giảm bởi lực cản [73], vì vậy, cần xem xét độ sâu dòng chảy lớn hơn để được xem là một trận lũ quét.

4. Thời gian sinh lũ

Lũ quét sự xuất hiện trong thời gian ngắn, thường là dưới 6 giờ. Thời gian này là thời gian tính từ khi mưa để tạo ra lưu lượng cực đại, hay còn gọi là thời gian đạt đỉnh lũ (time to peak). Yếu tố dưới 6 giờ thể hiện mức độ nguy cấp của dòng chảy, khó có đủ thời gian chuẩn bị đầy đủ nguồn lực nhằm ứng phó hiệu quả với lũ quét.

1.3.2. Đặc trưng các yếu tố gây lũ quét

1. Yếu tố khí tượng thủy văn

Lượng mưa là nguyên nhân chính gây ra lũ quét tự nhiên (không xét đến yếu tố nghẽn dòng hay vỡ đập). Các trận mưa lớn với cường độ cao thường gây ra lũ quét [7, 74]. Cường độ mưa lớn làm tăng nhanh lượng nước chảy tràn trên bề mặt, vượt quá khả năng thấm của đất và gây ra lũ quét.

Costa (1987) đã thống kê những trận lũ quét lớn xảy ra tại Hoa Kỳ trước những năm 1970s về cường độ theo thời gian từ 1 phút đến 24 giờ [7]. Trong đó, trận lũ xảy ra tại Maryland năm 1956 có cường độ mưa lớn nhất trong 1 phút đạt lên tới 32mm; 178mm/30 phút ở Ohio năm 1914…

Bảng 1 - 3. Tổng hợp thông tin một số trận mưa lớn nhất ở Hoa Kỳ theo Costa (1987) [7]

TT	Lượng mưa lớn nhất (mm)	Trong khoảng thời gian	Thời gian xảy ra	Địa điểm xảy ra
1	32	1 phút	04/07/1956	Unionville, Maryland
2	100	14 phút	04/06/1871	Galveston, Texas
3	178	30 phút	16/07/1914	Cambridge, Ohio
4	305	42 phút	22/06/1947	Holt, Missouri
5	254	60 phút	26/07/1819	Catskill, New York
6	483	2 giờ 10 phút	18/07/1889	Rockport, West Virginia
7	559	2 giờ 45 phút	31/05/1935	D'Hanis, Texas
8	782	4 giờ 30 phút	18/07/1942	Smethport, Pennsylvania
9	876	15 giờ	17-18/07/1942	Smethport, Pennsylvania
10	925	18 giờ	09/09/1921	Thrall, Texas
11	1090	24 giờ	25-26/07/1979	Alvan, Texas

Các trận lũ quét thường xảy ra do cường độ mưa lớn, thông thường được xác định ở độ phân giải chi tiết như mm/giờ hoặc mm/10 phút do thời gian xảy ra lũ quét nhanh chóng, các dữ liệu quan trắc mưa với độ phân giải 6 giờ hoặc độ phân giải ngày không phản ánh được mức độ nguy hiểm của dòng chảy lũ do yếu tố bình quân hóa lượng mưa trong khoảng thời gian xảy ra mưa.

Bên cạnh đó, sự phân bố mưa theo không gian cũng ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình hình thành lũ quét tại các khu vực khác nhau. Mưa cường độ cao nhưng xảy ra cục bộ tại khu vực hạ du ít có khả năng hình thành lũ quét hơn so với mưa cục bộ xảy ra ở thượng nguồn lưu vực. Các trận mưa lớn ở hạ du thường gây ra ngập lụt lớn trên diện rộng.

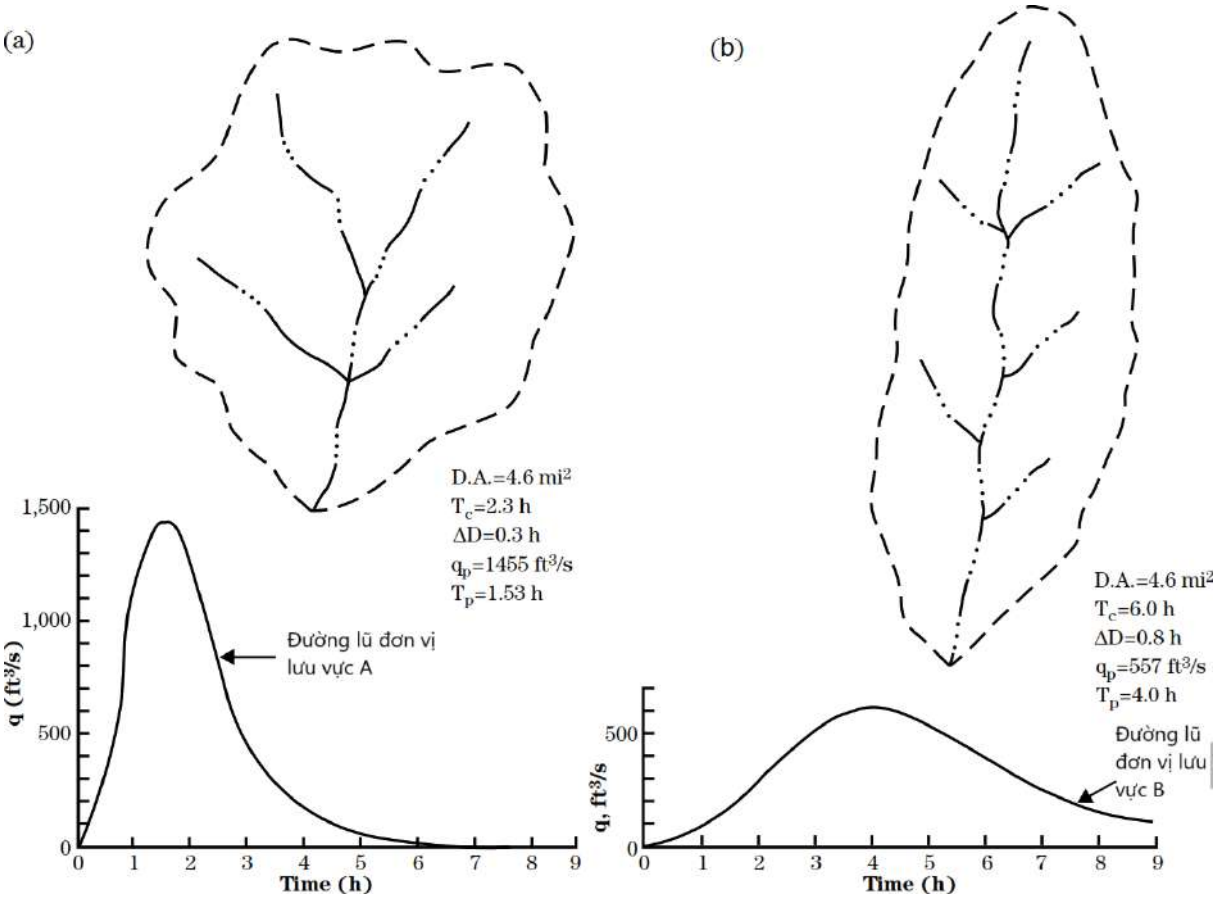
Mặc dù vậy, các khu vực miền núi lại xuất hiện mưa lớn ở thượng nguồn lưu vực phổ biến hơn ở hạ du, điều này gây ra lũ quét thường xuyên hơn so với các khu vực đồng bằng. Lý do chính là bản chất của việc hình thành mưa, khi không khí ẩm tiếp cận một dãy núi, khối khí theo hướng núi sẽ bay lên trên cao và nhiệt độ sẽ hạ xuống nhanh hơn làm hơi nước trong không khí dễ đạt đến điểm sương và ngưng tụ, hình thành các trận mưa lớn ở sườn đón gió của núi [75, 76]. Các khu vực miền núi thường có mưa ở thượng nguồn, kết hợp với độ dốc cao đã gây ra lũ quét một cách nghiêm trọng. Bên cạnh đó, các cơn mưa vùng nhiệt đới (như nước ta) thường có lượng mưa lớn hơn và gây ra lũ quét khốc liệt hơn [74].

Bên cạnh mưa lớn, độ ẩm của đất cũng là nguyên nhân chính gây ra lũ quét. Khi

bề mặt có độ ẩm cao làm cho lượng mưa vượt tổn thất thấm nhanh hơn và hình thành dòng chảy mặt nhiều hơn, từ đó làm tăng nguy cơ lũ quét. Độ ẩm cao là nguyên nhân của việc suy giảm khả năng thấm bề mặt.

2. Yếu tố địa hình và hình thái lưu vực

Địa hình đóng vai trò quyết định trong việc tập trung và tăng tốc dòng chảy. Các lưu vực có hình dạng khác nhau có thể tạo ra các loại lũ quét khác nhau, với tốc độ và cường độ khác nhau. Lưu vực có độ dốc lớn có xu hướng tạo ra dòng chảy nhanh hơn, làm tăng nguy cơ lũ quét. Độ dốc càng lớn thì vận tốc dòng chảy càng cao, làm tăng nhanh lưu lượng lũ [7].



Hình 1 - 5. Đường lũ đơn vị của 2 lưu vực theo hình dạng [77]

Hình dạng lưu vực cũng là một trong những yếu tố quyết định đến mức độ của lũ quét. Các lưu vực hình tròn hoặc gần tròn có xu hướng dễ gây lũ quét hơn là các lưu vực có hình dạng thuôn dài (thể hiện trong Hình 1 - 5). Lý do là vì các lưu vực hình tròn cho phép lượng nước tập trung từ các phần khác nhau của lưu vực đi đến điểm cửa ra của lưu vực cùng lúc và gây nên đỉnh lũ gộp lớn hơn trong cùng một thời điểm [78]. Các lưu vực có tỷ lệ kéo dài cao thường có hình dạng thuôn dài, nghĩa là nước phải di chuyển một khoảng cách xa hơn để đến điểm xả lũ. Điều này có thể làm tăng thời gian tập trung của dòng chảy và làm giảm lưu lượng đỉnh lũ [7].

Các chỉ số hình thái lưu vực còn được dùng để nhận diện dạng lũ có thể xảy ra: Wilford và cộng sự (2004) [79] dùng tỷ số Melton kết hợp chiều dài lưu vực để phân biệt lưu vực dễ xảy ra dòng bùn đá, lũ bùn đá hoặc lũ nước.

3. Yếu tố thảm phủ

Yếu tố thảm phủ là rất quan trọng và ảnh hưởng trực tiếp đến sự điều tiết dòng chảy lũ trên lưu vực. Các khu vực có thảm phủ tốt (như rừng lâu năm) có đỉnh lũ thấp hơn nhiều so với các khu vực đất trống trong cùng điều kiện lưu vực. Lý giải cho việc này là tổn thất thấm ban đầu của các khu vực có thảm phủ tốt cao hơn rất nhiều so với các khu vực đất trống, do đó, lượng dòng chảy mặt trực tiếp sinh ra bởi lượng mưa là ít hơn. Bên cạnh đó, các khu vực có thảm phủ tốt thường có bộ rễ cây phát triển mạnh, nhiều nghiên cứu đã chứng minh tốc độ thẩm thấu liên tục qua khu vực có hệ thống rễ cây phát triển mạnh nhanh hơn nhiều so với các khu vực có bộ rễ phát triển kém [80]. Các tổn thất lớn sẽ làm giảm dòng chảy mặt, từ đó gây suy giảm đỉnh lũ.

1.4. Tổng quan các phương pháp xác định nguy cơ lũ quét

1.4.1. Đánh giá tính nhạy cảm với lũ quét

Phần lớn các kết quả nghiên cứu về lũ quét được công bố có liên quan đến đánh giá tính nhạy cảm với lũ quét. Mặc dù là phương pháp đơn giản, các nghiên cứu này lại có lượng dữ liệu lớn và đa dạng. Các loại dữ liệu được sử dụng thông thường bao gồm: (1) Dữ liệu liên quan đến yếu tố địa hình như: độ dốc, độ cong, cao độ…; (2) Dữ liệu liên quan đến yếu tố thủy văn như: khoảng cách đến sông suối, mật độ sông suối, chiều dài dòng chảy…; (3) Dữ liệu liên quan đến thảm phủ bề mặt như: sử dụng đất, chỉ số NDVI…; (4) dữ liệu liên quan đến loại đất như: nhóm đất thủy văn, nhóm đất, kết cấu đất…

Để kết hợp được rất nhiều các yếu tố, các nhà nghiên cứu sử dụng phương pháp chồng chập đa nhân tố để đưa ra bản đồ cuối cùng về nguy cơ. Mỗi loại dữ liệu được xác định cho một hệ số tác động đến kết quả hình thành lũ quét. Các phương pháp sau đây là phổ biến trong việc đánh giá tính nhạy cảm với lũ quét:

1. Phương pháp phân tích thứ bậc

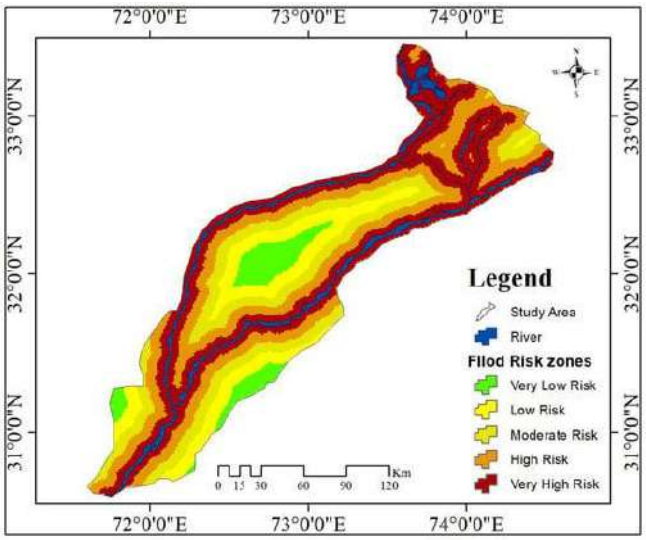
Phương pháp phân tích thứ bậc (AHP) được biết đến là một phương pháp đưa ra phương án quyết định dựa trên đa tiêu chí. Phương pháp này được phát triển bởi Thomas L. Saaty năm 1977 [81]. Bài báo này có số lượt trích dẫn lên tới hơn 5.000 lượt theo thống kê của Crossref (tính đến tháng 9/2023).

Nội dung của phương pháp AHP bao gồm 5 bước: (1) Xác định các yếu tố liên quan và phương án quyết định; (2) Xây dựng ma trận tương quan để đánh giá mức độ quan trọng của các yếu tố liên quan. Trong ma trận này, mỗi ô thể hiện mức độ quan

trọng của yếu tố dòng (row) đối với yếu tố cột (column); (3) Xác định trọng số của các yếu tố thể hiện mức độ quan trọng của các yếu tố đó. Trọng số của các yếu tố được tính toán từ ma trận tương quan; (4) Xây dựng ma trận quyết định để đánh giá mức độ ưu tiên của các phương án quyết định đối với các yếu tố liên quan. Trong ma trận này, mỗi ô thể hiện mức độ ưu tiên của phương án dòng (row) đối với yếu tố cột (column); và (5) Tính toán kết quả là thứ tự ưu tiên của các phương án quyết định. Thứ tự ưu tiên này được tính toán từ ma trận quyết định và trọng số của các yếu tố.

Với ưu điểm là một phương pháp tổng quát, có thể áp dụng cho nhiều loại vấn đề khác nhau, phương pháp này đã được áp dụng trong việc xác định tính nhạy cảm lũ quét với các yếu tố đã được trình bày ở trên. Do sử dụng dữ liệu lớn với đa phần là dữ liệu về không gian, phương pháp này đang dần phổ biến trong những năm gần đây.

Tariq và cộng sự (2022) đã sử dụng phương pháp AHP trong việc xác định tính nhạy cảm lũ quét cho 2 lưu vực sông Jhelum và Chenab ở Ấn Độ [51] dựa trên 8 yếu tố bao gồm (1) độ dốc; (2) độ cao; (3) mật độ sông suối; (4) Lượng mưa; (5) thảm phủ; (6) khoảng cách đến sông suối; (7) địa chất; và (8) loại đất. Kết quả xây dựng bản đồ và phân tích trong số được thể hiện ở Hình 1 - 6.



Hình 1 - 6. Bản đồ tính nhạy cảm lũ quét bằng phương pháp AHP theo Tariq và cộng sự (2022) [51]

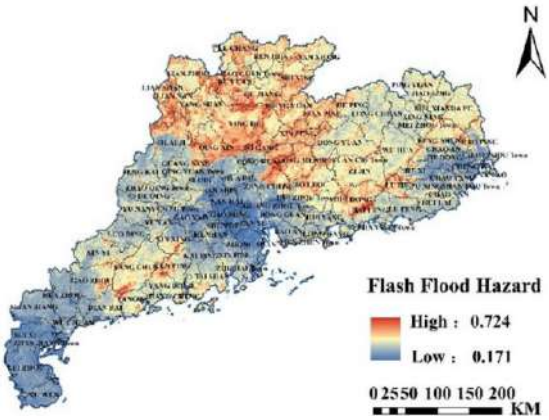
Bảng 1 - 4. Bản đồ ma trận và trọng số quyết định theo AHP [51]

Các yếu tố	**SL**	**E**	**DD**	**R**	**LULC**	**DS**	**G**	**So**	**SFWV**
Độ dốc (SL)	1,00	0,20	5,00	4,00	2,00	1,00	4,00	0,30	0,0152
Độ cao (E)	1,00	0,23	0,90	5,00	1,00	4,00	2,00	0,30	0,0254
Mật độ sông suối (DD)	2,00	5,00	4,00	0,20	1,00	5,00	3,00	1,00	0,2569
Lượng mưa (R)	0,25	0,12	1,00	0,23	0,50	1,00	1,00	0,30	0,0452
Thảm phủ (LULC)	0,10	0,12	0,17	0,45	0,50	0,13	0,25	1,00	0,1400
KC đến sông suối (DS)	1,00	1,00	3,00	5,00	3,00	5,00	4,00	1,00	0,2592
Địa chất (G)	0,34	0,23	0,25	1,00	0,25	0,18	2,00	0,35	0,1190
Loại đất (So)	0,25	4,00	0,25	1,00	2,00	4,00	3,00	1,00	0,1800

SFWV (Selected Factor Weight Values) – Trọng số nhân tố

Yếu tố lượng mưa trong nghiên cứu này sử dụng là sự chênh lệch lượng mưa so với lượng mưa trung bình nhiều năm tại các trạm (cụ thể trong nghiên cứu này là lượng mưa trung bình từ năm 2010 đến 2015 của 5 trạm quan trắc trong khu vực nghiên cứu). Giá trị phương sai của lượng mưa sẽ được tính toán theo các trạm và được nội suy thành raster mưa dựa trên thuật toán trọng số nghịch đảo IDW.

Kairong Lin và cộng sự (2020) cũng sử dụng phương pháp AHP để xác định tính nhạy cảm lũ quét cho tỉnh Quảng Đông ở Trung Quốc [50] được thể hiện trong Hình 1 - 7, Lin chỉ sử dụng 4 yếu tố nguy cơ đầu vào bao gồm (1) cao độ địa hình; (2) độ dốc; (3) lượng mưa; và (4) mật độ sông suối. Độ dốc và lượng mưa được xét với trọng số như nhau (khoảng 34%), trong khi đó, cao độ địa hình là gần 20% và mật độ sông suối chiếm gần 12%.



Hình 1 - 7. Bản đồ tính nhạy cảm lũ quét tỉnh Quảng Đông – Trung Quốc [50]

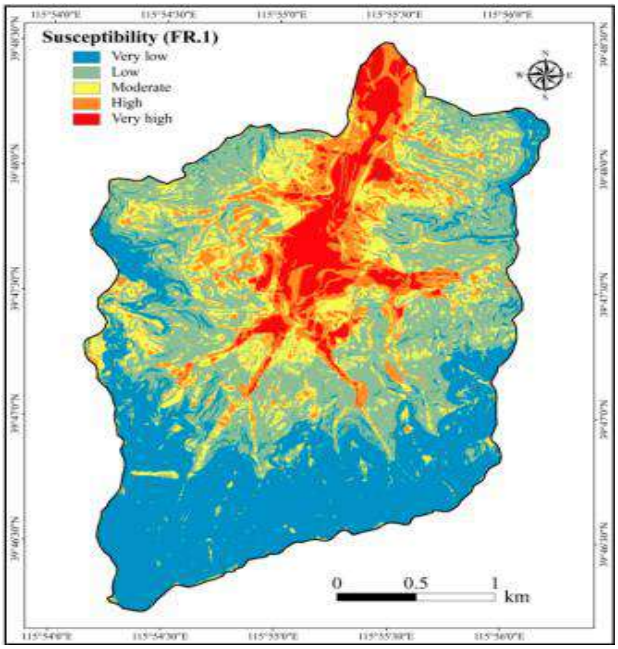
Một biến thể khác của AHP là FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) [82, 83] khi không phân loại các yếu tố thành 9 ngưỡng (từ 1 đến 9) như phương pháp gốc mà thay vì đó là quy đổi về phạm vi từ 0 đến 1. Các tác giả cho rằng FAHP có lợi thế hơn vì nó có thể đáp ứng được sự không chắc chắn trong dữ liệu và phân tích và phù hợp để xác định khu vực dễ bị lũ lụt ở các thành phố, đặc biệt là do sự trùng khớp với các khu vực bị tàn phá nhiều nhất được xác định bằng cách phát hiện sự thay đổi giữa hai hình ảnh Sentinel-2.

Nguyễn Trọng Yêm và nnk, 2006 [84] đã nghiên cứu và xây dựng bản đồ phân vùng tính nhạy cảm lũ quét - lũ bùn đá cho 3 huyện Sa Pa, Bát Xát và TP. Lào Cai, tỉnh Lào Cai, nơi lũ quét xảy ra tương đối thường xuyên và khốc liệt. Đối tượng không gian áp dụng là từng đoạn sông suối. Từ thông tin lũ quét thực địa trong vòng 10 năm (từ năm 1996 đến 2005), thực hiện thống kê, phân tích để đánh giá tần suất và xác định nguyên nhân, nhân tố gây ra lũ quét gồm: lượng mưa, độ dốc lòng sông - suối và sườn, hệ số lũ quét - lũ bùn đá (giữa độ dài dòng lũ quét - lũ bùn đá trên tổng chiều dài dòng trong lưu vực) và nguy cơ trượt lở. Bản đồ tính nhạy cảm lũ quét được chập theo trọng số các bản đồ trượt lở đất đá, độ dốc lòng sông suối và hệ số lũ quét - lũ bùn đá. Khác biệt lớn so với các nghiên cứu khác là nhân tố hệ số lũ quét - lũ bùn đá và nguy cơ trượt lở. Phương pháp AHP được áp dụng để định trọng số nhân tố.

Nguyễn Ngọc Thạch và nnk, 2011 [85] trong khuôn khổ đề án hợp tác với Ấn Độ đã nghiên cứu, xây dựng bản đồ tính nhạy cảm lũ quét tỉnh Vĩnh Phúc, tỉnh Bắc Kạn và huyện Pắc Nậm, Bắc Kạn. Nhân tố gây lũ quét được xác định gồm: độ dốc trung bình phụ lưu (chi phối tốc độ của dòng chảy), lớp phủ rừng (các kiểu rừng chính tồn tại trong lưu vực có vai trò điều hòa dòng chảy mặt làm giảm lũ quét) và mưa cực đại năm (chi phối khả năng phát sinh lũ quét). Áp dụng phương pháp AHP để xác định trọng số nhân tố ban đầu. Lũ quét quá khứ được sử dụng để hiệu chỉnh trọng số nhân tố và kiểm chứng kết quả. Đối tượng không gian là ô lưới cho vùng nghiên cứu cấp tỉnh và đoạn sông suối cho cấp huyện. Điểm mới của nghiên cứu là đưa thêm nhân tố dòng chảy tích lũy (khả năng tiếp nhận nước từ lưu vực thượng nguồn). Tuy sử dụng mưa cực đại năm để xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét nhưng nghiên cứu cũng chỉ ra rằng mưa trận cường độ lớn có liên quan trực tiếp tới trượt lở và lũ quét.

2. Phương pháp tỷ lệ tần suất

Phương pháp tỷ lệ tần suất - Frequency Ratio (FR) là một trong những phương pháp phổ biến đo lường tần suất xuất hiện của lũ quét trong một khu vực nhất định. Các khu vực có chỉ số FR cao hơn thể hiện tính nhạy cảm với lũ quét cao hơn. Chỉ số FR là thương của tỷ lệ xuất hiện trên tỷ lệ diện tích. Tương tự như AHP, phương pháp này sử dụng các yếu tố đa dạng về địa không gian. Chen Cao và cộng sự (2016) [86] đã sử dụng phương pháp FR để xây dựng bản đồ tính nhạy cảm với lũ quét cho khu vực Xiqu Gully (thuộc Bắc Kinh – Trung Quốc) - Hình 1 - 8.

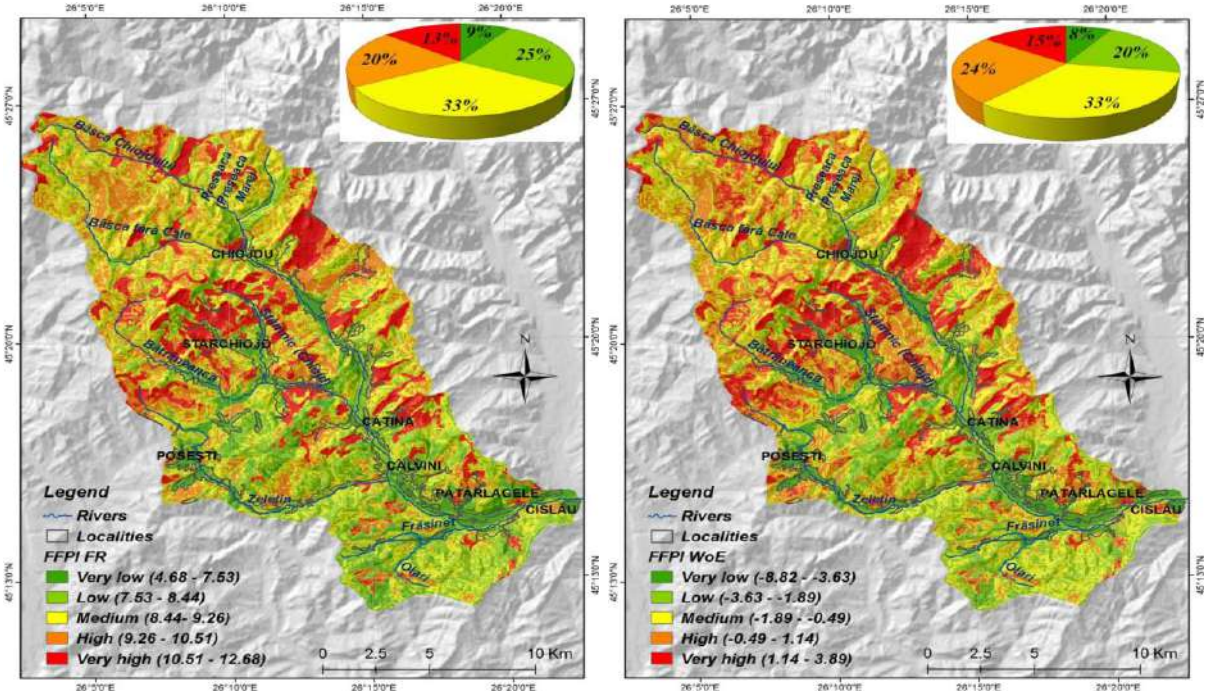


Hình 1 - 8. Bản đồ tính nhạy cảm lũ quét khu vực Xiqu Gully [86]

Các yếu tố được xem xét dựa trên 85 điểm đã xảy ra lũ quét [86] và 10 yếu tố bao gồm: độ cao; độ dốc; độ cong; sử dụng đất; địa chất; kết cấu đất; khu vực có nguy cơ sụt lún; chỉ số năng lượng dòng chảy; chỉ số ẩm địa hình và mưa lớn ngắn hạn. Kết quả xây dựng bản đồ cho thấy các vị trí có tính nhạy cảm rất cao về lũ quét nằm ở khu vực trũng thấp của địa hình.

Ở Romania, Romulus Costache đã xây dựng bản đồ tiềm năng lũ quét bằng phương

pháp FR kết hợp với phương pháp trọng số dẫn chứng (WOE) với 9 yếu tố cho lưu vực sông Bâsca Chiojdului có diện tích khoảng 340km² [87]. Kết quả thể hiện như Hình 1 - 9.

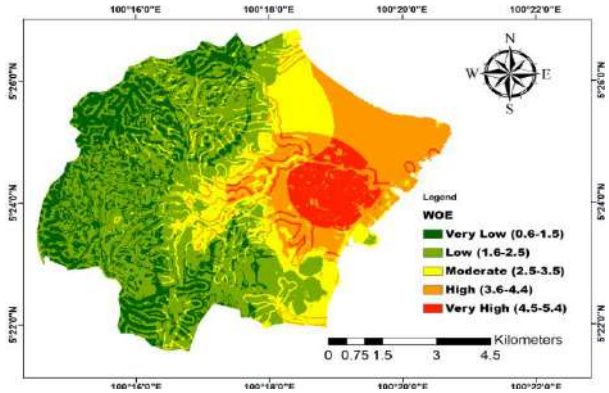


Hình 1 - 9. Kết quả xây dựng bản đồ tiềm năng lũ quét lưu vực Bâsca Chiojdului bằng phương pháp FR (bên trái) và WOE (bên phải) [87].

3. Phương pháp trọng số dẫn chứng

Phương pháp trọng số dẫn chứng - Weights Of Evidence (WOE) được sử dụng để đo lường mức độ liên quan của một biến độc lập với một biến phụ thuộc.

WOE được tính bằng cách sử dụng hàm logistic để chuyển đổi các giá trị của biến độc lập thành các giá trị số. WOE = ln(p/(1 - p)), trong đó p là xác suất biến phụ thuộc có giá trị là 1 và (1-p) là xác suất biến phụ thuộc có giá trị là 0. Để tính toán WOE, cần chia dữ liệu thành 2 nhóm:



Hình 1 - 10. Bản đồ nhạy cảm lũ quét lưu vực Sungai Pinang [88]

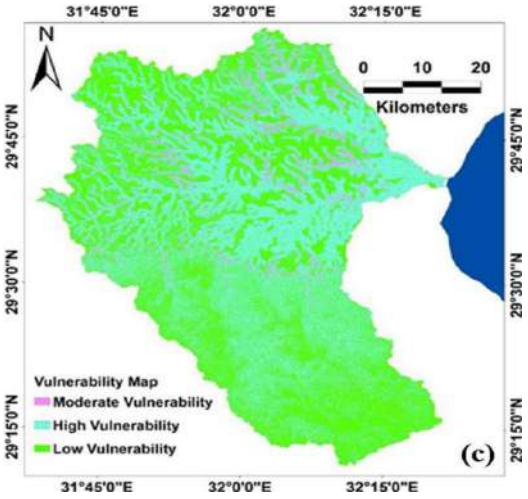
Một nhóm có biến phụ thuộc có giá trị là 1 và một nhóm có biến phụ thuộc có giá trị là 0, sau đó, tính xác suất của biến phụ thuộc có giá trị là 1 cho từng nhóm. Cuối cùng, sử dụng công thức trên để tính WOE cho từng giá trị của biến độc lập. Saleh và

cộng sự (2022) đã sử dụng phương pháp WOE để xây dựng bản đồ nhạy cảm với lũ quét cho lưu vực Sungai Pinang ở Malaysia dựa trên 6 yếu tố bao gồm: độ cao, độ dốc, lượng mưa, độ che phủ đất, khoảng cách từ sông và thạch học [88]. Kết quả xây dựng bản đồ cho độ tin cậy lên tới 0,839 (Hình 1 - 10).

4. Mô hình học máy

Học máy trong nghiên cứu lũ quét đã ngày càng trở nên phổ biến, học máy sử dụng các thuật toán để học hỏi từ dữ liệu lịch sử và sử dụng chúng dự đoán cho tương lai, các dữ liệu học thường bao gồm dữ liệu về địa không gian và khí tượng thủy văn. Tương tự như các phương pháp đã nêu ở trên, mô hình học máy sử dụng đầu vào đa dạng và làm giảm khả năng tính toán bằng các thuật toán hồi quy/phân loại sẵn có. Mặc dù vậy, công tác chuẩn bị dữ liệu đối với các mô hình học máy rất quan trọng, quyết định kết quả phán đoán của mô hình.

Abu El-Magd và cộng sự (2022) gần đây đã sử dụng thuật toán Bayesian dựa trên việc kết hợp các chỉ số thủy văn để đánh giá tính nhạy cảm lũ quét cho khu vực Wadi Ghoweiba và phụ cận (Ai Cập) [89] được thể hiện trong Hình 1 - 11. Các yếu tố được xét đến bao gồm chỉ số vận chuyển (STI), chỉ số năng lượng dòng chảy (SPI), chỉ số thạch học, độ ẩm địa hình (TWI), độ dốc, mật độ dòng chảy (SD), độ cong và hướng dốc. Mô hình học máy lai được phát triển bằng cách kết hợp phương pháp tiếp cận Bayes và các chỉ số thủy văn có độ tin cậy lên tới 87,7%.



Hình 1 - 11. Bản đồ nhạy cảm lũ quét khu vực Wadi Ghoweiba [89]

Zheng Guan và cộng sự (2022) đã sử dụng 4 mô hình học máy bao gồm AdaBoost, tăng cường Gradient (GBDT), tăng cường Gradient cực đại (XGBoost) và rừng ngẫu nhiên (RF) để đánh giá mức độ nhạy cảm với lũ quét ở tỉnh Giang Tây, Trung Quốc [90]. Kết quả đánh giá cho thấy lượng mưa và khoảng cách tới sông suối có tác động lớn nhất đến quá trình hình thành lũ quét.

Rana và cộng sự (2022) đã kết hợp mô hình thống kê hai biến với mô hình thống kê đa biến để xây dựng bản đồ nhạy cảm với lũ quét cho bang Uttarakhand của Ấn Độ [91]. Với 122 điểm lũ quét đã được xác định, các yếu tố được xem xét bao gồm hướng dốc, độ cong ngang địa hình, độ cao, chỉ số NDVI, độ dốc, chỉ số năng lượng dòng chảy (SPI), chỉ số độ ẩm địa hình (TWI), lượng mưa hàng năm, khoảng cách đến sông suối,

khoảng cách đến đường giao thông, thảm phủ, chỉ số vận chuyển trầm tích (STI). Mô hình thống kê hai biến được sử dụng là WOE, mô hình thống kê đa biến trong học máy bao gồm ANN, SVM và KNN. Kết quả cho thấy sự kết hợp của WOE-ANN cho kết quả tốt hơn các mô hình còn lại.

1.4.2. Đánh giá nguy cơ lũ quét dựa trên lượng mưa

Mưa lớn là một trong những nguyên nhân chính trong quá trình hình thành lũ quét tự nhiên, do vậy, yếu tố lượng mưa được xét đến trong các nghiên cứu về lũ nói chung và lũ quét nói riêng là một hướng đi đúng đắn. Mặc dù vậy, dự báo được lượng mưa một cách chính xác không phải là một vấn đề dễ dàng trong các nghiên cứu.

Borga và cộng sự (2014) đã có một rà soát các nghiên cứu ở châu Âu nói riêng và công bố quốc tế nói chung đến năm 2014 về hệ thống cảnh báo lũ quét và lũ bùn đá về các khía cạnh: kỹ thuật sử dụng, khoảng trống nghiên cứu và đề xuất các hướng nghiên cứu tiếp theo [8]. Trong đó, đề xuất tiếp theo bao gồm: xây dựng hệ thống giám sát và dự báo và xác định ngưỡng mưa cho lũ quét. Ghomash và cộng sự (2022) đã nghiên cứu tác động của diễn biến lượng mưa đến quá trình hình thành lũ quét cho các khu vực miền núi bán khô cằn ở lưu vực Kan (Iran) [92]. Các hình thái mưa khác nhau cho ra kết quả khác nhau về đỉnh lũ, đường quá trình lũ và các yếu tố thủy văn.

Alfieri và cộng sự (2015) đã trình bày hướng dẫn dự báo lũ quét dựa trên ngưỡng về lượng mưa trong cuốn sổ tay dự báo khí tượng thủy văn vào năm 2015 [93]. Alfieri cho biết, chỉ sử dụng dữ liệu mưa có thể ước tính được nguy cơ do lũ lụt gây ra. Một trong những phương pháp phổ biến là xác định ngưỡng dòng chảy tràn (FFG) trong hệ thống chỉ dẫn lũ quét (FFGS) đang được sử dụng rộng rãi trên toàn thế giới.

Một nghiên cứu khác của Alfieri năm 2011 đã đề xuất hệ thống cảnh báo sớm lũ quét dựa trên các sản phẩm dự báo khí tượng như dự báo thời tiết số trị (NWP), kết hợp NWP-Radar và truyền sóng radar cho các khu vực miền núi ở Catalonia (thuộc Tây Ban Nha) [94]. Nhược điểm của phương pháp này là bỏ qua các điều kiện ban đầu của bề mặt và hiệu chỉnh của lượng mưa, do đó, Alfieri cũng đã đề xuất chỉ số ERI (Extreme Runoff Index) [95] nhằm cải tiến khi xét đến dòng chảy mặt (runoff flow).

Phương pháp phổ biến nhất là xây dựng ngưỡng mưa dựa trên quan hệ cường độ - thời gian (I-D) được Caine đề xuất năm 1980 [96] với công thức $I = \alpha D^{\beta}$ (công thức kinh nghiệm). Trong đó, α và ß là các hệ số và D là thời gian mưa (theo giờ), I là cường độ mưa. Trên cơ sở thu thập các trận mưa trong quá khứ, Caine đã tìm ra được ngưỡng mưa $I = 14{,}82D^{-0{,}39}$ (với thời đoạn mưa nhỏ hơn 500 giờ) là ngưỡng mưa có khả năng gây ra lũ bùn đá và sạt lở đất.

Năm 2007, tiếp tục nghiên cứu dựa theo Caine, Guzzetti và cộng sự [97] đã tìm ra được ngưỡng mưa $I = 2{,}28D^{-0{,}2}$ cho các trận mưa có thời đoạn dưới 48 giờ và $I = 0{,}48D^{-}$

^{0,11} cho các trận mưa từ 48 giờ đến dưới 1000 giờ. Nghiên cứu này sử dụng cơ sở dữ liệu toàn cầu từ 2.626 trận mưa và 19.800 trạm quan trắc mưa trên toàn thế giới. Con số này thấp hơn khá đáng kể so với nghiên cứu của Caine và làm tăng ngưỡng an toàn về mưa.

Bezak và cộng sự (2016) đã xây dựng đặc điểm các đợt mưa cực lớn gây ra sạt lở đất và lũ quét ở Slovenia trong 25 năm [98]. Kết quả phân tích ở các trạm cho thấy công thức của Caine phù hợp nhất trong việc xây dựng ngưỡng mưa cảnh báo.

Turkington và cộng sự (2014) đã đưa ra ngưỡng cảnh báo về lượng mưa cho lũ bùn đá và lũ quét ở khu vực miền núi phía Nam nước Pháp (thung lũng Ubaye) là lượng mưa lớn hơn 20mm/ngày hoặc 22mm/4 ngày [99]. Mặc dù trong nghiên cứu có nhiều ngưỡng phân loại khác nhau độc lập (cho các yếu tố khí tượng khác), đây là một ngưỡng mưa quá an toàn để đưa ra cảnh báo và có khả năng cảnh báo khống cao trong khi đáp ứng đầy đủ về tiêu chí phân loại cho các trận mưa sinh lũ ở khu vực nghiên cứu.

Ramos Filho và cộng sự (2020) đã trình bày một phương pháp cải tiến trong việc sử dụng ngưỡng cường độ mưa cực đại để đánh giá và cảnh báo lũ quét ở bang Sao Paulo (Brazil) [100] bằng mô hàm số mũ có mối quan hệ với cường độ mưa và chỉ số lượng mưa kỳ trước (API) bằng công thức $I = ae^{b\,API} + c$. Trong đó: a, b, c là các hằng số cần xác định. Nghiên cứu cũng chỉ ra giá trị của a nằm trong khoảng từ cường độ mưa tối thiểu đến ba lần cường độ mưa tối đa (của các trận lũ quét đã xảy ra), giá trị b thay đổi trong khoảng từ -1.00÷ -0.01 và giá trị c nằm trong khoảng từ cường độ mưa tối thiểu đến cường độ mưa trung bình (của các trận lũ quét đã xảy ra). Kết quả nghiên cứu cho thấy xác suất phát hiện các trận lũ quét trên ngưỡng trên tăng trung bình 14%.

Zhai và cộng sự (2018) đã nghiên cứu ngưỡng mưa sinh lũ quét tại ba khu vực miền núi ở miền Nam Trung Quốc (Zhong, Balisi và Yu) dựa trên mô hình thủy văn lũ quét Trung Quốc [101]. Quá trình xác định bao gồm mực nước và lưu lượng sinh lũ quét tại các khu vực, từ đó tính ngược lượng mưa sinh lũ quét. Kết quả nghiên cứu chỉ ra: (1) tại Zhong, lưu lượng sinh lũ quét là 356,2m³/s và ngưỡng mưa dao động từ 93÷344mm/trận; (2) tại Balisi, lưu lượng sinh lũ quét là 544,69m³/s và ngưỡng mưa dao động từ 77÷246mm/trận; (3) tại Yu, lưu lượng sinh lũ quét là 335,2m³/s và ngưỡng mưa dao động từ 111÷420mm/trận.

Yuan và cộng sự (2021) cho ra kết quả về ngưỡng mưa tương ứng với điều kiện độ ẩm kỳ trước (ASMC) và sự phân bố mưa [102]. Lượng mưa được tính toán cho các độ ẩm kỳ trước là 0.2 (khô); 0.5 (trung bình); 0.8 (ướt) và ngưỡng mưa tương ứng từ 95÷140mm; 79÷125mm; và 73÷117mm/6 giờ cho lưu vực Xinxian, huyện Tín Dương, tỉnh Hà Nam, Trung Quốc.

Ở Việt Nam, một số nghiên cứu về đánh giá nguy cơ lũ quét dựa trên lượng mưa cũng được tiến hành. Hà Thanh Giang, 2005 [103] giới thiệu hệ thống đo mưa và cảnh

báo lũ quét. Ngưỡng mưa sinh lũ quét được xác định cho lưu vực và chia ra thành 3 cấp báo động. Thiết bị đo mưa và báo động được lắp đặt tại các địa phương thường xuyên xảy ra lũ quét. Mưa được đo liên tục và báo về trạm thu. So sánh lượng mưa đo được với từng cấp ngưỡng mưa cảnh báo lũ quét, thiết bị phát tín hiệu báo động. Phương pháp này không xét đến yếu tố quan trọng là mức độ bão hòa của bề mặt như một số nước khác và cũng phụ thuộc vào vị trí và mật độ đặt thiết bị đo trong lưu vực vì tại các vùng núi mưa lớn mang tính cục bộ rất cao. Không thấy có đánh giá, so sánh kết quả của hệ thống với thực tế. Nghiên cứu này giống với phương pháp FFG nhưng không thấy tác giả trình bày cách tính FFG.

Hoàng Anh Huy và nnk (2018) [67] đã xây dựng ngưỡng mưa cảnh báo lũ quét FFG và đường tới hạn CL cho lưu vực sông Cả. Kết quả tính toán lưu lượng tràn bờ cho 504 tiểu lưu vực thuộc lưu vực sông Cả và các biểu đồ ngưỡng mưa sinh lũ quét theo CL tại 10 trạm quan trắc. Các kết quả này là giá trị ngưỡng mưa nội tại đặc trưng riêng cho từng khu vực tính toán. Trong đó, tác giả cũng chưa đưa ra nhận định đánh giá về việc lượng mưa vượt quá tại một trạm có khả năng sinh lũ quét tại khu vực nào.

Đỗ Hoài Nam (2017) [104] cho rằng lũ quét thường gây ra bởi hai nguyên nhân chính là đặc điểm địa hình, địa mạo và cường độ mưa thời đoạn ngắn. Trong nghiên cứu sử dụng chỉ số lượng mưa tích lũy thời đoạn ngắn (EPIC) với thời đoạn 24 giờ để nhận diện rủi ro lũ quét cho lưu vực sông Cả. Toàn bộ kết quả tính toán cho 5785 điểm nút (tiểu lưu vực) dựa trên ngôn ngữ Fortran và rủi ro lũ quét được chia thành 5 cấp độ đều nhau dựa trên giá trị đã được chuẩn hóa. Kết quả cho thấy huyện Kỳ Sơn là một trong những huyện có rủi ro lũ quét cao nhất trên lưu vực sông Cả.

1.4.3. Đánh giá nguy cơ lũ quét dựa vào các yếu tố thủy văn

Saber và cộng sự (2018) đã sử dụng lượng mưa vệ tinh GSMAP để lập mô hình dự báo lũ quét cho lưu vực sông Karpuz (Thổ Nhĩ Kỳ) [105], mô hình thủy văn Hydro-BEAM được sử dụng để xác định dòng chảy dựa trên dữ liệu GSMaP đã được hiệu chỉnh. Mặc dù đã có sự hiệu chỉnh độ lệch nhưng không có sự đảm bảo rằng dữ liệu mưa vệ tinh có đủ tin cậy để dự báo dòng chảy lũ. Thậm chí, Westerberg và cộng sự (2011) [106] trong một nghiên cứu khác đã chỉ ra rằng việc hiệu chỉnh lại lượng mưa vệ tinh không phải lúc nào cũng là một phương pháp đáng tin cậy vì các lỗi vệ tinh có thể dẫn đến những suy luận sai lệch trong quá trình hiệu chỉnh mô hình thủy văn cho các trận lũ tiếp theo.

Silvestro và cộng sự (2015) đã sử dụng mô hình thủy văn bán phân bố DriFt kết hợp với lượng mưa thực đo và lượng mưa dự báo trước 2 giờ để dự báo nguy cơ lũ quét cho lưu vực sông Entella ở phía đông vùng Liguria, Ý [107]. Số liệu mưa dự báo được lấy từ các nguồn ECMWF; COSMO-LAMI; BOLAM; MOLOCH. Kết quả tính toán

cho thấy, sai lệch % đỉnh lũ dao động từ -15÷43% với khoảng thời gian dự báo trước từ 1:40p ÷ 4:40p cho 7 trận lũ quét đã xảy ra trong quá khứ. Nghiên cứu không đánh giá khả năng ứng dụng trong tương lai và có đưa ra một số khuyến nghị khi áp dụng mô hình.

Ở Việt Nam, về cơ bản, phương pháp này được áp dụng giống với thế giới; phổ biến trong nghiên cứu thủy văn và lũ lụt nói chung nhưng còn ít trong nghiên cứu lũ quét, đặc biệt là chủ yếu sử dụng để mô phỏng lại các trận lũ quét đã xảy ra.

Lã Thanh Hà, 2007 [108] đã áp dụng phương pháp thực địa, mô hình thủy văn - thủy lực và GIS để mô phỏng lại trận lũ quét "lịch sử" gây thiệt hại lớn về người và tài sản xảy ra khoảng nửa đêm 27/9/2005 tại lưu vực suối Phà, xã Cát Thịnh Cát huyện Văn Chấn, tỉnh Yên Bái. Đây là trận lũ quét sườn dốc do mưa lớn dồn dập từ ảnh hưởng của cơn bão số 6 đổ bộ vào Bắc Bộ (lượng mưa 3 ngày tại trạm KT Văn Chấn là 174,2mm) đã làm bão hòa bề mặt và tiếp theo cơn bão số 7 đổ bộ vào Hải Phòng - Quảng Ninh với lượng mưa trong ngày 27/9 lên tới 176,9mm đã gây ra lũ quét. Vùng nghiên cứu là lưu vực có tích lưu vực là 54,5km², có chiều dài dòng chính là 26,2km, ở độ cao 1.062m. Nghiên cứu áp dụng mô hình giống như đối với các bài toán lũ lụt thông thường khác, tích hợp phần mềm thủy văn HEC-HMS với phần mềm thủy lực HEC-RAS. Mô hình được tích hợp trên nền của phần mềm ArcView GIS. Trong đó các tham số đầu vào thủy văn và bản đồ ngập lụt được xây dựng bằng GIS thông qua phần mềm HEC. Nhóm nghiên cứu đã sử dụng bản đồ địa hình chi tiết và thực hiện đo đạc chi tiết số liệu mặt cắt sông của hơn 40 điểm trong vùng nghiên cứu. Như các mô hình thủy lực khác, kết quả mô phỏng được ranh giới và độ sâu ngập lụt chi tiết. Theo tác giả, kết quả mô phỏng lưu lượng và ngập lụt của mô hình tương đối khớp với dữ liệu lưu lượng đo đạc tại "đập tràn" và vết lũ đo đạc và cho rằng đây là công cụ tốt để mô phỏng cho những trận lũ quét khác và ở các lưu vực khác.

Nguyễn Thế Toàn (2023) nghiên cứu phương pháp cảnh báo lũ quét cho lưu vực nhỏ miền núi, áp dụng thử nghiệm cho hai lưu vực Nậm Ly và Nà Nhùng (Hà Giang): lưu lượng tràn bờ được xác định từ khảo sát dấu hiệu tràn bờ tại các mặt cắt và công thức Manning, hồi quy theo đặc trưng lưu vực, rồi dùng làm ngưỡng để tính ngưỡng mưa sinh lũ quét FFG trong mô hình dòng chảy với mưa dự báo của mô hình GEM; hệ thống phát cảnh báo trước 3 giờ so với thời điểm lũ quét gây tràn bờ [109]. Cùng hướng này, Trần Kim Châu và cộng sự (2021) xây dựng phương trình hồi quy lưu lượng tràn bờ theo diện tích lưu vực và chiều dài sông chính từ số liệu khảo sát ba lưu vực ở Hà Giang [110] và hệ thống cảnh báo lũ quét thời gian thực dựa trên ngưỡng lưu lượng tràn bờ, với chín trạm đo mưa tự động [111]. Các nghiên cứu này dùng lưu lượng tràn bờ làm ngưỡng nhận biết lũ quét. Luận án kế thừa quan hệ lưu lượng tràn bờ của Nguyễn

Thế Toàn để xác định hình thái lòng dẫn cho lưu vực sông Nghĩa Đô, còn ngưỡng phân cấp nguy cơ được xây dựng trên công suất đơn vị và vận tốc dòng chảy.

1.4.4. Đánh giá nguy cơ lũ quét dựa vào các yếu tố thủy lực

Nhóm phương pháp dựa trên đặc trưng thủy lực (mực nước, vận tốc…) hiện đã được vận dụng để ước tính nguy cơ lũ quét, song bản chất vẫn là bài toán thủy lực một chiều trên sông. Với một hiện tượng diễn biến đột ngột, lên – xuống nhanh như lũ quét, việc xem các mô hình này là mô phỏng đúng cơ chế lũ quét là chưa thật phù hợp, tuy nhiên, hầu hết các mô hình này sử dụng chỉ với mục đích xác định dòng chảy lũ trên sông suối, khi đạt ngưỡng về mực nước, vận tốc…sẽ được xem xét cảnh báo nguy cơ lũ nói chung và lũ quét nói riêng.

Cách tiếp cận theo yếu tố thủy lực phát cảnh báo khi đặc trưng dòng chảy mô phỏng vượt một ngưỡng định trước. Cụ thể, từ chuỗi mưa, mô hình thủy văn – thủy lực cho ra mực nước và vận tốc tại mặt cắt, rồi các trị số này được đối chiếu với ngưỡng tương ứng. Ngưỡng so sánh thường lấy theo một trong hai hướng: mực nước đỉnh của một trận lũ quét đã ghi nhận trong quá khứ, hoặc trị số ứng với một tần suất xác định khi đã có chuỗi quan trắc mực nước đủ dài [112].

Trong FFGS, lưu lượng tràn bờ được xác định bằng tính toán thủy lực trên mặt cắt, từ đó hình thành ngưỡng dòng chảy tràn (FFG) tại các cửa ra của lưu vực. Một số nghiên cứu khác lại ước lượng ngưỡng tràn bờ bằng công thức kinh nghiệm [113].

Một hướng khác phân cấp lũ theo đặc trưng thủy lực của chính dòng lũ. Church và Jakob (2020) [114] chia lũ bùn đá thành ba loại theo cơ chế hình thành: do ứng suất tiếp của dòng chảy vượt ngưỡng, do chuyển tiếp từ dòng bùn đá và do vỡ đập tự nhiên hoặc nhân tạo; lũ bùn đá được chia tiếp theo tỷ số giữa ứng suất tiếp thực tế và ứng suất tiếp tới hạn, tỷ số càng cao thì lũ càng gây hại, đến mức thảm họa, nhằm áp dụng cho đánh giá nguy cơ và rủi ro ở các suối dốc. Cách phân cấp của luận án cùng hướng với Church và Jakob (2020), tức phân cấp theo cường độ thủy lực của dòng chảy, nhưng dùng công suất đơn vị dòng chảy và vận tốc dòng chảy thay cho ứng suất tiếp.

1.5. Tổng quan các chỉ số xác định nguy cơ lũ quét

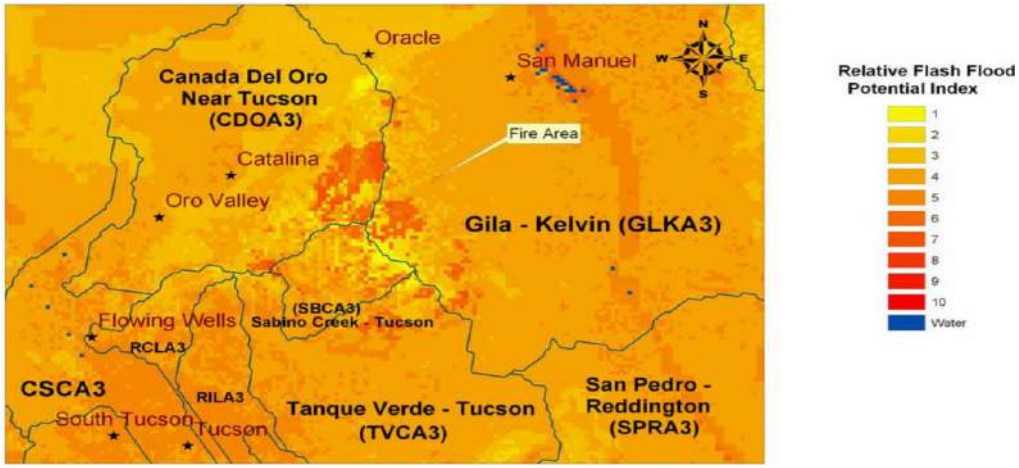
1.5.1. Chỉ số FFPI

Flash Flood Potential Index (FFPI) là chỉ số lũ quét tiềm tàng được đề xuất hoàn chỉnh bởi Gregory E. Smith trong luận văn thạc sỹ năm 2010 [115] sau một thời gian nghiên cứu về chỉ số này. Theo đó, chỉ số này được tính toán bằng tổ hợp các chỉ số theo công thức sau:

$$\mathrm{FFPI} = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \mathrm{FFPI}_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \qquad (1\text{-}2)$$

Trong đó, FFPIi là chỉ số nguy cơ lũ quét của yếu tố thành phần thứ i và w_i là trọng số gán cho yếu tố đó.

Theo đó, FFPI được tổng hợp từ bốn yếu tố: loại đất, hiện trạng sử dụng đất, độ dốc và mật độ che phủ rừng. Trên nền GIS, mỗi yếu tố được chia thành 10 cấp và gán điểm 1–10 theo mức độ thuận lợi cho hình thành lũ quét; yếu tố càng bất lợi thì điểm càng cao (ví dụ độ dốc lớn ứng với điểm cao).



Hình 1 - 12. Một tính toán FFPI cụ thể cho một khu vực theo Gregory Smith (2010) [115]

Trọng số w của từng yếu tố không cố định mà được hiệu chỉnh theo từng khu vực nghiên cứu. Trong các công bố trước, Gregory Smith gán trọng số bằng 1 cho mọi yếu tố và riêng độ dốc lấy 1,5 [116, 117]. Đây là một phương pháp xác định được cho là đơn giản, và có tính ứng dụng rất cao.

Ở Việt Nam, có nhiều tác giả đã triển khai áp dụng chỉ số này trong việc xác định nguy cơ lũ quét [118, 119]. Trong hầu hết các nghiên cứu, bản đồ được xây dựng dựa trên nhiều yếu tố thành phần với trọng số là 1, riêng độ dốc là lấy trọng số 1,5.



Hình 1 - 13. Ứng dụng chỉ số FFPI xây dựng bản đồ lũ quét tiềm tàng tỉnh Sơn La [118]

Một hướng cải tiến đáng chú ý của chỉ số FFPI ở Việt Nam là chỉ số lũ quét tiềm tàng theo lưu vực ô lưới (Gridded Basin Flash Flood Potential Index – GBFFPI) do Lê

Xuân Cầu đề xuất và áp dụng xây dựng bản đồ cho các tỉnh Quảng Nam, Quảng Ngãi, Đà Nẵng và Thừa Thiên Huế [120]. Nghiên cứu chỉ ra hạn chế của FFPI truyền thống là chỉ xét các đặc trưng nội tại của từng ô lưới mà bỏ qua tương tác giữa ô lưới với lưu vực thượng nguồn, nên thường gán nguy cơ cao cho cả những vị trí sườn dốc, gần đỉnh núi – nơi lũ quét hầu như không xảy ra – trong khi lũ quét thực tế tập trung ở dải đất thấp ven chân núi. Để khắc phục, GBFFPI xem mỗi ô lưới là cửa ra của một lưu vực tụ nước phía thượng nguồn và lấy giá trị tại ô lưới bằng giá trị bình quân của FFPI trên toàn lưu vực tụ nước đó; phương pháp được phát triển thành công cụ trên nền ArcObjects SDK for .NET, với phiên bản tĩnh phục vụ quy hoạch và phiên bản động có xét lượng mưa (thông qua chỉ số mưa tới hạn sử dụng lượng mưa hiệu dụng với chu kỳ bán rã 1,5 giờ và 72 giờ) phục vụ cảnh báo theo thời gian thực. Như vậy, nghiên cứu đã có một bước tiến quan trọng khi đưa được phản ứng của lưu vực thượng nguồn vào chỉ số nguy cơ thay vì chỉ dựa trên đặc trưng tại chỗ. Tuy nhiên, GBFFPI không sử dụng mô hình thủy văn: giá trị tại mỗi ô lưới vẫn được tạo ra bằng cách phân lớp và bình quân hóa các chỉ số tiềm năng không thứ nguyên của các yếu tố địa hình – mặt đệm (kết hợp một chỉ số mưa), mà chưa thực hiện quá trình mô phỏng mưa – dòng chảy và chưa tính toán các tham số thủy văn – thủy lực thực của dòng chảy lũ như lưu lượng, vận tốc hay độ sâu mực nước. Do đó, mức độ nguy cơ mà phương pháp đưa ra mang tính tương đối, phản ánh khả năng (tính nhạy cảm) xảy ra lũ quét nhiều hơn là cường độ vật lý thực của dòng chảy.

1.5.2. Chỉ số DFFHI

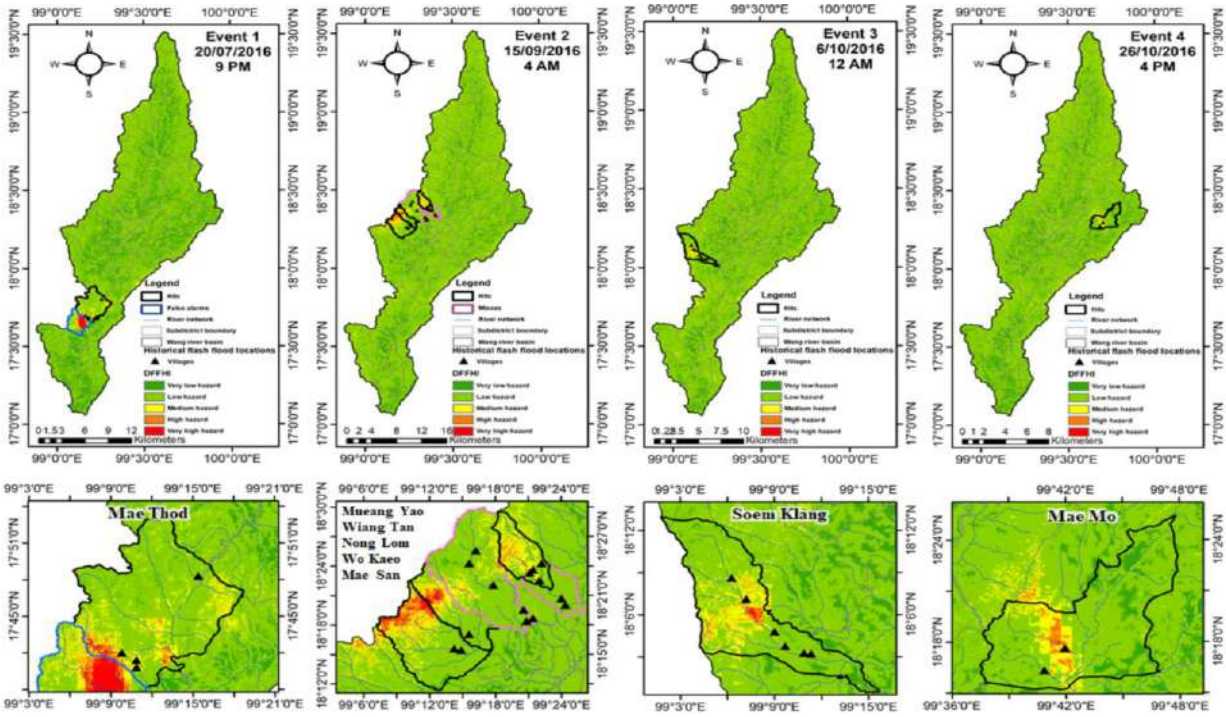
Dynamic Flash Flood Hazard Index (DFFHI) là chỉ số nguy cơ lũ quét động được đề xuất năm 2020 theo Sathit Chantip và cộng sự [121] và áp dụng cho lưu vực sông Wang ở Thái Lan. Phương pháp này nhằm tính toán chỉ số DFFHI dựa trên chỉ số FFPI, chỉ số mưa Rainfall Index (RI) và chỉ số độ ẩm của đất Soil Water Index (SWI).

$$DFFHI = (0.50 \times FFPI) + (0.45 \times RI) + (0.05 \times SWI) \qquad (1\text{-}3)$$

Ở đây FFPI cũng được tính trên GIS theo cách tương tự phần trên, nhưng dùng 8 yếu tố với bộ trọng số: sử dụng đất 0,15; nhóm đất 0,15; chỉ số thực vật 0,1; độ dốc 0,25; độ cong hướng dòng 0,05; độ cong địa hình 0,05; tích lũy dòng chảy 0,1 và khoảng cách tới sông suối 0,15. Chỉ số mưa RI được xác định theo công thức:

$$RI = \left[\left(R_{-3day} \times 0.2\right) + \left(R_{-2day} \times 0.3\right) + \left(R_{-1day} \times 0.5\right)\right] \times I \qquad (1\text{-}4)$$

Trong đó, R_{-3day}, R_{-2day}, R_{-1day} lần lượt là lượng mưa của ngày thứ ba, thứ hai và ngày liền trước (mm); I là cường độ mưa giờ ở thời điểm đang xét.



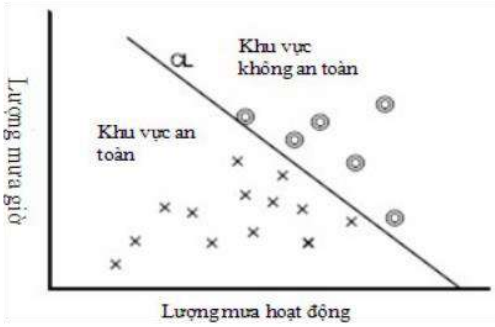
Hình 1 - 14. Chỉ số DFFHI cho lưu vực sông Wang ở Thái Lan [121]

Chỉ số độ ẩm đất SWI được trích hằng ngày từ sản phẩm vệ tinh Copernicus Global Land Service ở độ phân giải 0,1°. Kết quả tính DFFHI cho lưu vực sông Wang (Thái Lan) được minh họa trong Hình 1 - 14.

1.5.3. Đường tới hạn CL

Phương pháp đường tới hạn (CL) hình thành từ các nghiên cứu về sự xuất hiện lũ quét tại Nhật Bản và một số nước nhiệt đới Đông Nam Á, các nhà nghiên cứu Nhật Bản cho rằng sự xuất hiện lũ quét căn cứ vào quan hệ giữa tổng lượng mưa tích lũy theo thời đoạn và cường độ mưa cực đại trong thời đoạn đó, ứng với một điều kiện mặt đệm xác định. Nói cách khác, khả năng một trận mưa sinh lũ quét được nhận diện dựa trên chuỗi quan trắc mưa và việc lũ quét có xuất hiện hay không tại từng trạm đo. [122].

Cách tiếp cận này cảnh báo lũ quét thông qua các chỉ số mưa – cường độ và tổng lượng – được rút ra từ dữ liệu mưa quan trắc của những trận lũ quét và sạt lở đất đã ghi nhận trong khu vực nghiên cứu. Do quan niệm trên, ngưỡng mưa sinh lũ quét được coi là một ngưỡng động, thay đổi theo tương quan giữa lượng mưa tích lũy kể từ đầu trận và cường độ mưa tại lúc lũ quét phát sinh.

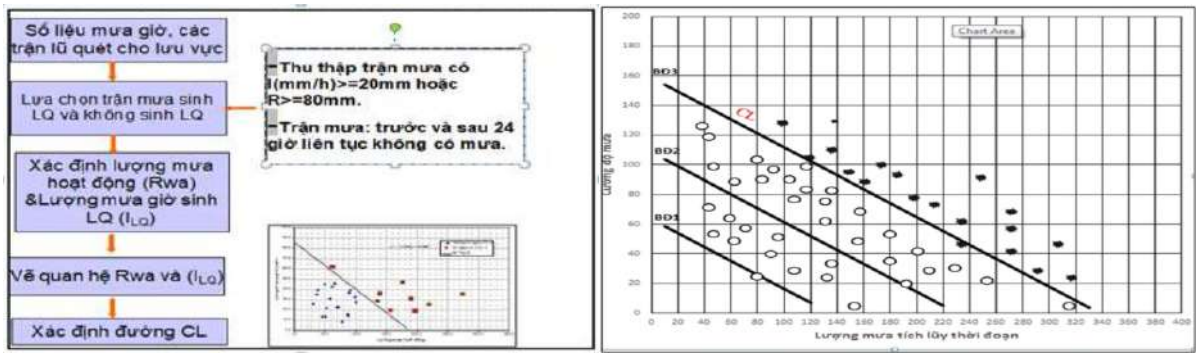


Hình 1 - 15. Phương pháp đường tới hạn CL [67]

Việt Nam áp dụng phương pháp này từ đầu những năm 2000, sau khi xây dựng đường tới hạn CL để xác định ngưỡng mưa gây lũ quét sẽ phân cấp báo động theo 3 cấp như bản gốc [122]:

Báo động Cấp 1: Đường CL cấp 1 được xây dựng trên cơ sở là đường trung bình đi qua nhóm điểm thấp nhất của quan hệ lượng mưa tích lũy thời đoạn và cường độ mưa lớn nhất. Đường này được xác định trực tiếp trên biểu đồ quan hệ trên cho mỗi trạm, được ký hiệu là Y1. Nếu trong thực tế có xuất hiện trận mưa nằm ở trên đường Y1 (BĐ1) hoặc khu vực phía phải biểu đồ thì thuộc cấp Báo động 1.

Báo động Cấp 2: Đường CL cấp 2 được xây dựng trên cơ sở là đường trung bình đi qua nhóm điểm trung bình của quan hệ lượng mưa tích lũy thời đoạn và cường độ mưa lớn nhất. Đường này được xác định trực tiếp trên biểu đồ quan hệ trên cho mỗi trạm, được ký hiệu là Y2. Nếu trong thực tế có xuất hiện trận mưa nằm ở trên đường Y2(BĐ2) hoặc khu vực phía phải biểu đồ thì thuộc cấp Báo động 2.



Hình 1 - 16. Xác định đường tới hạn CL ở Việt Nam [122]

Báo động Cấp 3: Đường CL cấp 3 được xây dựng trên cơ sở là đường bao đi qua nhóm điểm nằm xa nhất quan hệ lượng mưa tích lũy thời đoạn và cường độ mưa lớn nhất và được xác định qua khảo sát các trận mưa có hoặc nguy cơ lũ quét cao. Đường này được xác định trực tiếp trên biểu đồ quan hệ trên cho mỗi trạm, được ký hiệu là Y3(BĐ3). Nếu trong thực tế có xuất hiện trận mưa nằm ở trên đường Y3 hoặc khu vực phía phải biểu đồ thì thuộc cấp Báo động 3 là cấp nguy hiểm cần phát lệnh sơ tán khẩn cấp.

1.5.4. Chỉ số lượng mưa tích lũy thời đoạn ngắn (EPIC)

Chỉ số này được Alfieri và cộng sự nghiên cứu năm 2011 [94] nhằm giới thiệu một phương pháp mới trong cảnh báo sớm lũ quét dựa trên các đợt mưa lớn ở Châu Âu. Nghiên cứu sử dụng các sản phẩm khí tượng ở độ phân giải khác nhau như mô hình thời tiết số (NWP), mô hình kết hợp Radar-NWP để dự báo xác suất khu vực sắp có nguy cơ xảy ra lượng mưa lớn, làm đầu vào cho hệ thống FFG. Chỉ số sẽ tính toán cho một vị trí nào đó trên lưu vực tại một thời điểm (t) được xác định là giá trị lớn nhất của tỷ số giữa

lượng mưa tích lũy ở thượng lưu (UP_{di}) trong thời đoạn *di* được đã xảy ra trước đó và trung bình của UP_{di} lớn nhất các năm trong thời kỳ khí hậu xem xét:

$$EPIC(t) = \left[\frac{UP_{di}(t)}{\frac{1}{N}\sum_{yi=1}^{N} max(UP_{di})_{yi}}\right] \quad (1\text{-}5)$$

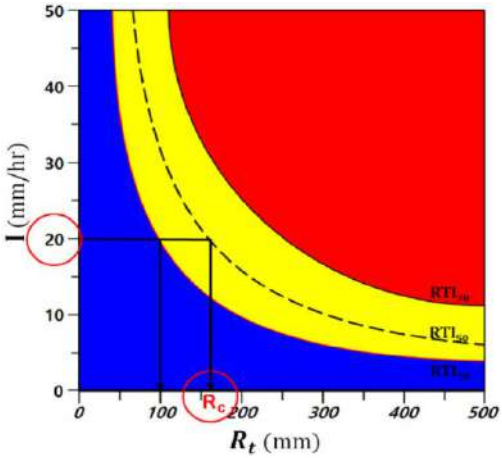
Trong đó, *di* có thể được thiết lập cho các thời đoạn khác nhau như 6 giờ, 12 giờ… và *yi* là năm thứ i trong thời kỳ khí hậu nghiên cứu. Ở Việt Nam, Đỗ Hoài Nam (2017) [104] cũng đã sử dụng phương pháp này để xác định lũ quét cho lưu vực sông Cả dựa trên thời kỳ 1961-2007 với dữ liệu mưa APHRODITE.

Ngoài chỉ số EPIC, Alfieri và cộng sự (2014) cũng phát triển chỉ số ERI (Extreme Runoff Index) [95]. ERI được thiết kế để xác định các sự kiện dòng chảy cực đoan bằng cách so sánh dòng chảy bề mặt tích lũy với phân bố thống kê của các giá trị cực đại hàng năm từ dữ liệu khí hậu dài hạn (20 năm). Chỉ số này được tích hợp vào hệ thống cảnh báo lũ châu Âu (European Flood Awareness System - EFAS) và bổ sung cho chỉ số European Precipitation Index (EPIC) trong việc dự báo lũ, bao gồm cả lũ do mưa lớn, băng tan, và đất bão hòa. ERI được tính trên lưới tính toán của EFAS, bao phủ toàn châu Âu với độ phân giải 5 km x 5 km, gồm 29.349 điểm lưới trên mạng lưới sông có diện tích lưu vực thượng lưu lớn hơn 1.000 km². Các lưu vực lớn với thời gian tập trung dòng chảy lớn hơn 144 giờ hoặc diện tích thượng lưu lớn hơn 100.000 km² không được xem xét do ảnh hưởng lớn của quá trình truyền lũ. Ưu điểm của chỉ số này là có xét tới sự tương tác giữa lượng mưa và độ ẩm đất cũng như sự bốc hơi và thấm. Phạm vi áp dụng chỉ số ERI cũng được khuyến cáo lớn hơn 1.000km².

1.5.5. Chỉ số lượng mưa kích hoạt (RTI)

Khi xem xét lũ quét do lượng mưa lớn gây ra, chỉ số RTI được định nghĩa là tích của cường độ mưa (I) và lượng mưa tích lũy hiệu quả (R_t) tại thời điểm xảy ra lũ quét.

R_t được xem xét như lượng mưa tích lũy từ 1 ngày đến 10 ngày trước đó. Do đó, cần xây dựng chỉ số RTI cho từng thời đoạn (từ 1 ngày đến 10 ngày). Các trận lũ quét/lũ bùn đá sẽ được thu thập và phân tích, với số liệu đủ lớn có thể xây dựng được tần suất RTI tương ứng với 90% và 10% và xây dựng đường quan hệ (hình bên). Khi ghi nhận được lượng mưa tương ứng sẽ xác định được nguy cơ lũ quét [123].



Hình 1 - 17. Quan hệ R_t và I

$$RTI = I \times R_t \quad (1\text{-}6)$$

1.5.6. Chỉ số mô-đun đỉnh lũ

Mô-đun đỉnh lũ được dùng để phân biệt một trận lũ là lũ quét hay lũ thường. Qua phân tích đặc trưng các trận lũ quét ở châu Âu (Gaume và cộng sự, 2009), mô-đun đỉnh lũ của lũ quét được xác định nằm trong khoảng 0,5–40 $m^3/(s \cdot km^2)$ [124].

$$I = \frac{Q}{A}\left(\frac{m^3}{s.km^2}\right) \quad (1\text{-}7)$$

với Q là lưu lượng đỉnh lũ (m^3/s) và A là diện tích lưu vực thượng nguồn (km^2).

Năm 2014, Braud đã tiếp tục nghiên cứu và chỉ ra sự phân định về lũ quét với lũ thường [125] kèm một định nghĩa: lũ quét là phản ứng thủy văn tăng vọt trong thời đoạn rất ngắn (vài giờ hoặc ngắn hơn với lưu vực 1–100 km^2, và dưới 24 giờ với lưu vực cỡ 1.000 km^2); để được xem là lũ quét, trận lũ phải có mô-đun đỉnh lũ vượt 0,5 $m^3/(s.km^2)$.

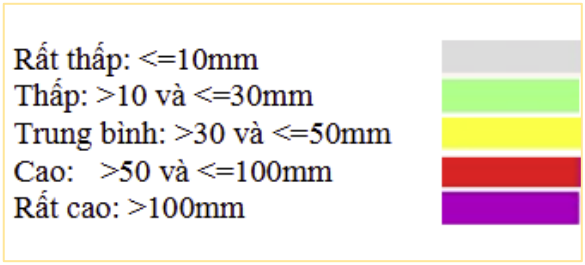
Cả hai nghiên cứu đều lấy ngưỡng phân định 0,5 $m^3/(s.km^2)$; song ngưỡng này chưa tính đến công suất dòng chảy, nên việc đánh giá nguy cơ lũ quét ở vùng thượng nguồn không đảm bảo độ tin cậy.

1.5.7. Chỉ số FFG

Ngưỡng dòng chảy tràn - Flash Flood Guidance (FFG) là sản phẩm chính để hệ thống FFGS đánh giá khả năng xảy ra lũ quét. Đây là tổng lượng mưa thực tế rơi trong một thời đoạn cho trước (1, 3 hay 6 giờ) đủ để sinh dòng chảy tràn bờ ($Q_{bankfull}$) tại vị trí đang xét [126]. FFG mang tính động: nó biến đổi theo khả năng trữ nước hiện thời của lưu vực và được cập nhật mỗi 6 giờ, mỗi lần cập nhật, hệ thống đưa ra dự báo cho 1, 3 và 6 giờ kế tiếp. Khi lượng mưa dự báo vượt giá trị FFG tương ứng thì lũ quét có thể xảy ra tại cửa ra của lưu vực; FFG càng nhỏ thì nguy cơ lũ quét càng lớn [127].

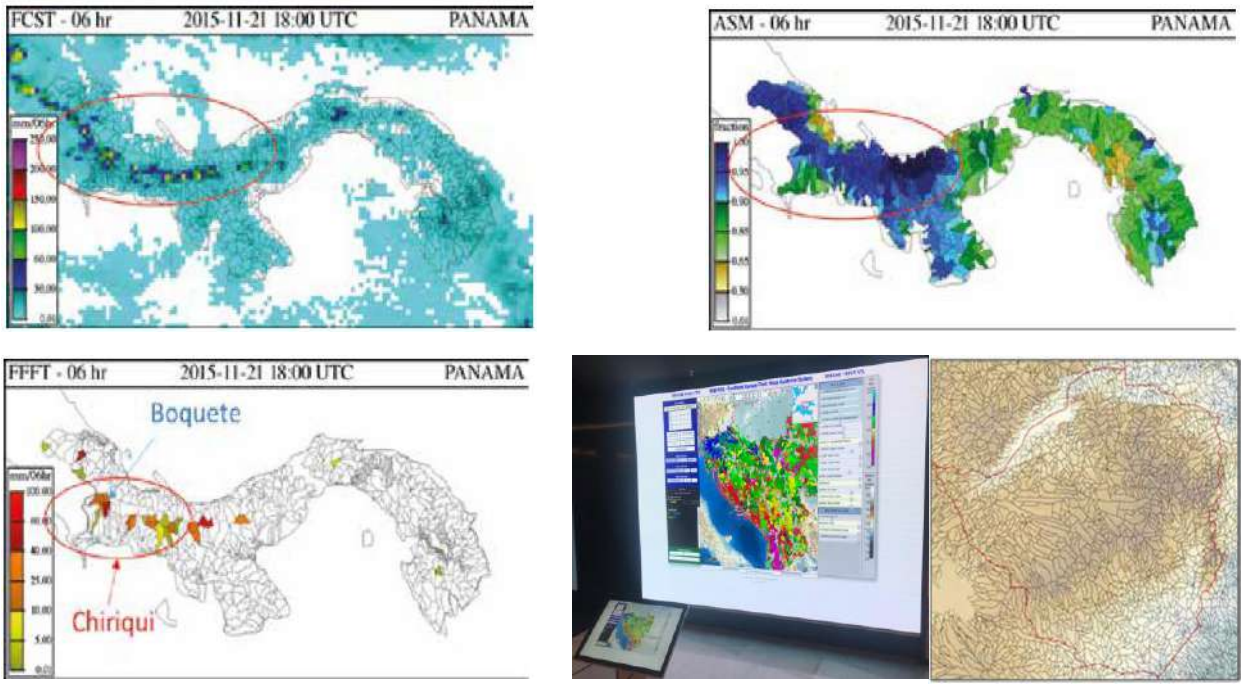
$$FFFT = FMAP - FFG \quad (1\text{-}8)$$

Trong đó, FFFT là chỉ số dự báo nguy cơ lũ quét (mm/6 giờ); FMAP là mưa dự báo trung bình khu vực lớn nhất được tổ hợp từ các mô hình số trị (mm/6 giờ); FFG là ngưỡng dòng chảy tràn (mm/6 giờ). Phân cấp nguy cơ lũ quét dựa vào chỉ số FFFT theo hình bên đang được áp dụng trong các hệ thống FFGS của Việt Nam



Muốn xác định FFG, trước hết phải có lưu lượng tràn bờ tại từng vị trí; lưu lượng này được suy ra bằng tính toán thủy lực trên một mặt cắt đã biết. Sau khi xác định được lưu lượng tràn bờ, cần ước tính xem với lượng mưa bao nhiêu có thể gây ra lưu lượng

tràn bờ tương ứng theo thời đoạn dựa trên điều kiện lưu vực (khả năng trữ nước của lưu vực) và so sánh với lượng mưa dự báo theo thời đoạn tương ứng. Chi tiết phương pháp này được Carpenter trình bày vào năm 1999 [42]. Hiện nay, trên thế giới đã có hơn 60 quốc gia sử dụng hệ thống FFGS cho cảnh báo nguy cơ lũ quét.



Hình 1 - 18. Sản phẩm của hệ thống FFGS

Ở Việt Nam, có 3 hệ thống trên toàn lãnh thổ sử dụng dựa trên FFGS, 01 hệ thống do Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển vận hành (có tên VNFFGS), 01 hệ thống do Trung tâm dự báo Khí tượng thủy văn Quốc gia vận hành (có tên SEAFFGS) và 01 hệ thống do Ủy Ban sông Mê Công vận hành (MRCFFGS). Hiện nay, sau khi hệ thống SEAFFGS đi vào hoạt động, hệ thống MRCFFGS đã dừng hoạt động.

1. Hệ thống VNFFGS

BẢN TIN CẢNH BÁO LŨ QUÉT
(Bản tin cảnh báo lũ quét 19h ngày 08/10/2023)

I. Căn cứ cảnh báo
- Số liệu mưa vệ tinh GHE của NOAA;
- Mưa dự báo do Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu thực hiện;
- Kết quả từ mô hình cảnh báo lũ quét VNOFFG.

II. Tình hình mưa
- Có mưa tại một số khu vực Trung Bộ với lượng mưa tích lũy 6 giờ tính đến 19h ngày 08/10/2023 từ 30mm đến 60 mm.

III. Khả năng xảy ra lũ quét trên lưu vực
- Dự báo trong 6h tới, một số khu vực Trung Bộ có khả năng mưa, lượng mưa tích lũy phổ biến từ 30mm đến 80mm, một số nơi có lượng mưa lớn nhất từ 80- 200mm; một số khu vực Tây Nguyên có khả năng mưa, lượng mưa tích lũy phổ biến từ 10mm đến 40mm, một số nơi có lượng mưa lớn nhất từ 50- 110mm Cảnh báo nguy cơ lũ quét xảy ra tại một số khu vực sau:

Bảng nguy cơ lũ quét cao một số khu vực

STT	Tỉnh	Huyện	Nguy cơ lũ quét
1	Thừa Thiên Huế	A Lưới và Nam Đông	Cao

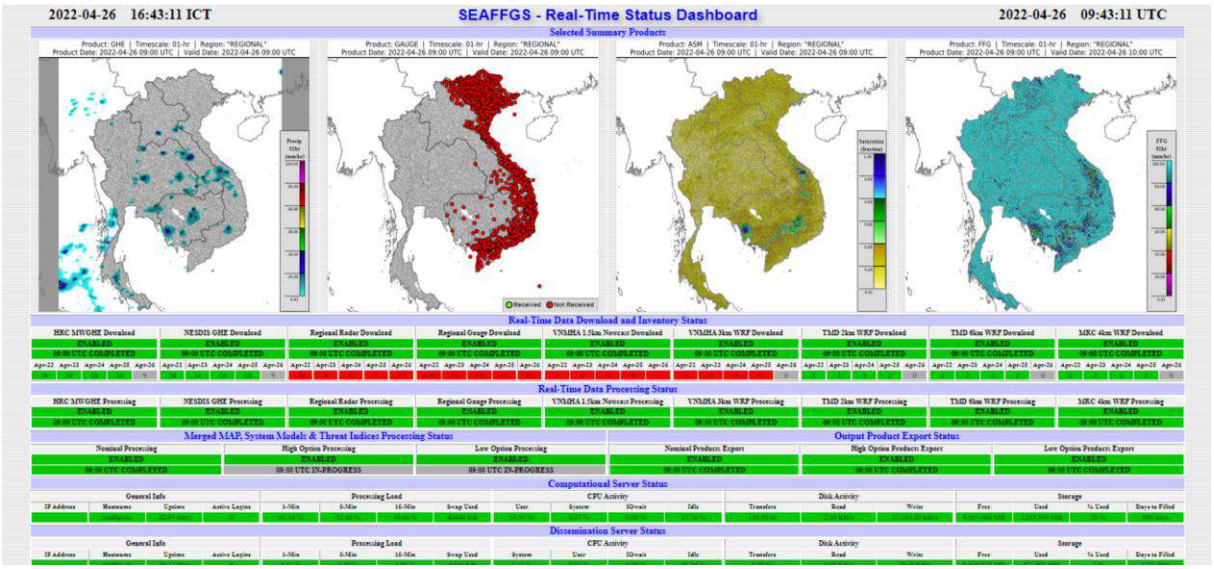
Hình 1 - 19. Bản tin cảnh báo lũ quét của hệ thống VNOFFGS

Hệ thống VNFFGS do Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu (IMHEN), nay là Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển, vận hành. Hệ thống phát tin dự báo nguy cơ lũ quét vào lúc 1; 7; 13; 19 giờ hàng ngày trên website. Hệ thống sử dụng số liệu mưa vệ tinh GHE của NOAA và mưa dự báo do IMHEN thực hiện, kết hợp với mô hình cảnh báo lũ quét VNOFFG, kết quả dự báo đến cấp huyện.

2. Hệ thống SEAFFGS

SEAFFGS được thiết kế và phát triển nhằm mục đích cung cấp một hệ thống công cụ hiện đại, hỗ trợ các cán bộ dự báo KTTV phân tích, giám sát và cảnh báo thiên tai lũ quét thông qua các dữ liệu quan trắc tự động, dữ liệu mô hình theo thời gian thực bao gồm các sản phẩm chính như: Các chỉ số cảnh báo lũ quét dựa trên ngưỡng dòng chảy tràn, Chỉ số độ ẩm đất trung bình, Chỉ số dự báo nguy cơ lũ quét, Chỉ số rủi ro lũ quét và Định hướng cảnh báo sạt lở thông qua ngưỡng độ ẩm, ngưỡng sạt lở.

Hiện nay, lũ quét, sạt lở đất chưa thể dự báo được vị trí cụ thể xảy ra sạt lở, chỉ có thể cảnh báo nguy cơ theo các mức độ khác nhau tại các khu vực. Hệ thống SEAFFGS hỗ trợ các dự báo viên phân tích, cảnh báo các ngưỡng mưa, sinh lũ quét trong 1 giờ, 3 giờ, 6 giờ, vùng nguy cơ rủi ro lũ quét trong 12, 24, 36 giờ, ngưỡng sạt lở đất trong phạm vi 24 giờ và được cập nhật thường xuyên theo các khoảng thời gian tương ứng. Hệ thống SEAFFGS mới nhất chia Việt Nam thành hơn 18.400 tiểu lưu vực, phần lớn các tiểu lưu vực có diện tích dưới 30km² (chiếm gần 85%), chủ yếu từ 10÷20km² (chiếm khoảng 40%). Các lưu vực có diện tích lớn hơn 50km² chiếm chỉ khoảng 3%. Các sản phẩm dự báo của hệ thống SEAFFGS được thể hiện minh họa trong Hình 1 - 20.



Hình 1 - 20. Hệ thống cảnh báo lũ quét theo SEAFFGS

1.6. Tổng quan tình hình lũ quét và các nghiên cứu về lũ quét trên khu vực miền núi phía Bắc

1.6.1. Tình hình lũ quét khu vực miền núi phía Bắc

Khu vực miền núi phía Bắc, với địa hình dốc và hệ thống sông suối nhỏ, thường xuyên là tâm điểm của các trận lũ quét, gây ra những tổn thất nghiêm trọng về người và tài sản. Trong những năm gần đây, tình hình thiên tai tại các tỉnh miền núi, trung du ngày càng diễn biến phức tạp, với mức độ ngày càng gia tăng, gây thiệt hại nghiêm trọng về người, tài sản và môi trường sinh thái. Các trận lũ quét với cường độ ngày một lớn và mức độ ngày một khủng khiếp được ghi nhận liên tục, cho thấy một xu hướng đáng lo ngại. Điều này chỉ ra rằng các yếu tố tự nhiên như thời tiết bất thường kết hợp với các tác động tiêu cực từ con người đang làm trầm trọng thêm rủi ro và hậu quả của lũ quét.

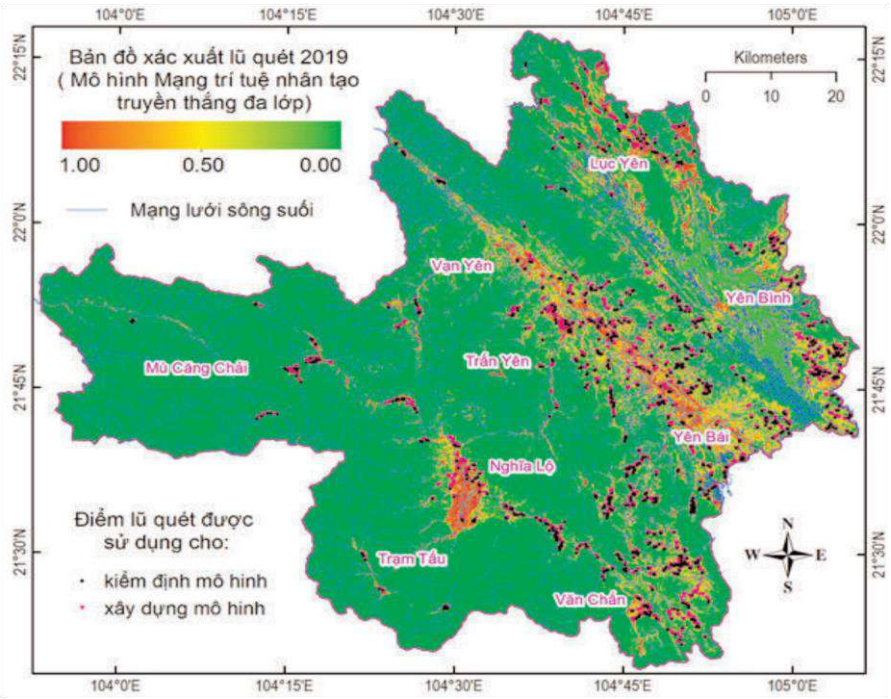
Lũ quét là một hiện tượng cực đoan của lũ lụt thông thường và thường xuyên xuất hiện trong các đợt mưa lớn cục bộ. Điển hình như đợt mưa lớn diện rộng từ ngày 04-08/8/2023 đã gây lũ quét tại xã Hồ Bốn, huyện Mù Căng Chải, tỉnh Yên Bái và sạt lở đất nhiều nơi tại các tỉnh miền núi phía Bắc như Yên Bái, Sơn La, Lai Châu, Lào Cai, Điện Biên làm 11 người chết. Mưa lớn trong thời đoạn ngắn xảy ra tối ngày 12/9/2023 đã gây lũ quét tại xã Liên Minh, huyện Sa Pa, tỉnh Lào Cai làm 09 người chết và gây thiệt hại lớn về tài sản [128].

Các tỉnh như Lào Cai, Yên Bái, Hà Giang là các tỉnh trọng điểm về lũ quét trên khu vực miền núi phía Bắc. Tỉnh Yên Bái (nay là tỉnh Lào Cai) trong 20 năm trở lại đây có 5 trận lũ quét rất lớn, gây thiệt hại về người và tài sản bao gồm: (1) Trận lũ quét năm 2005 tại huyện Văn Chấn làm 50 người chết và mất tích; sập đổ, trôi hoàn toàn 248 ngôi nhà. (2) Trận lũ, lũ quét, sạt lở đất năm 2008 trên địa bàn toàn tỉnh đã làm 42 người chết và mất tích, 32 người bị thương; sập đổ, trôi hoàn toàn 364 ngôi nhà. (3) 02 trận lũ, lũ quét năm 2017 (tháng 8 tại huyện Mù Cang Chải; tháng 10 tại các huyện Văn Chấn, Trạm Tấu, Văn Yên và Thị xã Nghĩa Lộ) đã làm 42 người chết và mất tích, 18 người bị thương; sập đổ, trôi hoàn toàn 134 ngôi nhà. (4) Trận lũ, lũ quét năm 2018 ảnh hưởng 9/9 huyện làm 17 người chết và mất tích, 20 người bị thương; sập đổ, trôi hoàn toàn 150 ngôi nhà. (5) Trận lũ, lũ quét tháng 8 năm 2023 tại huyện Mù Cang Chải làm 3 người chết; sập đổ, trôi hoàn toàn 57 ngôi nhà [128].

Trong mười năm trở lại đây, thiên tai nói chung và lũ quét nói riêng tại miền Bắc Việt Nam đã diễn ra dồn dập và khốc liệt, với nhiều yếu tố dị thường và vượt mức lịch sử. Mặc dù trung bình hàng năm trên cả nước xảy ra hàng chục trận lũ quét, giai đoạn gần đây cho thấy sự gia tăng rõ rệt về cường độ và mức độ. Các sự kiện được mô tả là "lịch sử" hoặc "chưa từng có tiền lệ" xuất hiện thường xuyên hơn, cho thấy mức độ nghiêm trọng của các trận lũ ngày càng gia tăng.

1.6.2. Các nghiên cứu về lũ quét khu vực miền núi phía Bắc trong những năm gần đây

Trần Viết Khanh năm 2021 [129] đã tiến hành thực hiện nhiệm vụ Xây dựng các giải pháp phòng tránh giảm nhẹ thiên tai từ xói lở quét trên địa bàn tỉnh Thái Nguyên, trong đó xây dựng được bản đồ phân vùng nguy cơ lũ quét, sạt lở đất bằng phương pháp chồng chập đa nhân tố dựa trên phân tích thứ bậc (AHP) của 8 lớp thành phần. Kết quả cho thấy yếu tố độ dốc có ảnh hưởng lớn nhất (0,34), trong khi các yếu tố về dứt gãy, phân tầng độ cao và thảm phủ có ảnh hưởng thấp nhất.



Hình 1 - 21. Phân vùng lũ quét tỉnh Yên Bái bằng mô hình nơ-ron nhân tạo đa lớp.

Nguyễn Viết Nghĩa (2020) (đại học Mỏ - Địa chất) đã xây dựng bản đồ phân vùng và cảnh báo lũ quét độ phân giải cao (20m) cho một số tỉnh vùng Tây Bắc trong nhiệm vụ Nghiên cứu xây dựng bản đồ phân vùng và cảnh báo lũ quét độ phân giải cao cho một số tỉnh vùng Tây Bắc nhằm tăng cường khả năng ứng phó với thiên tai của cộng đồng phục vụ xây dựng nông thôn mới [130]. Phương pháp xây dựng dựa trên mô hình học máy rừng ngẫu nhiên với 15 tham số đầu vào và mô hình nơ-ron nhân tạo đa lớp. Kết quả cho thấy tiềm năng cao trong việc ứng dụng mô hình trí tuệ nhân tạo trong việc phân vùng nguy cơ lũ quét (thể hiện trong Hình 1 - 21).

Trịnh Thu Phương năm 2021 [131] đã tiến hành nghiên cứu cơ sở khoa học và thực tiễn cảnh báo, dự báo đa thiên tai do mưa kích hoạt, áp dụng thử nghiệm tại lưu vực điển hình là sông Ngòi Thia. Nghiên cứu vận dụng phương pháp mô tả trong hệ thống FFGS để xác định các tham số phục vụ cảnh báo nguy cơ lũ quét dựa trên lưu lượng tràn bờ và sử dụng mưa dự báo từ hệ thống FFGS. Kết quả cho thấy đối với ngưỡng mưa tràn

bờ ứng với thời đoạn 1h, khoảng 80% tiểu lưu vực có ngưỡng mưa tràn bờ trong khoảng từ 2 – 10 mm. Đối với ngưỡng mưa tràn bờ thời đoạn 3h, khoảng 70% tiểu lưu vực có ngưỡng mưa tràn bờ từ 5 – 20 mm. Đối với ngưỡng mưa tràn bờ thời đoạn 6h, có khoảng 40-50% tiểu lưu vực có ngưỡng mưa từ 10 – 20 mm.

Ngô Thị Phương Thảo và cộng sự (2024) [132] đã trình bày phương pháp phát hiện lũ quét từ ảnh Sentinel-1A. Theo đó, bốn ảnh được thu thập ở chế độ IW, xử lý mức 1 ở các thời điểm trước và sau khi xảy ra lũ quét. Khu vực nghiên cứu thử nghiệm là tỉnh Lào Cai, nơi thường xuyên xảy ra các hiện tượng lũ quét gây thiệt hại lớn. Phương pháp được đề xuất để chiết tách vùng lũ quét từ ảnh gồm các bước: (1) Thu thập tư liệu ảnh Sentinel-1A và các dữ liệu liên quan; (2) Thực hiện các bước tiền xử lý ảnh và cắt ảnh theo ranh giới vùng nghiên cứu; (3) Xử lý và phân tích ảnh để chiết tách các vùng lũ quét và đánh giá độ chính xác bằng dữ liệu điều tra thực địa. Kết quả nghiên cứu là dữ liệu đầu vào cho việc xây dựng các mô hình cảnh báo lũ quét cũng như cung cấp thông tin cho các cơ quan quản lý nhằm đưa ra các giải pháp ứng phó và giảm nhẹ thiên tai.

Lê Văn Thìn (2023) [133] đã sử dụng chỉ số mô-đun đỉnh lũ và chỉ số lưu lượng tràn bờ để xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét cho huyện Nậm Pồ, tỉnh Điện Biên. Kết quả cho thấy bản đồ nguy cơ lũ quét có sự phù hợp nhất định đối với các điểm trên lòng dẫn và chưa phù hợp với các điểm trên sườn dốc và khuyến nghị cần cải thiện các chỉ số này để có kết quả tốt hơn bằng việc loại bỏ kết quả tính toán trên các lưu vực có diện tích nhỏ hơn 1km² (Hình 1 - 22). Điều này cho thấy sự bất cập của hai chỉ số này khi áp dụng trong thực tế để phân cấp nguy cơ lũ quét do không phản ánh đúng được bản chất của dòng chảy lũ quét khu vực miền núi.



Hình 1 - 22. Kết quả điều chỉnh các khu vực sườn dốc trong nghiên cứu trước đây.

Vũ Bá Thao và Bùi Xuân Việt (2023) [134] đã phân tích lượng mưa tích lũy sinh lũ và không sinh lũ dựa trên số liệu của 142 trận mưa thống kê từ 6 trạm đo mưa: Tam Đường, Mường Tè, Mù Căng Chải, Văn Chấn, Tuần Giáo, Bắc Yên trong khoảng thời gian từ tháng 6 đến tháng 9 thuộc 5 năm từ 2015 đến 2019. Kết quả cho thấy, lượng mưa tích lũy sinh lũ quét, lũ bùn đá chênh lệch lớn giữa các lưu vực, biến động phổ biến

trong khoảng từ 80 mm đến 240 mm, trong đó có 7/16 trận có ngưỡng thấp hơn ngưỡng cảnh báo hiện hành, tức nhỏ hơn 100 mm/24h. Rất nhiều trận mưa, 133/142 trận, có lượng mưa tích lũy lớn hơn ngưỡng mưa đã từng sinh lũ nhưng không làm phát sinh lũ quét, lũ bùn đá.

Đào Minh Đức và cộng sự (2022) [135] đã giá nguy cơ hình thành lũ quét trên suối Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai bằng phương pháp phân tích thống kê chủ yếu dựa trên lượng mưa 24 giờ kết hợp với bản đồ tiềm năng lũ quét. Các bản đồ tiềm năng được xây dựng dựa trên 2 phương pháp thuộc nhóm chồng chập đa nhân tố bao gồm phương pháp tỷ lệ tần suất và phương pháp thống kê mật độ sự kiện với các tham số nội tại điểm.

1.7. Những vấn đề còn tồn tại tiếp tục nghiên cứu

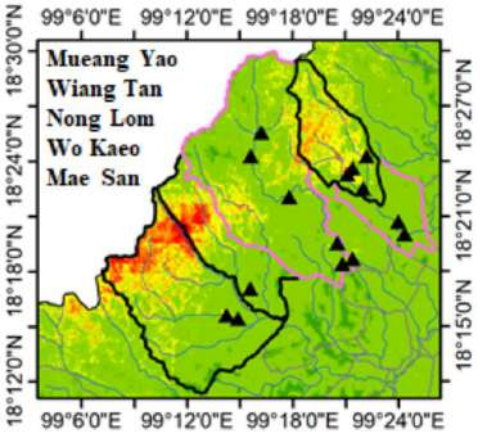
1.7.1. Về mặt khoa học

Chỉ số mô-đun đỉnh lũ được giới thiệu nhằm xác định một trận lũ có phải là lũ quét hay không là mong muốn rất lớn của các nhà khoa học. Tuy nhiên cho đến nay, sự phân định này vẫn chưa có câu trả lời rõ ràng. Chỉ số này mặc dù đã được một số nhà khoa học nghiên cứu, tuy nhiên chưa được công nhận một cách rộng rãi do sự hạn chế về điều kiện áp dụng, đặc biệt, các tính toán thủy văn trên sườn dốc chưa phù hợp với chỉ số phân định này (do tích lũy năng lượng dòng chảy chưa đủ để hình thành lũ quét).

Đường tới hạn CL được các nhà khoa học trong nước sử dụng rất nhiều trong các nghiên cứu về lũ quét. Theo đó, tại mỗi khu vực cảnh báo lũ quét, cần lần lượt xây dựng phương trình đường tới hạn CL cho mỗi trạm quan trắc. Hạn chế lớn nhất của phương pháp này là cần dữ liệu lịch sử lớn và chi tiết. Ngoài ra, đôi khi việc xảy ra mưa lớn tại một trạm không đủ sinh nguy cơ lũ quét cho khu vực, điều này gây ra cảnh báo khống.

Chỉ số FFPI được xây dựng với mong muốn có thể xác định được nguy cơ lũ quét đến từng điểm trên khu vực nghiên cứu, tuy nhiên, cách tiếp cận này đang chưa phù hợp trong việc cảnh báo nguy cơ lũ quét. Các giá trị FFPI thành phần là các giá trị nội tại của các điểm, trong khi đó, lũ quét xảy ra tại một vị trí bị ảnh hưởng bởi phản ứng thủy văn phía thượng nguồn của nó. Mặc dù phương pháp này được áp dụng một cách đơn giản, nhưng do không xét đến những điều kiện tức thời như độ ẩm và dòng chảy sông suối nên dữ liệu tính toán chỉ mang tính tham khảo. Có thể khắc phục nhược điểm này bằng việc sử dụng các tham số đầu vào là tham số thủy văn của từng lưu vực thay vì sử dụng dữ liệu nội tại của điểm xét. Tuy nhiên, bản chất của lũ quét hình thành bởi trận mưa lại chưa được thể hiện trong chỉ số này.

Chỉ số DFFHI là một chỉ số cải tiến khi bổ sung kết hợp chỉ số FFPI và chỉ số mưa (RI) cùng với chỉ số độ ẩm của đất (SWI). Mặc dù đã có sự cải thiện, chỉ số này vẫn chưa xét đến các yếu tố thượng nguồn của vị trí dự báo, điều này có thể gây ra cảnh báo khống ở khu vực có độ dốc cao như đỉnh núi. Bên cạnh đó, việc cập nhật chỉ số độ ẩm hằng ngày gây ra độ trễ trong việc xác định trạng thái lưu vực. Điều này có thể gây ảnh hưởng rất lớn đến kết quả tính toán nguy cơ lũ quét.



Hình 1 - 23. Các vị trí ở đỉnh núi thể hiện nguy cơ lũ quét cao theo DFFHI [121]

Chỉ số dòng chảy tràn FFG là một chỉ số tương đối đầy đủ trong tính toán nguy cơ lũ quét. Tuy nhiên, do phải tính toán lưu lượng tràn bờ nên cần có dữ liệu mặt cắt tại vị trí cửa ra của lưu vực. Ưu điểm của phương pháp này là sau khi tính toán, mỗi lưu vực sẽ được gán với một ngưỡng mưa cụ thể. Nếu giá trị ngưỡng mưa dự báo vượt giá trị này, toàn bộ lưu vực đó được cho là có nguy cơ sinh lũ quét. Hiện nay, phương pháp này đang được coi là một trong những phương pháp cảnh báo lũ quét hiện đại nhất trên thế giới [127] và đang được triển khai tại nhiều quốc gia. Tuy nhiên, một số yếu tố có thể tác động đến độ tin cậy của hệ thống FFGS bao gồm:

Sử dụng lượng mưa dự báo: hiện nay, việc sử dụng lượng mưa dự báo đang là một trong những yếu tố ảnh hưởng đến độ tin cậy. Mặc dù có thể đưa ra cảnh báo trong thời gian tương đối dài (lên tới 72 giờ), độ tin cậy của kết quả dự báo nguy cơ lũ quét lại chưa cao vì phụ thuộc vào độ tin cậy của lượng mưa dự báo.

Bình quân hóa nguy cơ: mỗi vị trí lưu vực trong hệ thống FFGS đều được xác định nguy cơ dựa trên kết quả tính toán nguy cơ của lưu vực đó, do vậy, các vị trí thượng nguồn của lưu vực cũng có nguy cơ tương tự như khu vực hạ lưu tại cửa ra của lưu vực.

1.7.2. Về mặt thực tiễn

Cho đến nay, việc cảnh báo nguy cơ lũ quét là một công việc phức tạp và khó khăn đối với các nhà khoa học trên thế giới và trong nước. Nhu cầu thực tiễn của xã hội là cần xác định được lũ quét sẽ xảy ra ở đâu và khi nào, để các nhà quản lý và cộng đồng có phương án ứng phó nhằm giảm thiểu thiệt hại về người và tài sản.

Hiện nay, hệ thống SEAFFGS có diện tích các tiểu lưu vực nhỏ hơn 250km² và phổ biến là các lưu vực từ 20÷30km², về độ chi tiết, hệ thống SEAFFGS đã có mức độ chi tiết rất lớn, mặc dù vậy, việc tùy biến sử dụng của hệ thống này lại bị hạn chế bởi

công nghệ làm chủ mã nguồn. Do sản phẩm FFGS là sản phẩm phối hợp với HRC, việc chưa tiếp cận được mã nguồn đang là rào cản lớn của các nhà khoa học Việt Nam trong việc cải thiện và nâng cấp hệ thống.

Trong việc cảnh báo nguy cơ lũ quét, việc áp dụng mô hình thủy lực để tính toán, mô phỏng dòng chảy cần dữ liệu khá đầy đủ về mặt cắt và làm tăng thời gian tính toán một cách đáng kể, điều này gây ra sự tốn kém và ít mang lại hiệu quả. Bên cạnh đó, các mô hình thủy văn truyền thống hiện nay đang tính toán tại vị trí cửa ra của một lưu vực cụ thể dẫn đến việc xác định các tham số đồng thời cho mọi vị trí gặp khó khăn.

1.7.3. Định hướng nghiên cứu của luận án

Dựa trên quan điểm ***lũ quét là kết quả cực đoan của một phản ứng thủy văn cho một lưu vực cụ thể***, luận án cho rằng, việc tính toán nguy cơ lũ quét cần xét đến toàn bộ các đặc trưng của lưu vực thượng lưu vị trí tính toán như đặc trưng về độ dốc, thảm phủ, loại đất, địa hình, lượng mưa … và về bản chất, lũ quét vẫn là một dạng lũ. Điều này khác với quan điểm xem xét nguy cơ lũ quét dựa trên các chỉ số nội tại của điểm theo không gian.

Mặc dù lũ quét có thể phát sinh do sự ùn tắc dòng chảy, vỡ đập, sạt lở..., phạm vi luận án này chỉ xem xét những trận lũ quét xảy ra do mưa lớn và không xét đến rủi ro do lũ quét gây ra đến các đối tượng khác mà chỉ xem xét các yếu tố nội tại của trận lũ. Ngoài sự hạn chế của các chỉ số nguy cơ lũ quét hiện tại, cho đến nay, vẫn chưa có một nghiên cứu cụ thể nào xây dựng ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét cho toàn bộ khu vực miền núi phía Bắc dựa trên những đặc trưng của các trận lũ quét đã xảy ra. Hầu hết các nghiên cứu sử dụng các chỉ số hiện tại của các nghiên cứu quốc tế hoặc phân chia nguy cơ lũ quét đều trong một khoảng chỉ số cho một khu vực cụ thể.

Hệ thống FFGS là một hệ thống với quy mô lớn, để có thể chia nhỏ hệ thống cho Việt Nam thành hơn 18.400 tiểu lưu vực trong hệ thống SEAFFGS là một nỗ lực rất lớn của Tổng cục Khí tượng thủy văn phối hợp với HRC nhằm xác định nguy cơ lũ quét chi tiết hơn. Mặc dù vậy, các yếu tố có thể tác động đến hệ thống cảnh báo vẫn hiện hữu và đang chi phối rất lớn đến chất lượng cảnh báo lũ quét.

Dựa trên những thành tựu đạt được trong nghiên cứu về lũ quét và hệ thống FFGS hiện nay, rất cần thiết để xác định một ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc dựa trên công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy, bao gồm các yếu tố đặc trưng riêng về lòng dẫn, địa hình. Bên cạnh đó, nguyên tắc tính toán thủy văn để xác định nguy cơ lũ quét cần được thực hiện và cải thiện. Luận án mong muốn xây dựng một hệ thống cảnh báo lũ quét xuyên suốt từ việc xác định ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét đến quy trình xác định nguy cơ lũ quét. Có thể dễ dàng so sánh với hệ thống FFGS như sau:

Bảng 1 - 5. Điểm khác biệt của hệ thống trong luận án với hệ thống FFGS

TT	Yếu tố	Hệ thống FFGS	Hệ thống trong luận án
1	Mức độ chi tiết	Theo tiểu lưu vực (chia thành các tiểu lưu vực, tính toán thủy văn dựa trên mô hình thông số phân bố)	Theo điểm (tính toán theo điểm, mỗi điểm là một cửa ra của một lưu vực, tính toán thủy văn dựa trên mô hình thông số tập trung)
2	Quy mô	Toàn Việt Nam, hơn 18.400 tiểu lưu vực. Diện tích tiểu lưu vực < 250km²	Theo độ phân giải của raster và phạm vi tính toán (hướng tới phạm vi cấp tỉnh)
3	Ngưỡng cảnh báo	Dựa trên lưu lượng tràn bờ	Xác định ngưỡng phân cấp nguy cơ đặc trưng riêng cho khu vực miền núi phía Bắc dựa trên công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy lũ.
4	Dữ liệu mưa	Sử dụng dữ liệu mưa dự báo kết hợp mưa thực đo	Luận án cung cấp một khung (framework) tính toán, có thể kết hợp lượng mưa thực đo và lượng mưa dự báo khi có mức độ sẵn sàng về dữ liệu dự báo trong tương lai. Trong phần áp dụng thử nghiệm cho lưu vực sông Nghĩa Đô, luận án sử dụng lượng mưa thực đo đến thời điểm hiện tại để xác định lũ quét liệu có thể xảy ra (trong các giờ tiếp theo) hay không.
5	Thời gian dự báo/cảnh báo	Dự báo lên tới 72 giờ, bản tin công bố mỗi giờ	Cảnh báo dựa trên mưa mô phỏng. Nếu sử dụng lượng mưa dự báo, thời gian dự báo/cảnh báo sẽ kéo dài hơn so với sử dụng thời gian thực đo (chỉ xét độ trễ của tập trung dòng chảy).
6	Không gian	Xác định nguy cơ cho mỗi tiểu lưu vực (nguy cơ bình quân)	Xác định nguy cơ cho từng điểm (nguy cơ riêng tại từng điểm)
7	Phương pháp tính toán thủy văn	SCS-CN-Hydro Graph Unit	SCS-CN-Hydro Graph Unit
8	Kiểm soát mã nguồn	Đối tác quốc tế	Tự phát triển
9	Chức năng	Nhiều chức năng và các sản phẩm đa dạng kèm theo	Chỉ phục vụ tính nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian dựa vào lượng mưa.

Như vậy, có 02 vấn đề cần phải giải quyết để có thể xác định nguy cơ lũ quét đến từng điểm trên khu vực nghiên cứu:

- Xây dựng được ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét đặc trưng cho khu vực miền núi phía Bắc, dựa trên công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy.
- Xác định được ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian: đến độ phân giải điểm, hàng giờ.

Vấn đề thứ nhất: Đặc điểm của các trận lũ quét trong lịch sử được sử dụng để xác định ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét đặc trưng cho khu vực miền núi phía Bắc (được mô tả trong mục 2.2), ngưỡng này có liên quan đến hai chỉ số: công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy.

Vấn đề thứ hai: mỗi điểm trên khu vực nghiên cứu được xem là cửa ra của một lưu vực thượng nguồn. Khi đó, cứ mỗi điểm cần xác định nguy cơ lũ quét, một lưu vực thượng nguồn của điểm đó sẽ được xác định và một quy trình tính toán mô phỏng mưa – dòng chảy sẽ được tiến hành nhằm xác định các tham số cần thiết tại điểm đó (cửa ra của lưu vực đó), một lưu vực như vậy được gọi với thuật ngữ "lưu vực ô lưới" trong luận án. Cứ tiếp tục như vậy cho đến hết toàn bộ các điểm trên phạm vi nghiên cứu. Toàn bộ quy trình tính toán được mô tả trong mục 2.2.2. Kết quả cuối cùng là bản đồ nguy cơ lũ quét và thời gian dự kiến xảy ra lũ quét lớn nhất (tương ứng với thời gian xảy ra đỉnh lũ).

Về dữ liệu mưa, luận án sử dụng dữ liệu mưa thực đo nhằm tính toán nguy cơ xảy ra lũ quét cho khu vực áp dụng thử nghiệm. Do đó, kết quả mô phỏng trả lời cho câu hỏi: "*Mưa như vậy thì lũ quét có thể xảy ra ở đâu và sau bao lâu".* Trên thực tế, khung tính toán có thể tính toán mô phỏng cho bất kỳ lượng mưa nào (là đầu vào) để mô phỏng dòng chảy dựa vào mô hình thủy văn (cho kết quả đầu ra). Lý do của việc chưa sử dụng mưa dự báo trong nghiên cứu này để đánh giá nguy cơ lũ quét là do chưa đánh giá được độ tin cậy hoặc sự phù hợp của từng loại mưa dự báo cho tính toán nguy cơ lũ quét.

1.8. Tiểu kết chương 1

Chương 1 đã cung cấp cái nhìn tổng quan về lũ quét và quan điểm của luận án về việc xác định nguy cơ lũ quét dạng nước thuần túy dựa vào mô phỏng mưa – dòng chảy. Ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét định hướng dựa vào công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy. Phạm vi nghiên cứu được xác định là lũ quét dạng nước, không xét các yếu tố sạt lở, nghẽn dòng và các yếu tố bất định khác.

Quá trình nghiên cứu lũ quét đã phát triển mạnh trong 40 năm trở lại đây. Đặc biệt là sự phát triển của công nghệ mang tính hệ thống, có thể đưa ra những dự báo về lượng mưa kết hợp với các kỹ thuật GIS và mô hình thủy văn, từ đó cung cấp các sản phẩm dự báo, cảnh báo nguy cơ lũ quét ngày càng phong phú. Hệ thống FFGS là một hệ thống

điển hình, tích hợp đa nguồn dữ liệu và đa dạng sản phẩm, là hệ thống hiện đại nhất cho đến thời điểm này về cảnh báo lũ quét và được nhiều quốc gia sử dụng trên khắp thế giới.

Nghiên cứu về lũ quét tập trung chủ yếu vào bốn hướng chính bao gồm (1) đánh giá tính nhạy cảm với lũ quét; (2) đánh giá nguy cơ lũ quét dựa trên lượng mưa; (3) đánh giá nguy cơ lũ quét dựa trên các yếu tố thủy văn; và (4) đánh giá nguy cơ lũ quét dựa trên các yếu tố thủy lực. Trên cơ sở đó, các chỉ số/ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét cũng được xác định phục vụ xây dựng bản đồ nguy cơ/nhạy cảm với lũ quét. Các ngưỡng phân cấp mặc dù đã được phát triển bởi nhiều nghiên cứu, cho đến nay, chưa có ngưỡng phân cấp lũ quét nào tập trung vào công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy. Hai tham số này được đánh giá là hai tham số phản ánh đúng bản chất sức mạnh của dòng chảy lũ quét và sẽ được tập trung nghiên cứu trong các phần tiếp theo.

Bên cạnh đó, các bản đồ nguy cơ/nhạy cảm với lũ quét xây dựng theo nguyên tắc thủy văn thông thường được thiết kế chia thành các tiểu lưu vực nhỏ. Điều này dẫn đến một vấn đề quan trọng trong việc chỉ rõ khu vực nhánh suối nào có nguy cơ lũ quét cao chưa được thể hiện, một quy mô cảnh báo cấp xã có thể chưa đủ chi tiết để xác định khu vực có thể xảy ra lũ quét. Luận án này cũng trình bày một giải pháp xác định nguy cơ lũ quét dựa trên nguyên lý thủy văn, có thể xác định đến mọi vị trí theo độ phân giải không gian.

Dựa trên kết quả đánh giá, rà soát các nghiên cứu nổi bật gần đây về lũ quét, đặc biệt là dự báo/cảnh báo nguy cơ lũ quét, luận án đã chỉ ra những khó khăn còn tồn tại trong công tác xác định nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian, quan điểm thực hiện và định hướng của nghiên cứu. Trên cơ sở đó, luận án xác định hai khoảng trống cần giải quyết: chưa có ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét dựa trên bản chất vật lý của dòng chảy (công suất, vận tốc) cho khu vực miền núi phía Bắc; và chưa có giải pháp xác định nguy cơ lũ quét đến độ phân giải điểm theo không gian và thời gian. Đây là hai vấn đề trọng tâm được giải quyết trong các chương tiếp theo.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG CƠ SỞ KHOA HỌC XÁC ĐỊNH NGUY CƠ LŨ QUÉT CHO KHU VỰC MIỀN NÚI PHÍA BẮC

2.1. Cách tiếp cận, phương pháp nghiên cứu và kỹ thuật sử dụng

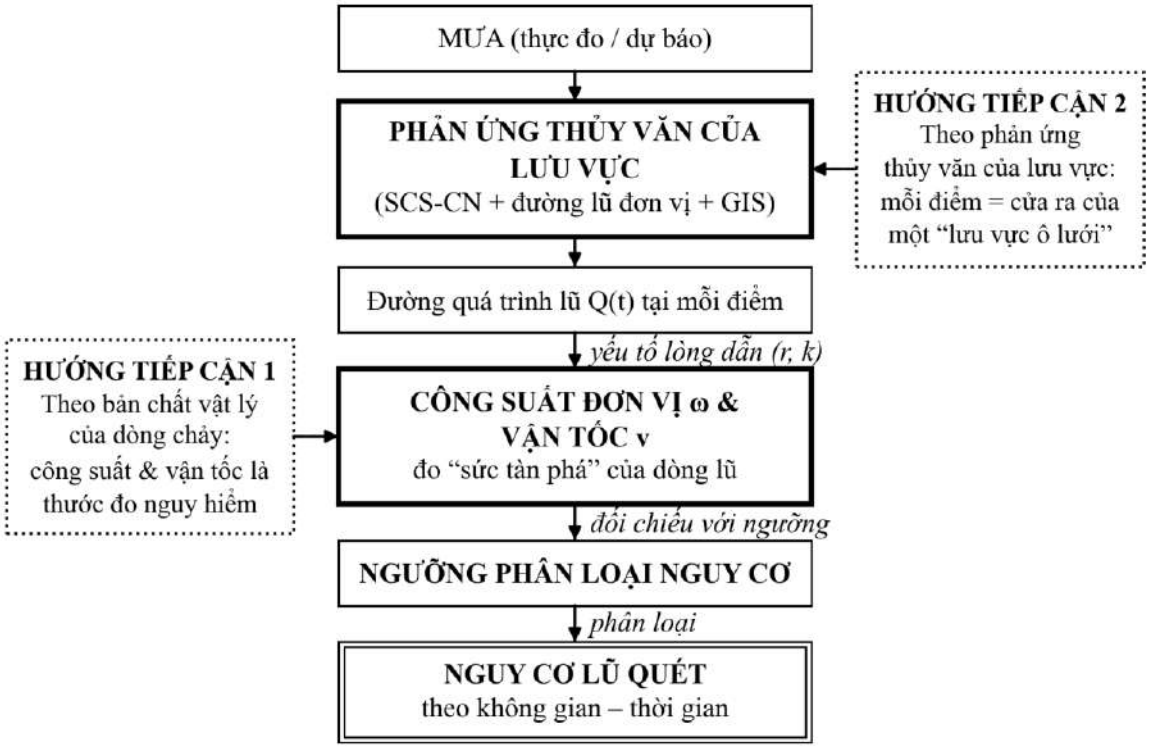
2.1.1. Cách tiếp cận

Luận án tiếp cận bài toán xác định nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc theo hai hướng, tương ứng với hai vấn đề cần giải quyết: (1) xây dựng ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét đặc trưng cho khu vực; và (2) xác định nguy cơ lũ quét đến từng vị trí trên mạng lưới sông suối theo không gian và thời gian.

Hướng giải quyết thứ nhất nhằm giải quyết vấn đề xây dựng ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc. Luận án xuất phát từ quan điểm cho rằng mức độ nguy hiểm của lũ quét không nằm ở lượng mưa hay lưu lượng đơn thuần, mà ở sức tàn phá của dòng chảy – được đặc trưng bởi công suất đơn vị dòng chảy và vận tốc dòng chảy. Để làm được điều này, luận án sẽ phân tích đặc trưng thủy lực của các trận lũ quét đã xảy ra trên khu vực miền núi phía Bắc, thiết lập mối quan hệ giữa công suất đơn vị dòng chảy với khả năng cuốn trôi vật liệu lòng dẫn, từ đó xác lập ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét theo công suất và vận tốc dòng chảy, và kiểm chứng ngưỡng này với một số trận lũ quét thực tế (trình bày tại mục 2.2 và 2.3).

Hướng tiếp cận thứ hai nhằm giải quyết vấn đề xác định nguy cơ lũ quét đến độ phân giải điểm theo không gian và thời gian. Luận án xuất phát từ quan điểm cho rằng lũ quét là kết quả cực đoan của phản ứng thủy văn của một lưu vực cụ thể, do đó nguy cơ tại một vị trí phải được xác định trên cơ sở toàn bộ lưu vực thượng nguồn của vị trí đó, thay vì dựa trên các đặc trưng nội tại của điểm.

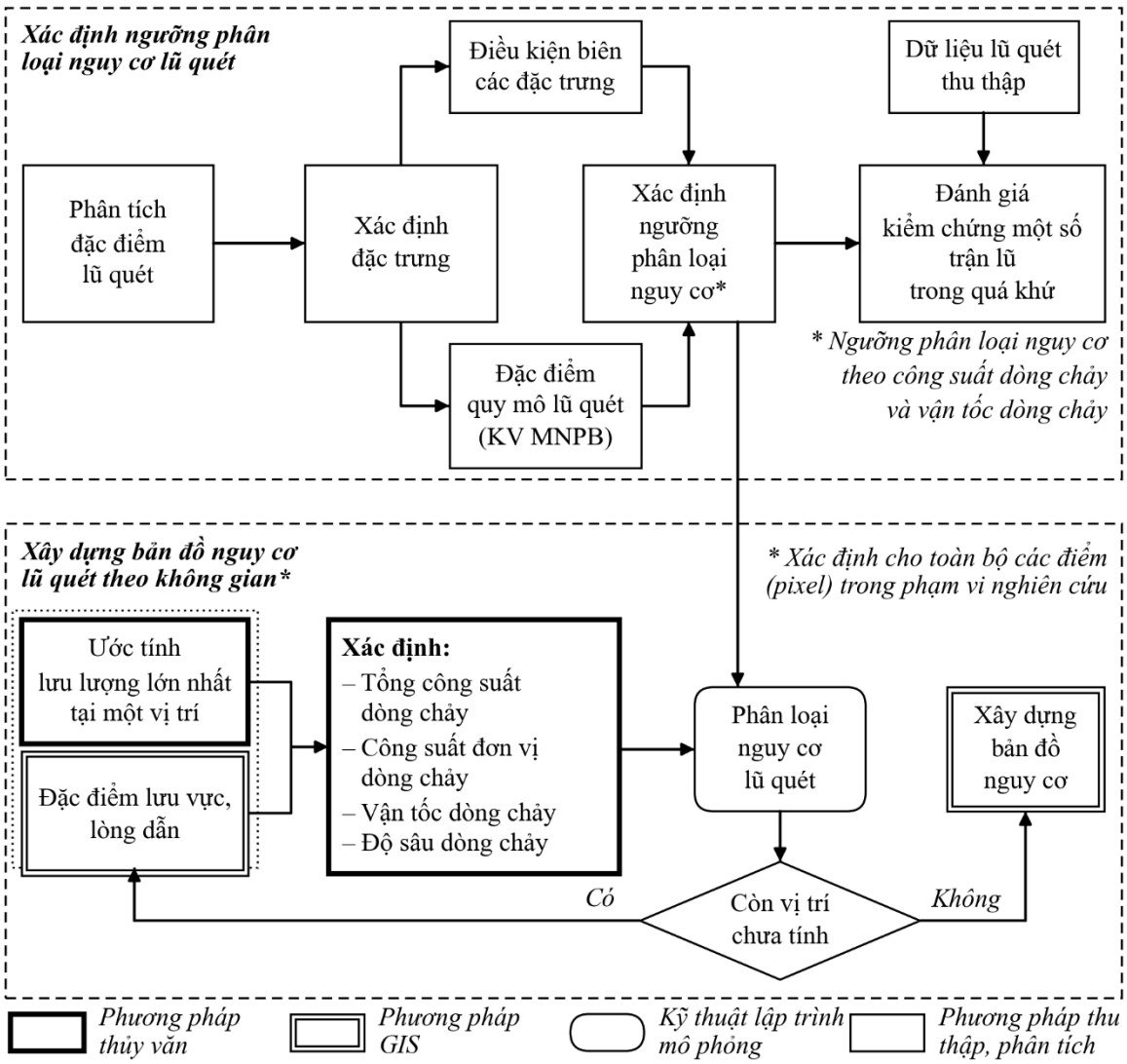
Để giải quyết được hướng thứ hai, luận án xem mỗi điểm trên mạng lưới sông suối là cửa ra của một lưu vực thượng nguồn riêng (nguyên tắc "lưu vực ô lưới"), sử dụng mô hình thủy văn tập trung (SCS-CN kết hợp đường quá trình lũ đơn vị) tích hợp với các thuật toán GIS để mô phỏng quá trình mưa – dòng chảy tại mọi vị trí; đồng thời khái quát hóa hình thái mặt cắt bằng hai chỉ số r và k (02 chỉ số hình thái mặt cắt lòng dẫn) nhằm ước tính các tham số thủy lực (vận tốc, mực nước…) trong điều kiện thiếu số liệu khảo sát. Trên cơ sở đó, ngưỡng phân cấp xác lập ở hướng thứ nhất được áp dụng để xác định nguy cơ lũ quét tại từng điểm theo thời gian. Do mô hình thủy văn tập trung phải được tính lặp cho mọi điểm để tạo ra kết quả dạng phân bố nên khối lượng tính toán rất lớn; vì vậy, hướng tiếp cận này còn chú trọng giải quyết bài toán tốc độ tính toán nhằm đáp ứng yêu cầu vận hành cảnh báo theo thời gian thực (trình bày tại Chương 3). Khung khái niệm và các hướng tiếp cận được thể hiện trong việc xác định nguy cơ lũ quét thể hiện như Hình 2 - 1.



Hình 2 - 1. Khung khái niệm xác định nguy cơ lũ quét

Trên cơ sở đó, 2 nhiệm vụ cần được giải quyết trong luận án. Thứ nhất là xác định được ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét. Trên cơ sở phân tích đặc điểm các trận lũ quét đã xảy ra và xác định các đặc trưng dòng chảy (bao gồm điều kiện ngưỡng của các đặc trưng và đặc điểm quy mô lũ quét khu vực miền núi phía Bắc), ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét theo công suất và vận tốc dòng chảy được xác lập và kiểm chứng với một số trận lũ quét thực tế đã thu thập. Nội dung này được trình bày chi tiết tại mục 2.2 và mục 2.3.

Thứ hai là xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian. Tại mỗi vị trí, trên cơ sở ước tính lưu lượng lũ và các đặc điểm lưu vực, lòng dẫn, các đại lượng tổng công suất, công suất đơn vị, vận tốc và độ sâu dòng chảy được xác định, sau đó đối chiếu với ngưỡng phân cấp để phân cấp nguy cơ lũ quét tại vị trí đó. Quá trình được lặp lại cho từng vị trí cho đến khi quét hết các điểm trong phạm vi nghiên cứu, rồi tổng hợp thành bản đồ nguy cơ lũ quét. Nội dung này được trình bày chi tiết tại kỹ thuật mô phỏng thủy văn và quy trình xác định nguy cơ lũ quét ở Chương 2. Sơ đồ tổng quát theo hai nhiệm vụ trọng tâm được thể hiện như Hình 2 - 2.



Hình 2 - 2. Sơ đồ tổng quát giải quyết bài toán xây dựng bản đồ nguy cơ

2.1.2. Phương pháp nghiên cứu

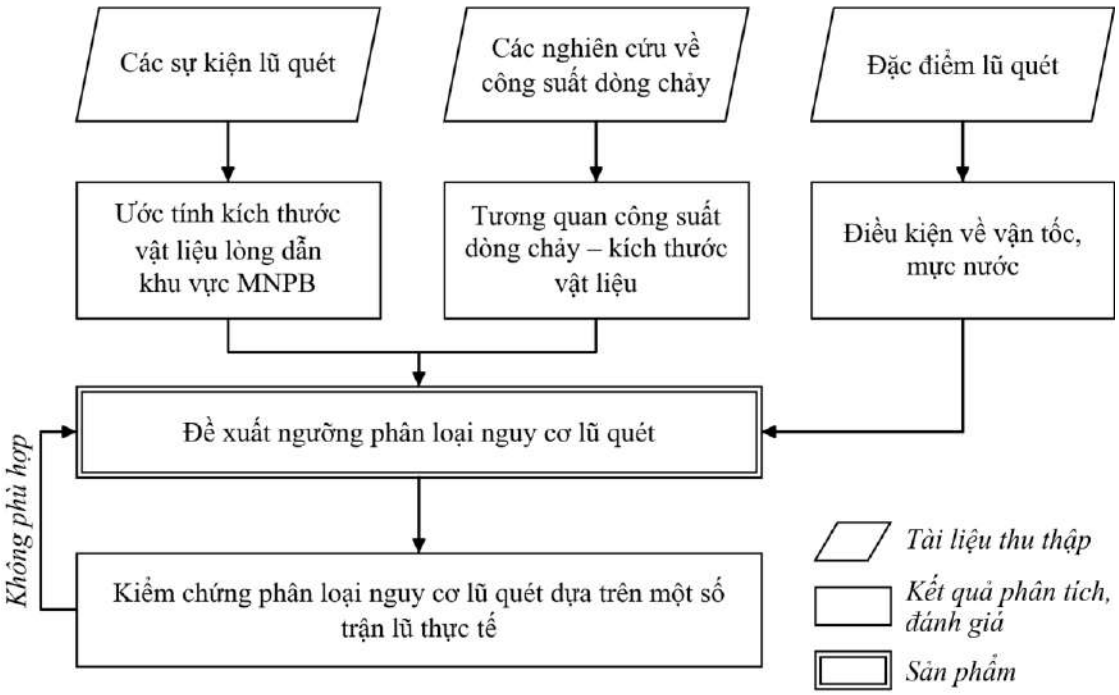
1. Phương pháp thu thập, phân tích tài liệu

Đây là phương pháp phổ biến và thiết yếu trong mọi nghiên cứu, công tác thu thập và phân tích tài liệu là cơ sở nền tảng cho phép thu thập và hiểu rõ lũ quét, bao gồm đặc điểm lũ quét, nguyên nhân và quá trình hình thành…từ đó tìm ra được điểm trọng tâm trong nghiên cứu của mình.

Trên cơ sở đó, việc xác định ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét được thực hiện theo định hướng ban đầu dựa trên công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy, do đó, các nghiên cứu về công suất dòng chảy và các đặc điểm khác của dòng chảy lũ trong các nghiên cứu trong nước và quốc tế được tác giả thu thập, đặc biệt là đối với loại hình lũ quét.

Phương pháp này là phương pháp trọng điểm để xác định ngưỡng phân cấp nguy

cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc trong luận án. Không chỉ kế thừa các nghiên cứu, phát kiến từ những nhà khoa học đi trước, luận án sẽ tiếp tục chỉ ra những đặc trưng riêng của lũ quét nhằm hướng đến xác định ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc. Phương pháp được thể hiện như Hình 2 - 3.



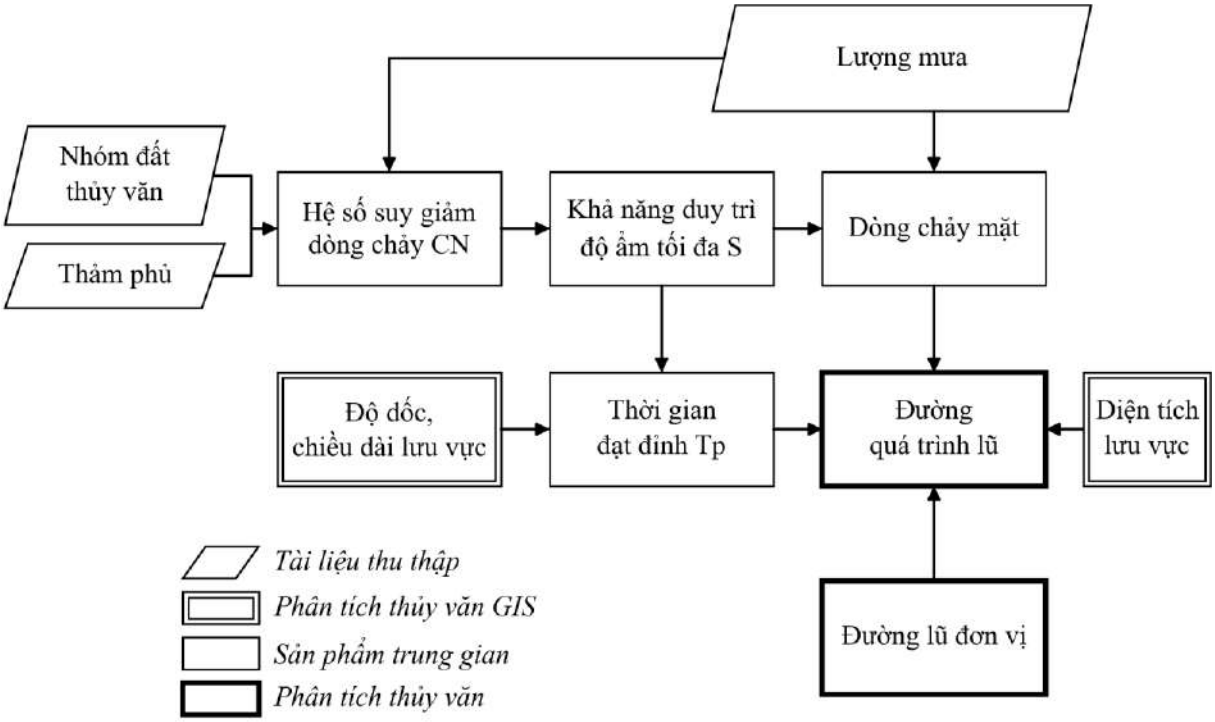
Hình 2 - 3. Phương pháp xác định ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét

Tương quan giữa công suất dòng chảy và khả năng cuốn trôi vật liệu lòng dẫn là cơ sở để xác định ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc. Để làm được điều này, các tài liệu về các trận lũ quét trong quá khứ được sử dụng làm cơ sở phân cấp. Chi tiết của phương pháp này thể hiện ở mục 2.2.1.

Bên cạnh đó, đối với khu vực thí điểm (lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai), tác giả cũng sử dụng phương pháp thu thập và phân tích các số liệu địa không gian phục vụ tính toán thủy văn bao gồm các dữ liệu địa hình, thảm phủ, loại đất/thổ nhưỡng, lượng mưa, làm cơ sở phân tích các tham số thủy văn của lưu vực.

2. Phương pháp mô hình toán thủy văn

Phương pháp mô hình toán thủy văn nhằm ước tính lưu lượng lũ tại một vị trí cửa ra của một lưu vực, lưu lượng lũ là một tham số tỷ lệ thuận với công suất dòng chảy. Trong luận án, phương pháp mô phỏng tổn thất SCS-CN kết hợp đường quá trình lũ đơn vị được sử dụng để xác định lưu lượng của một trận lũ. Hình 2 - 4 thể hiện phương pháp xây dựng đường quá trình lũ trong luận án.



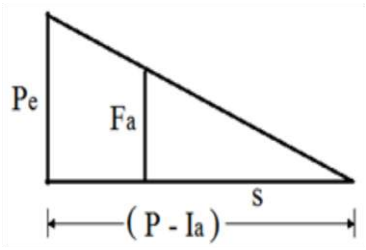
Hình 2 - 4. Phương pháp xây dựng đường quá trình lũ tại một vị trí sử dụng phương pháp mô phỏng tổn thất SCS-CN kết hợp đường quá trình đơn vị

Lý do chính của việc lựa chọn phương pháp mô phỏng này là do phương pháp SCS-CN có ưu thế trong điều kiện thiếu số liệu, đặc biệt phù hợp với thực tế của các lưu vực miền núi phía Bắc Việt Nam. Khác với các mô hình thủy văn tổng hợp như SWAT hay HEC-HMS với hệ thống mô-đun đa dạng và yêu cầu dữ liệu phức tạp, phương pháp SCS-CN được thiết kế trong luận án để phục vụ mục tiêu chuyên biệt là xác định đường quá trình lũ theo hướng tối giản nhưng vẫn đảm bảo bao quát được các yếu tố đặc trưng đầu vào của lưu vực bao gồm lớp phủ thực vật, loại đất và điều kiện độ ẩm kỳ trước.

Việc phát triển phương pháp tính toán đường quá trình lũ dựa trên nền tảng SCS-CN kết hợp đường quá trình đơn vị trong luận án được thiết kế là một bước khởi đầu quan trọng cho việc tích hợp vào các công cụ và hệ thống ứng dụng trong tương lai với ưu điểm kiểm soát mã nguồn và khả năng tùy chỉnh linh hoạt. Đặc biệt là khả năng tùy biến để xử lý tính toán thủy văn tại mọi vị trí trên khu vực nghiên cứu thông qua các thuật toán thủy văn GIS sẽ được trình bày chi tiết trong mục 2.1.3 phía dưới.

Phương pháp SCS-CN dựa trên phương trình cân bằng nước và hai giả thuyết cơ bản:

Giả thiết thứ nhất: tỷ số giữa lớp dòng chảy mặt (P_e) và lớp dòng chảy tiềm năng ($P - I_a$) bằng tỷ số giữa lượng thấm liên tục (F_a) và lượng nước giữ tiềm năng tối đa (S). Thể hiện bằng phương trình như Hình 2 - 5:



Hình 2 - 5. Mô hình tỷ lệ trong giả thuyết thứ nhất

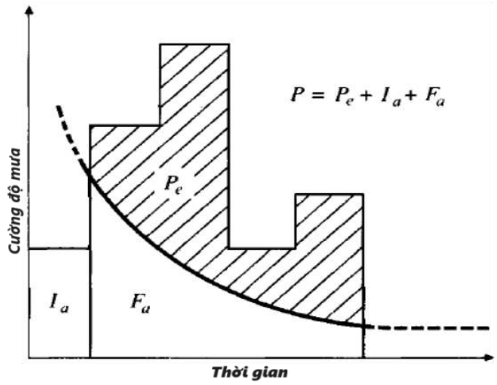
$$\frac{P_e}{P-I_a} = \frac{F_a}{S} \quad (2\text{-}1)$$

Giả thiết thứ hai: tổng của tổn thất ban đầu (I_a – lượng tổn thất không sinh dòng chảy), lượng thấm liên tục (F_a) và lớp dòng chảy mặt (P_e) đúng bằng tổng lượng mưa rơi xuống bề mặt, biểu diễn qua phương trình:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2\text{-}2)$$

Kết hợp phương trình (2-1) và (2-2) ta được:

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad (2\text{-}3)$$



Hình 2 - 6. Các đại lượng tổn thất trong SCS gồm:

I_a – Tổn thất ban đầu;

P_e – Mưa hiệu dụng;

F_a – Lượng thấm liên tục;

P – Tổng lượng mưa.

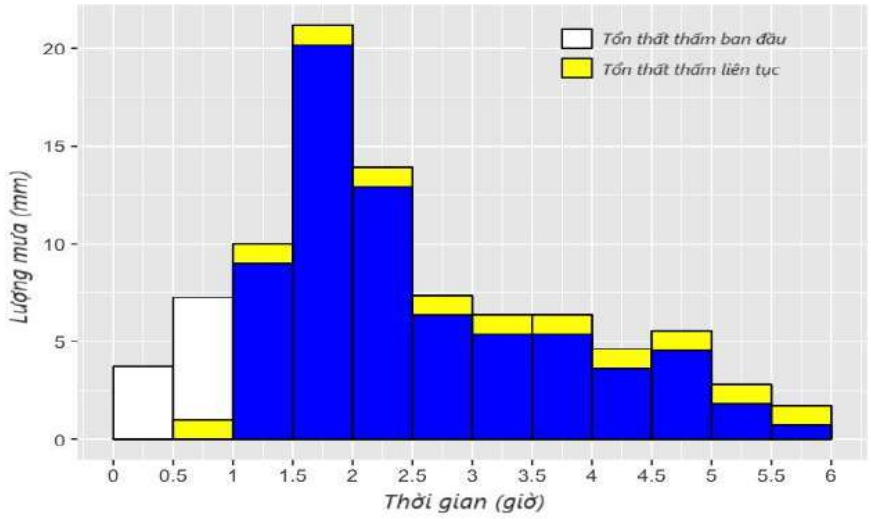
Phương trình (2-3) chính là biểu thức nền tảng của SCS-CN, dùng để suy mưa hiệu dụng (lớp dòng chảy trực tiếp) từ một trận mưa. Các biến số được thể hiện như Hình 2 - 6.

Lượng tổn thất ban đầu I_a có mối quan hệ đến lượng giữ nước tiềm năng tối đa S, với λ được gọi là hệ số tổn thất thấm ban đầu thông qua biểu thức:

$$I_a = \lambda S \quad (2\text{-}4)$$

Hình 2 - 7 minh họa tổn thất thấm ban đầu với I_a = 10 mm và lượng thấm liên tục F_a = 2 mm/giờ. Khi đó lượng mưa giờ đầu (4 + 7 = 11 mm) chỉ vừa đủ bù tổn thất ban đầu 10 mm cộng một bước thấm liên tục (1 mm/nửa giờ). Ở mỗi nửa giờ kế tiếp, mưa tiếp tục bị khấu trừ lượng thấm liên tục (1 mm/nửa giờ); phần dư ra chính là mưa vượt thấm (rainfall excess) của trận mưa. Đại lượng này – còn gọi là mưa hiệu dụng hay lớp

dòng chảy mặt – đóng vai trò quyết định trong việc sinh dòng chảy lũ của lưu vực.



Hình 2 - 7. Minh họa tổn thất thấm ban đầu (Ia) và tổn thất thấm liên tục (Fa)

Phương trình (2-1) là một phương trình khái niệm tỷ lệ và được phân chia thành 2 vùng rõ ràng: Vùng nước mặt (lớp dòng chảy mặt) P_e và nước dưới bề mặt (F_a). Theo phương pháp này, mức độ đóng góp lớp dòng chảy mặt phụ thuộc vào sức chứa của nó (hay nói cách khác, đó là lượng giữ nước tiềm năng của lưu vực S).

Trong SCS-CN, lượng trữ tiềm năng S thay đổi theo loại đất, loại hình sử dụng đất, điều kiện thủy văn và độ ẩm kỳ trước (AMC). Tổn thất ban đầu chỉ diễn ra trong thời gian ngắn, sau đó quá trình thấm tiếp diễn theo thời gian. Phương pháp này đang giả định hệ số tổn thất thấm ban đầu $\lambda = 0{,}2$, tuy nhiên đã có nhiều nghiên cứu khác cho ra kết quả trong khoảng từ 0÷0,3 [136, 137].

Trên thực tế, mỗi lưu vực có một đặc điểm riêng về hệ số tổn thất ban đầu và được xác định dựa trên đặc điểm hình thành dòng chảy trên sông. Mặc dù vậy, đến nay, Cơ quan Bảo tồn Tài nguyên Thiên nhiên Hoa Kỳ (NRCS) vẫn chưa kết luận về việc giữ nguyên hay điều chỉnh giá trị λ và chỉ có công bố bộ CN được phát triển cùng với λ = 0,2. Một thay đổi chính thức sẽ góp phần xây dựng/phát triển bộ số CN mới một cách phù hợp và hiệu quả dựa trên số liệu về quan trắc thấm của lưu vực.

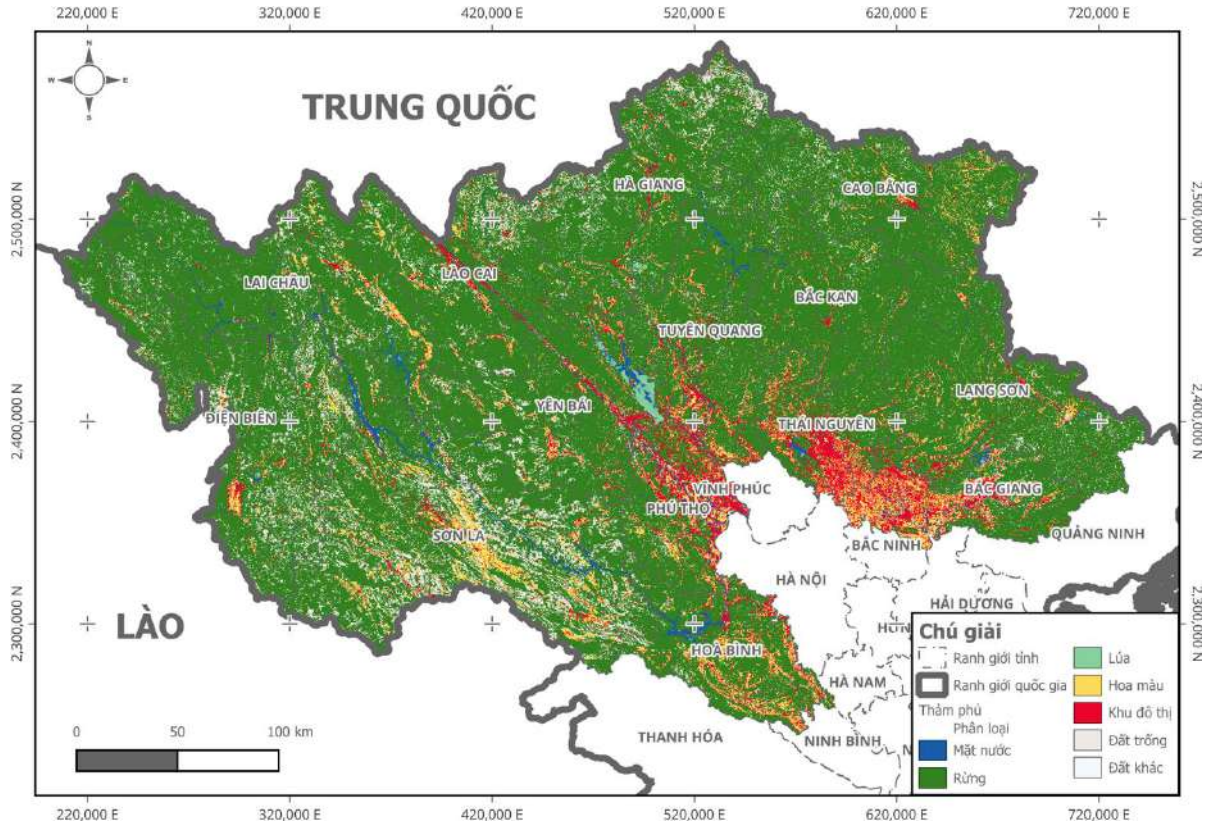
Lượng giữ nước tiềm năng S được xác định bởi công thức:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \qquad (2\text{-}5)$$

Đại lượng S (đơn vị là inch, nếu quy đổi về mm cần nhân hệ số 25,4) là đại lượng có khoảng giá trị từ $0 \le S \le \infty$ và CN có khoảng từ $0 \le CN \le 100$. Trong đó, CN (Curve

Number) là một đại lượng không thứ nguyên biểu thị khả năng thấm nước của bề mặt lưu vực. Đối với các bề mặt không thấm nước, CN có giá trị cực đại là 100, đối với các bề mặt tự nhiên, CN < 100. Mặc dù 0÷100 là khoảng giá trị của CN, các giá trị thực nghiệm của CN nằm trong khoảng 40÷98 [138].

Hệ số CN được xác định bởi 2 yếu tố bao gồm (1) Nhóm đất thủy văn; và (2) thảm phủ. Thông thường, bản đồ thảm phủ được thiết lập dựa trên bản đồ sử dụng đất của địa phương hoặc giải đoán từ ảnh viễn thám. Số liệu về thảm phủ cũng được nhiều nhà nghiên cứu/đơn vị xác định từ ảnh viễn thám cho một khu vực rộng lớn với độ phân giải cao.



Hình 2 - 8. Bản đồ thảm phủ khu vực miền núi phía Bắc năm 2023 của Esri

Esri là một trong những đơn vị hàng đầu về phần mềm hệ thống thông tin địa lý GIS thường xuyên cung cấp bản đồ thảm phủ đã được giải đoán từ ảnh viễn thám hàng năm ở độ phân giải 10m trong các năm gần đây [139] cho phạm vi toàn cầu. Đây là một trong các cơ sở dữ liệu về thảm phủ lớn nhất thế giới với độ phân giải cao từ năm 2017 đến nay. Ở Việt Nam, JAXA cũng cung cấp bản đồ thảm phủ các năm từ 2016 đến nay với độ phân giải 10m [140]. Toàn bộ các dữ liệu của 2 đơn vị này cung cấp đều có nguồn gốc từ ảnh Sentinel. Hình 2 - 8 thể hiện bản đồ thảm phủ năm 2023 của Esri ở độ phân giải 10m.

Sự kết hợp của thảm phủ và nhóm đất thủy văn được thực hiện trong bảng tra dưới

đây thể hiện cách xác định và điều kiện kết hợp của hai dữ liệu có tác động trực tiếp đến dòng chảy.

Bảng 2 - 1. Bảng tra chỉ số CN đối với sử dụng đất nông nghiệp, vùng ngoại ô ứng với điều kiện độ ẩm kỳ trước là trung bình (CN2 và hệ số tổn thất ban đầu λ = 0,2) [141]

Mô tả sử dụng đất	Nhóm đất theo phân loại thủy văn			
	A	B	C	D
Đất trồng trọt				
- Điều kiện 1	72	81	88	91
- Điều kiện 2	62	71	78	81
Bãi cỏ hay bãi chăn thả động vật:				
- Điều kiện xấu	68	79	86	89
- Điều kiện tốt	39	61	74	80
Đồng cỏ: điều kiện tốt	30	58	71	78
Đất rừng:				
- Cây nhỏ, lớp phủ xấu, ít che phủ	45	66	77	83
- Lớp phủ tốt	25	55	70	77
Đất trống, bãi cỏ, công viên, sân gôn, nghĩa địa…				79
- Điều kiện tốt: cỏ phủ ≥ 70%	39	61	74	80
- Điều kiện khá: cỏ phủ từ 50 ÷ 70%	49	69	79	84
Khu thương mại và kinh doanh (85% không thấm)	89	92	94	95
Khu phố công nghiệp (72% không thấm)	81	88	91	93
Khu nhà ở:				
- Đất không thấm: 65%	77	85	90	92
- Đất không thấm: 38%	61	75	83	87
- Đất không thấm: 30%	57	72	81	86
- Đất không thấm: 25%	54	70	80	85
- Đất không thấm: 20%	51	68	79	84
Bãi để xe có lát, mái nhà, đường xe chạy…	98	98	98	98
Phố và đường xá:				
- Có lát với lề đường và rãnh thoát nước	98	98	98	98
- Rải sỏi	76	85	89	91
- Đất	72	82	87	89

Theo NRCS, giá trị CN tra từ nhóm đất thủy văn và hiện trạng sử dụng đất ứng với điều kiện độ ẩm trung bình (AMC II) được ký hiệu là CN2 (Bảng 2 - 1), các điều kiện khác được quy đổi như ở Bảng 2 - 2:

Bảng 2 - 2. Xác định CN và S theo điều kiện độ ẩm AMC [142]

Điều kiện độ ẩm AMC	Lượng mưa 5 ngày trước (mm)		CN quy đổi
	Mùa kém sinh trưởng	Mùa sinh trưởng	
AMCI	< 12,7	< 35,56	$CN = \frac{4{,}2CN_2}{10 - 0{,}0568CN_2}$
AMCII	12,7 ÷ 27,94	35,56 ÷ 53,34	$CN = CN_2$ (tra bảng)

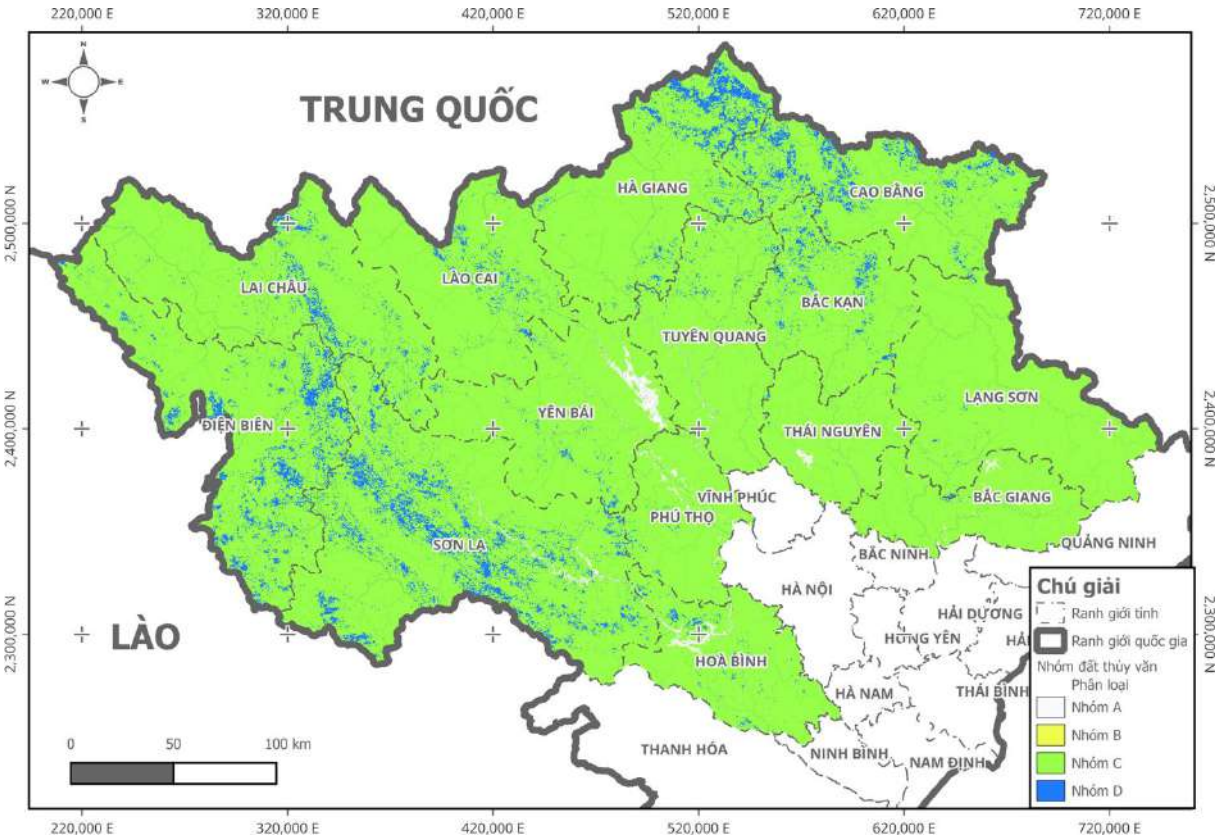
Điều kiện độ ẩm AMC	Lượng mưa 5 ngày trước (mm)		CN quy đổi
	Mùa kém sinh trưởng	Mùa sinh trưởng	
AMCIII	≥ 27,94	≥ 53,34	$CN = \frac{23CN_2}{10 + 0{,}13CN_2}$

Nhóm đất thủy văn bản chất được xây dựng dựa vào bản đồ loại đất, tuy nhiên, loại bản đồ này ở Việt Nam có độ phân giải thấp ở các độ phân giải khác nhau (từ 1:50.000 đến 1:250.000). Có một nguồn dữ liệu khác về nhóm đất thủy văn đã được phân loại ở quy mô toàn cầu là HYSOGs250m ở độ phân giải 250m [143]. Đây là bộ dữ liệu lớn phục vụ mô hình hóa mưa-dòng chảy theo đường cong tổn thất CN dựa trên loại kết cấu đất và độ sâu (OpenLandMap). Dữ liệu này được phân thành 4 nhóm thủy văn A, B, C và D. Trong đó, bảng giá trị có thể được tra cứu như Bảng 2 - 3.

Trong đó, các giá trị 11, 12, 13, và 14 cần được mô tả rõ ràng hơn. Ở giá trị 11, tiềm năng dòng chảy mặt được phân thành 4 loại từ thấp đến rất cao (từ A đến D), tùy thuộc vào mật độ sông/suối (hay khả năng thoát nước bề mặt). Ở giá trị 12, tiềm năng dòng chảy mặt được phân thành 3 loại từ trung bình đến rất cao. Tương tự với các giá trị còn lại.

Bảng 2 - 3. Mô tả dữ liệu HYSOGs ở độ phân giải 250m [143]

Giá trị	Mô tả
1	HSG-A: tiềm năng dòng chảy mặt thấp (>90% cát và <10% đất sét)
2	HSG-B: tiềm năng dòng chảy mặt trung bình (50-90% cát và 10-20% đất sét)
3	HSG-C: tiềm năng dòng chảy mặt cao (<50% cát và 20-40% đất sét)
4	HSG-D: tiềm năng dòng chảy mặt rất cao (<50% cát và >40% đất sét)
11	HSG-A/D: tiềm năng dòng chảy mặt phụ thuộc vào mật độ sông/suối (>90% cát và <10% đất sét)
12	HSG-B/D: tiềm năng dòng chảy mặt phụ thuộc vào mật độ sông/suối (50-90% cát và 10-20% đất sét)
13	HSG-C/D: tiềm năng dòng chảy mặt phụ thuộc vào mật độ sông/suối (<50% cát và 20-40% đất sét)
14	HSG-D/D: tiềm năng dòng chảy mặt phụ thuộc vào mật độ sông/suối (<50% cát và >40% đất sét)



Hình 2 - 9. Phân loại nhóm đất thủy văn theo USGS cho khu vực MNPB

Ở miền núi phía Bắc Việt Nam, nhóm đất thủy văn theo USGS bao gồm chính là 2 loại: Nhóm C và nhóm D. Đây là hai nhóm đất có khả năng hấp thụ nước mưa thấp hơn các nhóm đất A và B. Một số ít nhóm đất B được tìm thấy ở khu vực bãi sông.

Việc xây dựng nhóm đất thủy văn hoàn toàn có thể sử dụng dữ liệu bản đồ đất, tuy nhiên, loại bản đồ này vẫn còn có độ phân giải thấp ở Việt Nam nói chung và khu vực miền núi phía Bắc nói riêng. Trong trường hợp không có đủ dữ liệu, có thể sử dụng bản đồ phân loại nhóm đất theo USGS.

Bản thân các loại nhóm đất thủy văn có tác động đến quá trình thấm và được biểu hiện qua thông số cụ thể về thấm mà cụ thể là tốc độ thấm tối thiểu, được McCuen (1982) [144] trình bày ở bảng sau:

Nhóm đất thủy văn (HSG)	Tốc độ thấm tối thiểu (inch/giờ)
A	0,30 ÷ 0,45
B	0,15 ÷ 0,30
C	0,05 ÷ 0,15
D	0 ÷ 0,05

Lưu lượng đỉnh lũ đơn vị sinh ra bởi trận mưa tại cửa ra lưu vực được xác định theo công thức:

$$q_p = \frac{KxAxP_e}{T_p} \quad (2\text{-}6)$$

Trong đó: qp là lưu lượng đỉnh lũ (m^3/s); K là hệ số; A là diện tích lưu vực (m^2); P_e là lớp dòng chảy (m); T_p là thời gian lũ đạt đỉnh kể từ khi bắt đầu mưa (giây).

Hệ số K được xác định bằng công thức:

$$K = \frac{2}{1+\frac{T_r}{T_p}} \quad (2\text{-}7)$$

Với T_r là thời gian nước rút (nhánh xuống) của đường quá trình đơn vị, tính từ đỉnh lũ đến khi kết thúc dòng chảy trực tiếp. Tỷ số T_r/T_p được xác định bằng 1,67 và K = 0,75. Hệ số này có thể được hiệu chỉnh dựa trên quan trắc thực tế trận mưa trong quá khứ.

T_p là thời gian đạt đỉnh lũ kể từ khi bắt đầu mưa và được xác định bằng công thức:

$$T_p = \frac{l^{0,8}(S+1)^{0,7}}{1.900Y^{0,5}} \quad (2\text{-}8)$$

Với Tp được đo bằng giờ; l là chiều dài dòng chảy được xác định bằng việc phân tích GIS được đo bằng ft (cần quy đổi đơn vị từ m sang ft); Y là độ dốc trung bình của lưu vực (%); và S là khả năng trữ nước tối đa của lưu vực ô lưới đã được xác định.

Đường quá trình đơn vị là một mô hình tuyến tính đơn giản mà có thể sử dụng để xây dựng các đường quá trình dòng chảy trong sông tạo ra bởi một lượng mưa quá thấm (vượt ngưỡng) bất kỳ. Lý thuyết của mô hình này gắn liền với các giả thiết cơ bản như sau [141]:

Mưa vượt ngưỡng có cường độ mưa không đổi trong suốt thời gian mưa hiệu quả.

Giả thiết này nhằm lựa chọn những trận mưa để phân tích có đặc điểm là thời gian mưa ngắn và chỉ có những trận mưa ngắn như vậy mới thực sự tạo được cường độ mưa vượt ngưỡng mạnh và không đổi, cho ra một đường quá trình lũ đỉnh đơn rõ rệt nhất.

Mưa vượt ngưỡng phân bố đều trên toàn diện tích lưu vực.

Giả thiết này hàm ý rằng mô hình đường quá trình lũ đơn vị sẽ rất hạn chế trong việc áp dụng tính toán thủy văn đối với các lưu vực quá lớn vì điều đó khó đảm bảo lượng mưa được rải đều trên toàn lưu vực. Nếu cần tính toán cho các lưu vực lớn, cần chia nhỏ lưu vực sao cho mưa có khả năng phủ đều.

Thời gian chảy đáy của đường quá trình dòng chảy trực tiếp tạo ra bởi lượng mưa vượt ngưỡng trong cùng một khoảng thời gian mưa là không đổi.

Về bản chất, thời gian chảy đáy của đường quá trình dòng chảy trực tiếp không có

định và thời gian này thường ngắn nếu dòng chảy trực tiếp chỉ bao gồm dòng chảy sát mặt và sẽ kéo dài khá lớn nếu bao gồm cả dòng chảy sát mặt. Như vậy, phương pháp này nhằm hướng tới một điều kiện là lưu lượng trên sông sẽ được hình thành bởi 2 thành phần chính bao gồm dòng chảy trực tiếp và dòng chảy cơ sở (baseflow).

Độ lớn của các đường quá trình dòng chảy trực tiếp tỷ lệ thuận với tổng lượng dòng chảy trực tiếp của mỗi đường quá trình.

Giả thiết này chính là nguyên tắc xếp chồng đã trình bày ở trên, trong thực tế, các số liệu thủy văn thường thể hiện rõ đặc điểm biến đổi không tuyến tính. Tuy nhiên nguyên tắc này giả thiết sự kết hợp gần đúng vì nó thỏa mãn nhiều trường hợp tính toán thực tiễn.

Đường quá trình dòng chảy tạo ra bởi một trận mưa hiệu quả cho trước phản ánh các đặc trưng không thay đổi của lưu vực.

Như vậy, giả thiết này nhằm làm sáng tỏ rằng với cùng một lượng mưa hiệu quả được sinh ra, tổng lượng dòng chảy trên sông là không đổi. Đây cũng là nguyên tắc của đường quá trình lũ đơn vị, còn gọi là nguyên tắc bất biến theo thời gian.

a. Xác định lưu lượng dòng chảy mặt

Lưu lượng dòng chảy trực tiếp được sinh ra bởi lượng mưa hiệu quả còn gọi là lớp dòng chảy mặt. Mỗi đơn vị mưa hiệu dụng ứng với một đường quá trình đơn vị của lưu vực. Ở thời điểm n, lưu lượng trực tiếp Q_n liên hệ với mưa vượt thấm P_m và đường đơn vị U qua công thức:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \le M} P_m U_{n-m+1} \quad (2\text{-}9)$$

Từ các cặp Q_n và P_m có thể giải ra U tương ứng. Như vậy, dựa vào một trận lũ đã biết – sau khi tách dòng chảy cơ sở để có dòng chảy trực tiếp và mưa vượt thấm hay mưa hiệu quả – ta khôi phục được U, tức đường quá trình lũ đơn vị. Bài toán này cũng có thể giải bằng phép tính ma trận như sau:

$$[P][U] = [Q] \rightarrow [U] = [P]^{+}[Q] = ([P]^{T}[P])^{-1}[P]^{T}[Q] \quad (2\text{-}10)$$

Khi đã xác định được lớp dòng chảy mặt P_e của một trận mưa và đường quá trình lũ đơn vị của lưu vực (từ các trận mưa trong quá khứ), có thể dễ dàng xác định được đường quá trình lũ bằng công thức:

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \le M} P_m U_{n-m+1} + Baseflow \quad (2\text{-}11)$$

b. Lưu lượng dòng chảy cơ sở

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp xác định dòng chảy cơ sở theo Eckhardt (2008) [145] theo công thức:

$$b_k = \frac{(1-BFI_{max})\alpha b_{k-1}+(1-\alpha)BFI_{max}y_k}{1-\alpha BFI_{max}} \quad (2\text{-}12)$$

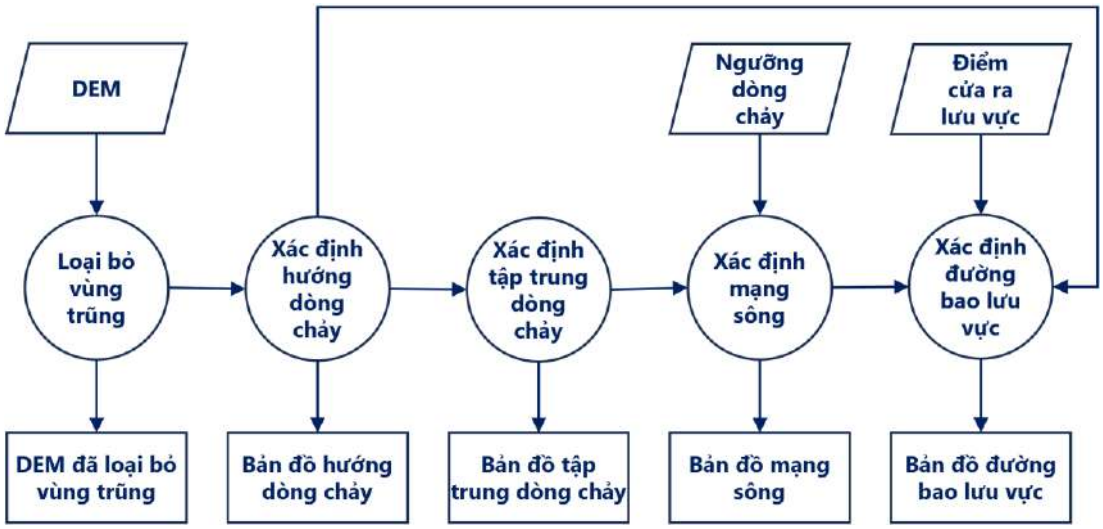
Hoặc công thức:

$$b_k = \alpha b_{k-1} + \frac{(1-\alpha)BFI_{max}}{1-BFI_{max}} f_k \quad (2\text{-}13)$$

Trong đó, b_k là dòng chảy cơ sở tại thời điểm k, f_k là dòng chảy mặt tại thời điểm k và y_k là tổng dòng chảy tại thời điểm k; α là hệ số suy giảm dòng chảy và BFImax là chỉ số dòng chảy cơ bản tối đa được phân tích theo Eckhardt (2008) [145], luận án sử dụng kế thừa thuật toán đã được Xie và cộng sự (2020) phát triển [146] và công bố tại https://github.com/xiejx5/baseflow để xác định dòng chảy cơ sở.

3. Phương pháp GIS

Phương pháp GIS về bản chất là các thuật toán để xử lý các đối tượng không gian bao gồm các đối tượng raster và vector. Trong thủy văn phương pháp GIS cung cấp các công cụ/thuật toán để phân tích và quản lý tài nguyên nước, bằng cách phân tích lưu vực và đặc điểm lưu vực, GIS giúp hiểu được cách dòng chảy mưa rơi diễn ra ở các khu vực khác nhau và quá trình hình thành lũ từ các lưu vực khác nhau [147].



Hình 2 - 10. Phân tích GIS trong thủy văn

Hầu hết, các công cụ GIS như ArcGIS, QGIS … đều có chức năng phân tích thủy văn dựa vào địa hình. Người dùng có thể lựa chọn một điểm cửa ra của lưu vực (outlet) và tiến hành phân tích, từ đó xác định đường bao lưu vực và các đặc điểm lưu vực.

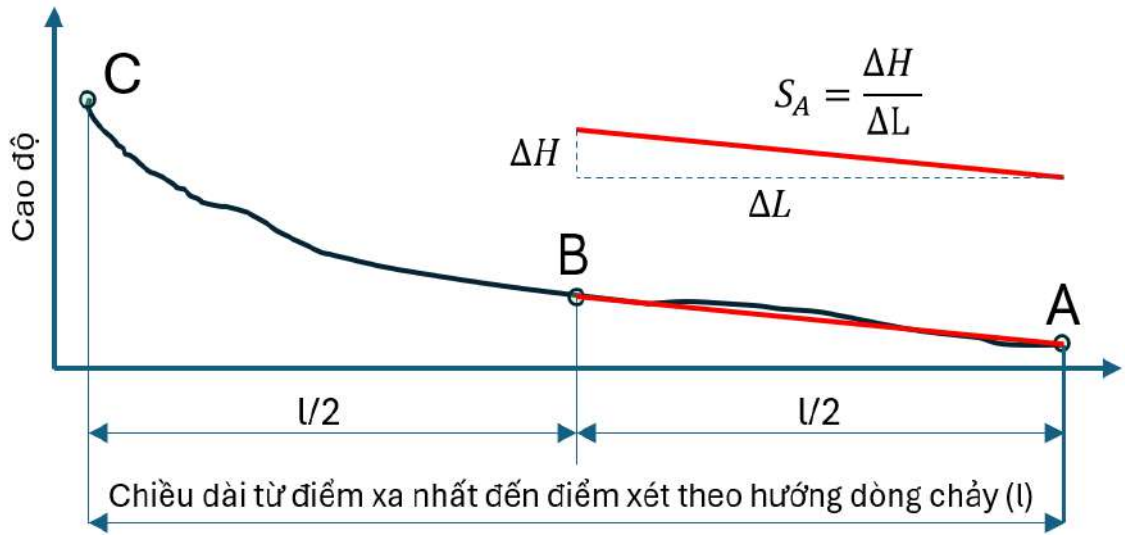
Trong luận án, các thuật toán GIS được kế thừa và sử dụng để tính toán các tham số thủy văn bao gồm độ dốc lưu vực, chiều dài dòng chảy, độ dốc lòng dẫn và các tham số tổng hợp khác. Ngoài ra, lượng mưa quan trắc là ở các trạm dưới dạng điểm trong không gian, để có thể mô hình hóa trong bài toán tham số phân bố của thủy văn cần áp dụng những thuật toán nội suy tương ứng để mô phỏng, xác định lượng mưa tương ứng

với mỗi lưu vực và phạm vi ảnh hưởng của chúng.

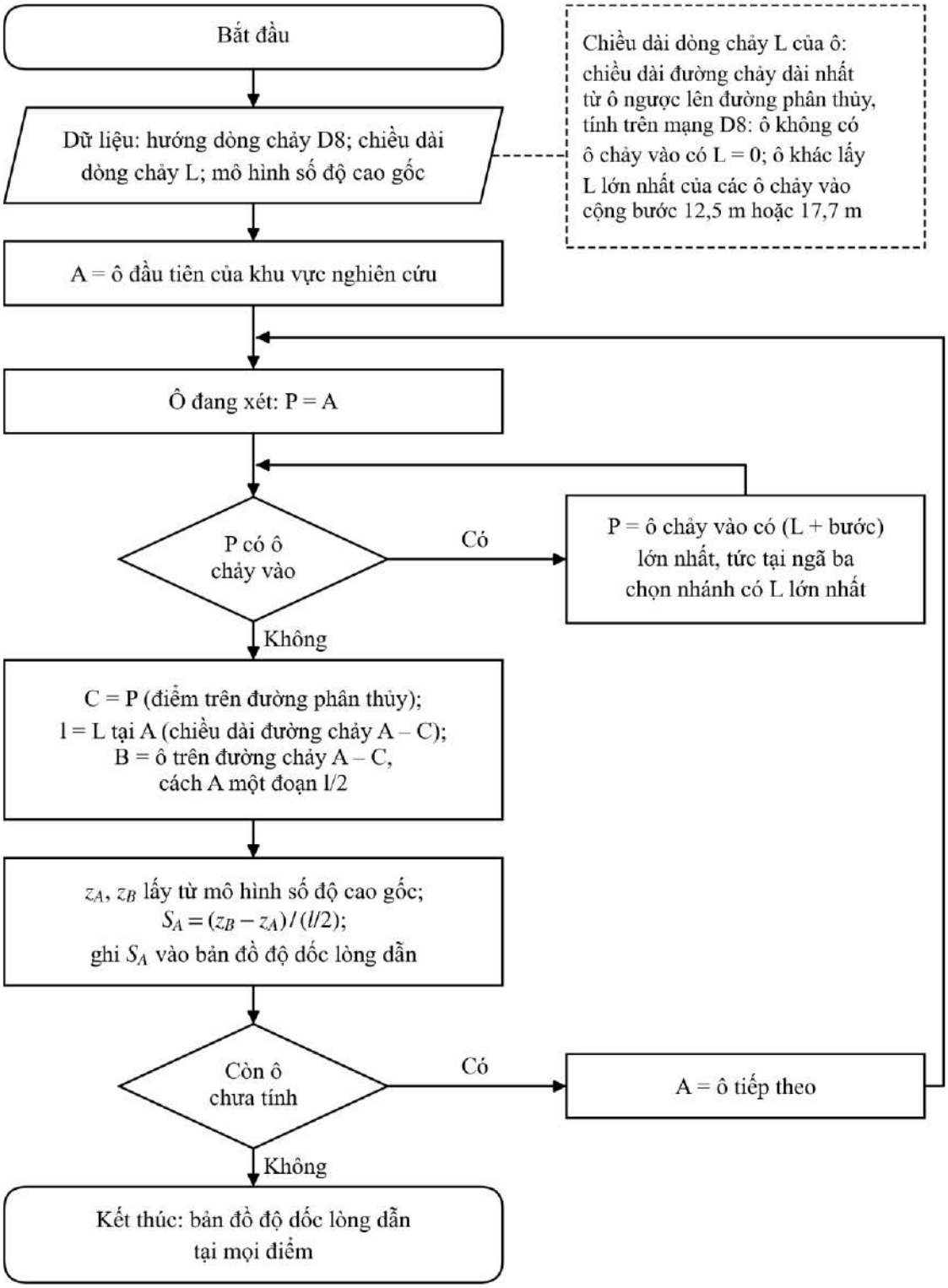
Ngoài quá trình phân tích GIS trong thủy văn, phương pháp phân tích GIS để xây dựng bản đồ độ dốc lòng dẫn được sử dụng xác định công suất dòng chảy. Các khu vực miền núi có sự biến đổi khá lớn, tuy nhiên với địa hình có độ phân giải thấp (hoặc các sản phẩm từ ảnh vệ tinh) có thể gây ra sai lệch đáng kể về độ dốc lòng dẫn tại các vị trí tính toán.

Khi áp dụng các kỹ thuật loại bỏ điểm trũng địa hình và các điểm lồi cục bộ trong thủy văn, địa hình mới là địa hình đã bị biến đổi và luôn tuân thủ nguyên tắc điểm phía dưới hạ lưu sẽ có cao độ thấp hơn điểm phía thượng lưu. Tuy nhiên, sản phẩm này không phù hợp để tính toán độ dốc do có sự biến đổi mạnh về địa hình.

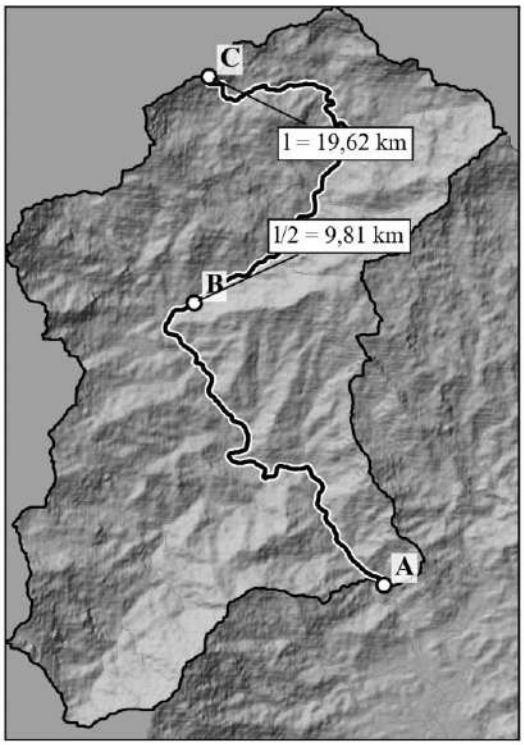
Để có bản đồ độ dốc lòng dẫn tại mọi vị trí, luận án áp dụng cách tính độ dốc theo đường chảy dài nhất của lưu vực. Luận án kế thừa nguyên tắc tính độ dốc trên một đoạn của lòng chính và bỏ phần đầu nguồn dốc, đã được Benson (1962) áp dụng với độ dốc giữa hai điểm ở 10 % và 85 % chiều dài lòng chính vì phần đầu nguồn dốc có thể làm độ dốc lệch khỏi tỷ lệ với lượng nước mà phần này đóng góp [148], và vận dụng với đoạn từ vị trí cần tính (A) tới điểm ở 50 % chiều dài đường chảy dài nhất. Cụ thể, từ A tìm điểm xa nhất theo dòng chảy trên đường phân thủy (điểm C) và chiều dài đường chảy A – C (l); điểm B nằm trên đường chảy, cách A một đoạn l/2; độ dốc lòng dẫn tại A là độ dốc đoạn AB (minh họa như hình dưới đây). Cách tìm điểm C, điểm B và tính độ dốc lòng dẫn cho mọi điểm thể hiện ở sơ đồ thuật toán ngay sau hình này, kèm theo là ví dụ tại một điểm trên suối Nậm Bắt.



Hình 2 - 11. Phương pháp xác định độ dốc lòng dẫn tại điểm A



Hình 2 - 12. Sơ đồ thuật toán xác định độ dốc lòng dẫn tại mọi điểm



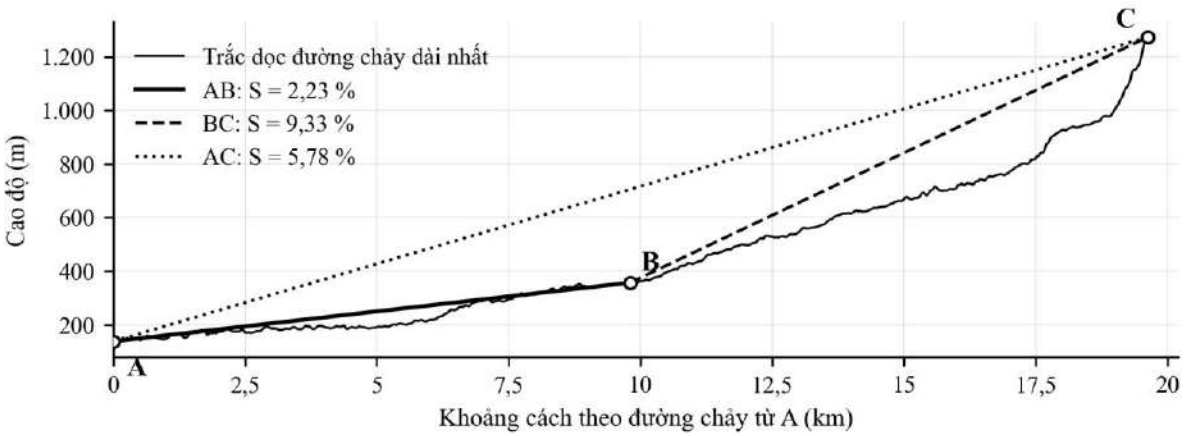
Số liệu tại điểm A (lưu vực 62,68 km²)

Đường chảy dài nhất A – C: l = 19,62 km
B cách A một đoạn l/2 = 9,81 km
Cao độ: A 138 m; B 357 m; C 1.273 m
Độ dốc AB: 2,23 %
Độ dốc BC: 9,33 %
Độ dốc AC: 5,78 %

Độ dốc lòng dẫn tại A lấy bằng
độ dốc đoạn AB: S = 2,23 %

Cách xác định

Từ A, dựa vào bản đồ hướng dòng chảy D8 và bản đồ chiều dài dòng chảy L, dò ngược dòng; tại mỗi ngã ba chọn nhánh có L lớn nhất, tới ô không còn ô chảy vào là điểm C trên đường phân thủy (l = L tại A); B là ô trên đường chảy A – C, cách A một đoạn l/2.



Hình 2 - 13. Ví dụ xác định độ dốc lòng dẫn tại điểm A trên suối Nậm Bắt (lưu vực 62,68 km²)

Công suất dòng chảy tại A phụ thuộc độ dốc của lòng dẫn quanh A. Đoạn BC gồm khe đầu nguồn và sườn dốc gần đường phân thủy, dốc hơn nhiều so với lòng dẫn tại A, nên không đại diện cho dòng chảy tại A; ảnh hưởng của phần đầu nguồn được phản ánh trong lưu lượng tại A thông qua độ dốc bình quân lưu vực trong công thức thời gian trễ (2-8). Về chiều dài đoạn lấy độ dốc tại một mặt cắt, các nghiên cứu sử dụng nhiều mức khác nhau, như 0,5 km [149] hay 200 m, 1 km và 4 km [150]. Đoạn AB dài bằng một nửa đường chảy dài nhất nên thay đổi theo quy mô lưu vực, đồng thời giảm ảnh hưởng của sai số cao độ trên mô hình số độ cao [151]. Do độ dốc lòng dẫn thường giảm dần về hạ lưu [149], độ dốc đoạn AB thường lớn hơn một chút so với độ dốc ngay tại A, và công suất dòng chảy tính theo độ dốc này thiên về an toàn trong cảnh báo.

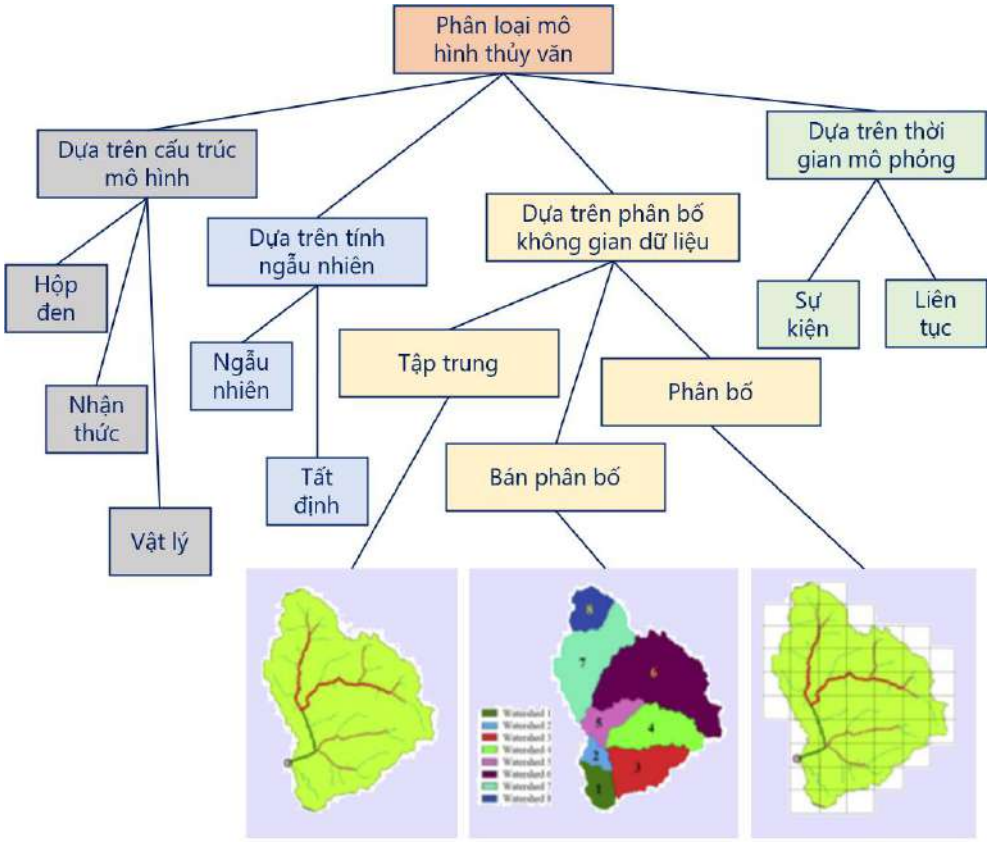
2.1.3. Kỹ thuật sử dụng

Kỹ thuật sử dụng giúp thực hiện hóa các phương pháp một cách chi tiết và phù hợp để đạt được kết quả. Các kỹ thuật tốt sẽ giúp rút ngắn thời gian thực hiện cũng như nâng cao độ tin cậy của các kết quả. Trong luận án, kỹ thuật lập trình và các công cụ bổ trợ chủ yếu được sử dụng để thực hiện.

Các phương pháp phân tích và mô phỏng đều trải qua các công đoạn thực hiện một cách rời rạc, lập trình giúp hỗ trợ tác giả thực hiện quy trình tính toán, xác định nguy cơ lũ quét thành một chuỗi liên tục thông qua các thuật toán kết nối với nhau, từ đó đưa ra kết quả cuối cùng. Trong luận án, ngôn ngữ chính sử dụng là Python để tự động hóa các công đoạn, thuật toán trong tính toán nguy cơ lũ quét, đồng thời cũng là công cụ chính để trực quan hóa số liệu nghiên cứu, xử lý các dữ liệu không gian và các dữ liệu theo thời gian.

1. Kỹ thuật mô phỏng thủy văn

Kỹ thuật mô phỏng thủy văn cho phép mô phỏng quá trình mưa – dòng chảy từ đầu vào là lượng mưa và các yếu tố địa không gian. Với tham vọng có thể xác định được nguy cơ lũ quét tại mọi vị trí trên khu vực nghiên cứu đồng nghĩa với việc phải xác định được lưu lượng lớn nhất tại mọi vị trí tương ứng với lượng mưa là yếu tố đầu vào của mô hình thủy văn, cần một kỹ thuật xử lý để có thể giải quyết được bài toán này.

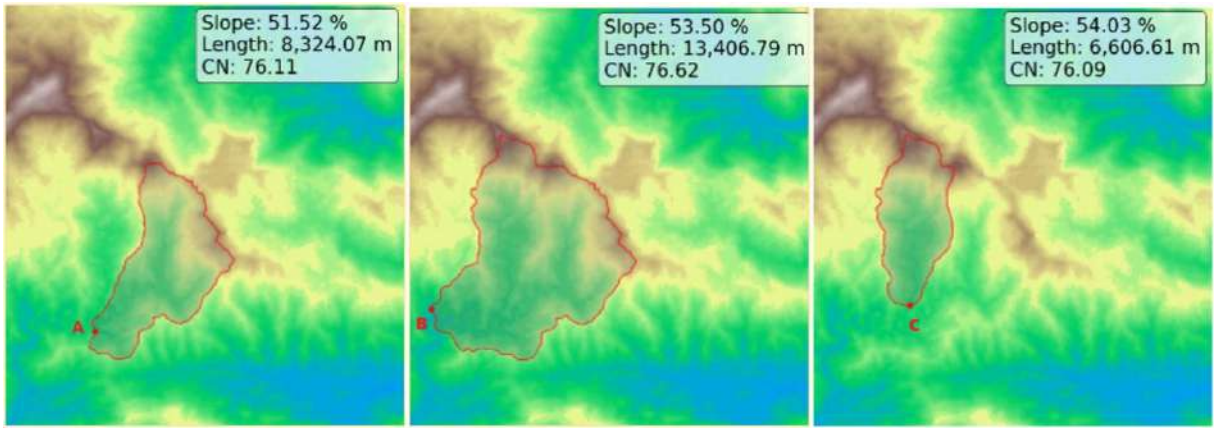


Hình 2 - 14. Phân loại mô hình thủy văn [152]

Có nhiều loại mô hình thủy văn khác nhau, trong đó khi phân theo phân bố không gian dữ liệu, có 3 loại chính (thể hiện trong Hình 2 - 14) bao gồm:

- Mô hình thông số tập trung (lumped models): là mô hình coi toàn bộ lưu vực là một đơn vị duy nhất, tính trung bình các thông số trên toàn bộ lưu vực mà không xem xét đến sự thay đổi về mặt không gian, các phần diện tích thuộc lưu vực đề có hành vi tương tự nhau liên quan đến các đặc trưng thủy văn đồng nhất [153] [154].
- Mô hình phân bố (distributed models): mô hình xem xét sự biến đổi không gian của các quá trình thủy văn trên toàn bộ lưu vực bằng cách sử dụng các tập dữ liệu không gian chi tiết, mỗi ô lưới trong mô hình có thể có các đặc điểm riêng cho phép biểu diễn chi tiết hơn các quá trình thủy văn [154].
- Mô hình bán phân bố (semi-distributed models): Là mô hình kết hợp các yếu tố của cả mô hình tập trung và phân tán bằng cách chia lưu vực thành nhiều tiểu lưu vực đồng nhất, có các hành vi về thủy văn tượng tự, cho phép có sự biến đổi về mặt không gian trong khi vẫn đơn giản hóa mô hình tổng thể [153].

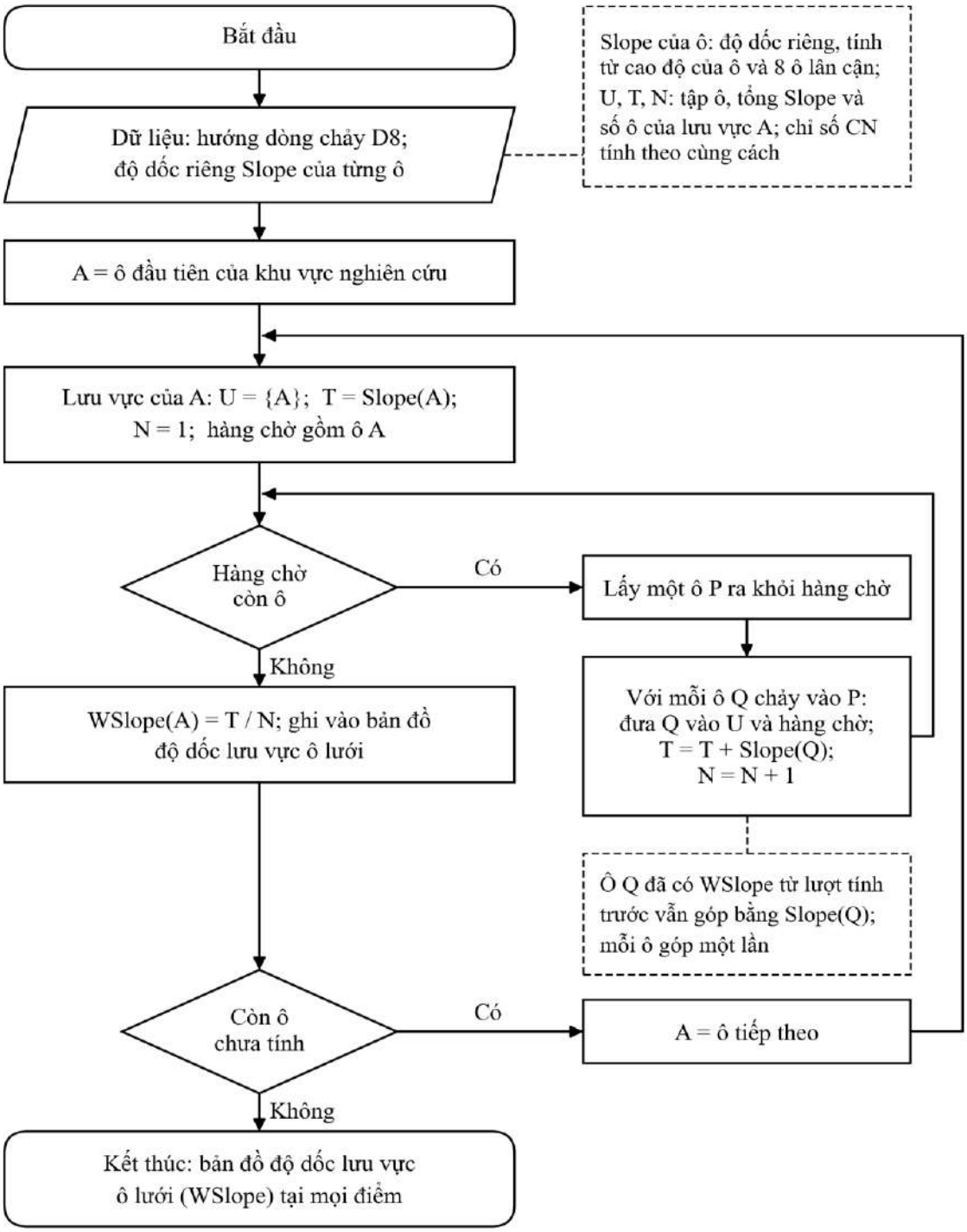
Với mục tiêu mô phỏng được lưu lượng cho mọi vị trí trên khu vực nghiên cứu, mỗi ô lưới được xem xét là cửa ra của một lưu vực. Khi đó, mỗi giá trị của ô lưới (như độ dốc, hệ số CN, chiều dài dòng chảy…) đều được xem xét là giá trị bình quân của các ô lưới thuộc lưu vực đó (các ô lưới thuộc lưu vực là các ô lưới có đường đi theo hướng dòng chảy đi qua ô lưới xem xét).



Hình 2 - 15. Mô phỏng thủy văn cho từng điểm độc lập trong nghiên cứu

Như thể hiện ở Hình 2 - 15, khi xác định lưu lượng tại điểm A, điểm A được xem xét là cửa ra của lưu vực (hình bên trái), lưu vực này có các đặc trưng riêng về thủy văn và lượng mưa dựa trên các điểm (các pixels) thuộc lưu vực A. Các đặc trưng này là giá trị bình quân của toàn bộ lưu vực và được lưu trữ tại điểm cửa ra A. Tương tự, khi xét đến điểm B, một quy trình lặp lại để xem xét điểm B là cửa ra của một lưu vực (hình giữa), điểm B cũng có các đặc trưng riêng về thủy văn và lượng mưa dựa trên các điểm

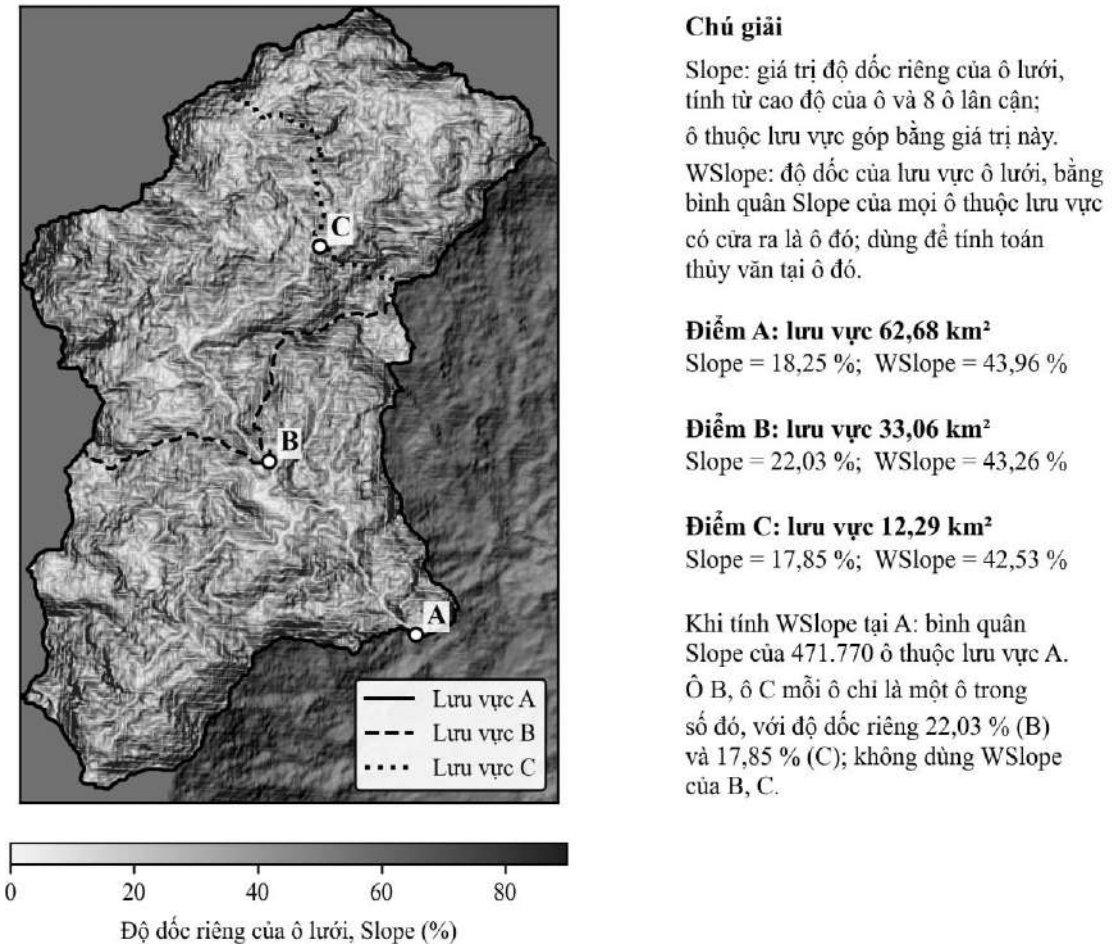
thuộc lưu vực B theo giá trị bình quân. Mặc dù lưu vực B là lưu vực bao trùm lưu vực A và lưu vực C, quy trình tính toán vẫn diễn ra độc lập. Tiếp tục lặp lại với điểm C và các điểm khác cho đến khi hết toàn bộ các điểm trên khu vực nghiên cứu. Như vậy, mỗi điểm tính toán đều được xem là một lưu vực, có thể lưu vực này chỉ có diện tích là 01 ô lưới, cũng có thể là toàn bộ khu vực nghiên cứu. Trong luận án, cụm từ "lưu vực ô lưới" được sử dụng để diễn đạt nguyên tắc này. Chi tiết thuật toán xác định cụ thể lưu vực cho từng điểm thể hiện trong phụ lục I.



Hình 2 - 16. Sơ đồ thuật toán xác định độ dốc lưu vực ô lưới tại mọi điểm

Theo nguyên tắc này, mỗi ô lưới mang hai loại giá trị: giá trị riêng của ô (như độ dốc riêng Slope, tính từ cao độ của ô và 8 ô lân cận) và giá trị của lưu vực ô lưới (như độ dốc lưu vực WSlope, bằng bình quân giá trị riêng của mọi ô thuộc lưu vực có cửa ra là ô đó). Lưu lượng tại một điểm được tính theo giá trị của lưu vực ô lưới tại điểm đó. Cách xác định độ dốc lưu vực ô lưới cho mọi điểm thể hiện ở sơ đồ thuật toán dưới đây; chỉ số CN của lưu vực ô lưới xác định theo cùng cách.

Hình dưới đây là ví dụ tại ba điểm lồng nhau trên suối Nậm Bắt, A ở hạ lưu, B và C lần lượt ở thượng lưu: khi tính tại A, ô B và ô C góp vào bình quân bằng độ dốc riêng như mọi ô khác của lưu vực A; độ dốc lưu vực ô lưới của B, C chỉ dùng cho tính toán tại B, tại C.



Hình 2 - 17. Độ dốc riêng của ô lưới (Slope) và độ dốc lưu vực ô lưới (WSlope) tại ba điểm lồng nhau trên suối Nậm Bắt

Kỹ thuật này giúp tính toán nhanh do sử dụng nguyên tắc tính toán của mô hình tập trung trong khi đưa ra kết quả ở mọi vị trí, việc tính toán đồng thời có thể được sử dụng khi tận dụng thêm sức mạnh tính toán đa luồng hiện nay.

2. Kỹ thuật trực quan hóa dữ liệu

Trực quan hóa dữ liệu giúp diễn đạt các kết quả nghiên cứu của luận án dưới dạng

hình ảnh, biểu đồ một cách phù hợp với từng loại dữ liệu. Các thư viện trực tiếp trong ngôn ngữ Python như Matplotlib và Seaborn được sử dụng để mô phỏng trực quan dữ liệu nghiên cứu của luận án.

2.2. Xác định ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc

2.2.1. Xác định ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét

Luận án này thể hiện quan điểm xuyên suốt: để hình thành được lũ quét, sự tích tụ năng lượng dòng chảy phải đạt đến mức độ nào đó với vận tốc đủ lớn. Quan điểm này nhằm thể hiện dòng chảy tại các khu vực sườn núi, đỉnh núi hay trên mái nhà là không đủ khả năng sinh lũ quét do sự tích tụ năng lượng dòng chảy chưa đủ, ngược lại, mặc dù có tổng công suất dòng chảy lớn trên các sông lớn, vận tốc dòng chảy lại không đảm bảo điều kiện hình thành lũ quét. Ngay trong khái niệm về lũ quét sườn dốc, sự "tích tụ" dòng chảy mặt được nhấn mạnh trong việc xác định lũ quét. Để được gọi là lũ quét cần đảm bảo hai yếu tố bao gồm công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy.

Công suất dòng chảy trong lũ quét là một yếu tố quan trọng, quyết định mức độ tàn phá và khả năng gây biến đổi địa hình của dòng chảy [4]. Lũ quét thường xảy ra rất nhanh với lưu lượng dòng chảy lớn, kéo theo công suất dòng chảy rất cao, có khả năng cuốn trôi, xói mòn và vận chuyển một lượng lớn trầm tích [6]. Mặc dù vậy, hiện nay chưa có ngưỡng phân cấp nào một cách khái quát về công suất dòng chảy cho lũ quét mà chủ yếu là nghiên cứu về ngưỡng cuốn trôi vật liệu lòng dẫn (xói mòn lòng dẫn). Ví dụ như Magilligan (1992) [6] đã đề xuất ngưỡng ứng suất cắt (shear strees) là 100 N/m² hay ngưỡng công suất đơn vị dòng chảy (Unit stream power) 300 W/m² là ngưỡng gây ra xói mòn lòng dẫn hay một số nhà khoa học [28, 155] đã xây dựng mối tương quan giữa kích thước vật liệu lòng dẫn và công suất đơn vị dòng chảy.

Theo Bagnold, tổng công suất dòng chảy được xác định theo công thức [27]:

$$\Omega = \rho g Q S_e \quad (2\text{-}14)$$

$$\omega = \Omega/\mathrm{w} \quad (2\text{-}15)$$

Trong đó:

Ω: tổng công suất dòng chảy tại mặt cắt e (W/m)

ω: công suất đơn vị dòng chảy (W/m²)

ρ: Khối lượng riêng của dòng nước (kg/m³). Đối với nước, lấy là 1000.

g: Gia tốc trọng trường (m/s²), lấy gần bằng 9,81

Q: Lưu lượng dòng chảy tại mặt cắt e (m³/s)

S_e: Độ dốc thủy lực (m/m)

w: Bề rộng bình quân mặt cắt (m)

Công suất được xác định theo phương pháp này có thể điều chỉnh ρ (khối lượng riêng của dòng nước) trong quá trình áp dụng vào thực tế đối với các trận lũ xảy ra tại các khu vực có trầm tích cao nhằm đảm bảo sự phù hợp với thực tế. Ít phương pháp khác cho phép điều chỉnh như vậy.

Công suất dòng chảy tỷ lệ thuận với lưu lượng và độ dốc thủy lực, trong trường hợp đơn giản hóa, có thể sử dụng độ dốc đáy kênh thay cho độ dốc thủy lực. Lưu lượng dòng chảy qua mặt cắt e được xác định thông thường bằng mô hình mưa – dòng chảy cho lưu vực mà có cửa ra chính là mặt cắt e với rất nhiều tham số có liên quan tới lưu vực thượng nguồn. Thông thường, quá trình xác định lưu lượng dòng chảy sử dụng mô hình thủy văn để tính toán.

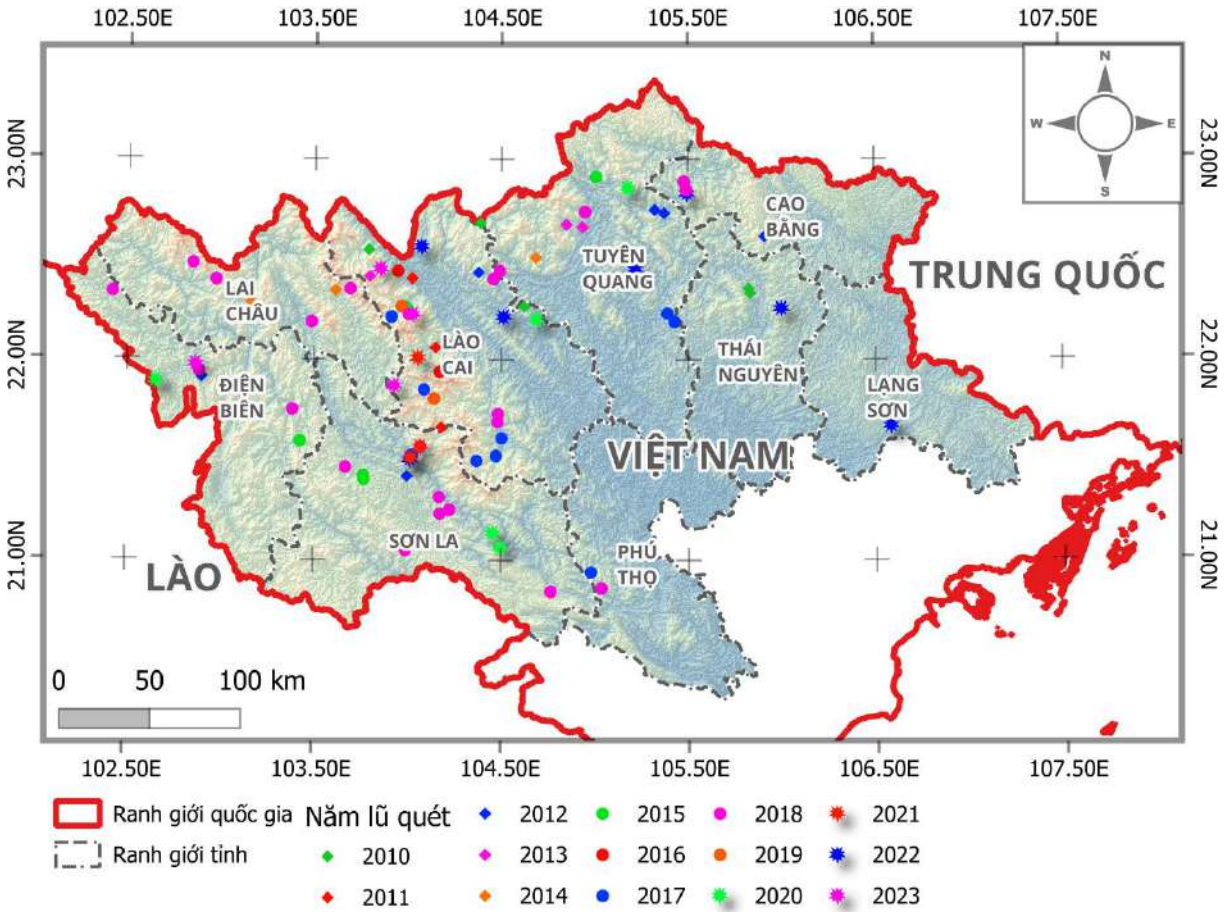
Độ dốc lớn ảnh hưởng trực tiếp tới vận tốc và đặc tính của dòng chảy trên sông/suối, thậm chí nó còn tác động đến hình dạng mặt cắt của lòng dẫn. Dòng chảy tự nhiên hướng tới một trạng thái cân bằng, khi vận tốc lớn sẽ gây xói mòn bề mặt, do vậy lòng dẫn ở khu vực miền núi thường có nhiều cuội, sỏi và các vật liệu đủ lớn để chịu được lực xói mòn do ảnh hưởng của vận tốc dòng chảy. Đối với lũ quét, ở cùng một vị trí tác động thì vận tốc lớn hơn cho công suất lớn hơn và làm cho dòng chảy lũ trở nên nguy hiểm hơn.

Như vậy, về cơ bản chỉ số công suất dòng chảy đã phản ánh được sức mạnh của dòng chảy thông qua chỉ số lưu lượng dòng chảy và chỉ số độ dốc lòng dẫn. Vậy, công suất dòng chảy cần bao nhiêu để có thể xem một dòng chảy là lũ quét. Để đánh giá được cần phải nhìn nhận các đặc trưng của các trận lũ quét đã xảy ra làm cơ sở đánh giá.

Công suất đơn vị của dòng chảy lũ được sử dụng để đánh giá mức độ nguy hiểm của dòng chảy lũ, là chỉ số biểu thị cho khả năng cuốn trôi vật liệu mà dòng chảy lũ đi qua, ngoài ra, yếu tố mực nước và vận tốc cũng được xem xét. Do đó, luận án đề xuất sử dụng ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét dựa trên công suất đơn vị của dòng chảy lũ kết hợp điều kiện vận tốc dòng chảy lũ. Các đặc trưng sông suối ở khu vực miền núi phía Bắc cần chỉ ra được đặc điểm về công suất dòng chảy, đặc điểm kích thước vật liệu và vận tốc dòng chảy lũ để xác định ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét một cách phù hợp.

1. Về công suất đơn vị dòng chảy

Theo Petit và cộng sự (2005) [28], công suất dòng chảy có một mối quan hệ với khả năng cuốn trôi vật liệu của lòng dẫn, do đó, có thể xem xét xác định ngưỡng công suất dòng chảy thông qua đặc trưng kích thước vật liệu dòng dẫn. Trong một nghiên cứu khác [133], 83 trận lũ quét từ năm 2010 trở lại đây đã được rà soát. Danh sách các trận lũ quét được rà soát thể hiện trong Phụ lục III. Hình 2 - 18 dưới đây thể hiện vị trí các trận lũ quét đã xảy ra trên khu vực miền núi phía Bắc trong 15 năm trở lại đây.



Hình 2 - 18. Các trận lũ quét được thu thập trên khu vực miền núi phía Bắc từ năm 2010 đến năm 2023

Tài liệu thu thập cho thấy các trận lũ quét xảy ra phổ biến ở khu vực dãy núi Hoàng Liên Sơn địa phận tỉnh Lào Cai (bao gồm tỉnh Lào Cai và Yên Bái cũ) và một phần tỉnh Sơn La. Đặc điểm chính là địa hình núi dốc, khả năng tập trung dòng chảy nhanh dẫn đến vận tốc dòng chảy lớn khi xảy ra mưa. Kết hợp với mưa lớn, các khu vực này thường xuyên xảy ra lũ quét trong những năm gần đây. Kích thước vật liệu lòng dẫn bị lũ quét cuốn qua dao động trong khoảng từ 0,5÷4,0m. Một số hình ảnh vật liệu bị cuốn trôi sau lũ quét thể hiện trong Hình 2 - 19 dưới đây.





Hình 2 - 19. Một số hình ảnh mô tả vật liệu bị cuốn trong các trận lũ quét lớn thu thập trên khu vực miền núi phía Bắc

Kết quả rà soát 83 trận lũ trên khu vực miền núi phía Bắc cho thấy, nhiều trận lũ quét mô tả có nguyên nhân từ sạt lở đất (không phải là đối tượng nghiên cứu của luận án). Một số các trận lũ không có thông tin về kích thước vật liệu bị cuốn trôi. Kích thước đá bị cuốn trôi trong các trận lũ quét lớn thường từ 2÷3m, đặc biệt nhiều trận lũ có thể cuốn trôi vật liệu lên tới 4m. Khi tràn qua một khu vực, các vật liệu này có khả năng phá hủy nhà cửa và cơ sở hạ tầng, gây hậu quả rất nghiêm trọng. Các trận lũ nhỏ hơn thường mang theo đường kính hạt cũng nhỏ hơn tương ứng. Trên các suối lớn, các loại vật liệu

này có thể bị cuốn dưới đáy lòng dẫn, do đó khó có thể xác định được kích thước vật liệu.

Theo Vũ Bá Thao và cộng sự (2022) [156], kích thước (đường kính) các khối đá do một số trận lũ quét lớn xảy ra tại khu vực miền núi phía Bắc dao động từ 0,2÷3,0m (dựa trên thống kê 33 trận lũ quét trên khu vực miền núi phía Bắc), trong đó, kích thước vật liệu (đá) lớn nhất bị cuốn trôi dao động từ 1,0÷3,0m, tương ứng với công suất đơn vị dòng chảy từ 1.200÷4.500 (W/m²) theo công thức $\omega = aD^b$ (được mô tả trong Chương 1, nội dung 1.3.1). Do phân cấp lũ quét cần xác định vật liệu đã bị cuốn trôi thực tế tại các trận lũ, kích thước các vật liệu đã bị cuốn trôi sẽ được sử dụng để phân cấp.

Dựa trên nghiên cứu tổng hợp, luận án đề xuất ngưỡng phân cấp mức độ lũ dựa trên công suất đơn vị dòng chảy có sự tương quan với kích thước vật liệu lòng dẫn lớn nhất mà trận lũ có thể mang theo, thể hiện ở bảng sau:

Bảng 2 - 4. Đề xuất xem xét ngưỡng phân cấp mức độ lũ dựa trên công suất đơn vị

Cấp độ	**Mô tả**	**Kích thước hạt cuốn trôi (m)**	**Công suất đơn vị dòng chảy (W/m²)**	**Kết quả làm tròn đề xuất (W/m²)**
0	Không có lũ	0,0 ÷ 0.2	0 ÷ 168	0 ÷ 200
1	Lũ nhỏ	0,2 ÷ 0,5	168 ÷ 515	200 ÷ 500
2	Lũ nhanh	0,5 ÷ 1,0	515 ÷ 1.200	500 ÷ 1.200
3	Lũ quét	1,0 ÷ 1,5	1.200 ÷ 1.969	1.200 ÷ 2.000
4	Lũ quét lớn	≥ 1,5	≥ 1.969	≥ 2.000

Theo đó, để được xem là lũ quét, dòng chảy phải có khả năng cuốn trôi vật liệu có kích thước từ 1,0m trở đi. Đối với các dòng chảy có khả năng cuốn trôi vật liệu đường kính từ 1,5m trở lên được xem xét là một trận lũ quét lớn. Các trận lũ có công suất đơn vị dòng chảy thấp hơn được xem xét ở các dạng lũ ít nguy hiểm hơn. Ngưỡng phân cấp mức độ lũ này là một trong các thành phần để xác định nguy cơ lũ quét, trong đó công suất càng lớn (cuốn trôi được vật liệu có kích thước càng lớn) thì nguy cơ lũ quét càng cao.

2. Chiều sâu, bề rộng và vận tốc tối thiểu lòng dẫn

Theo mức độ gây mất an toàn của dòng chảy lũ đã đề cập phía trên, mực nước trên sông/suối phải đạt tối thiểu là 0,3m mới tác động đến phương tiện ô tô, tuy nhiên mực nước này chưa đủ khả năng cuốn/đẩy trôi, đặc biệt trong điều kiện lòng dẫn có độ nhám cao (nhiều cuội sỏi) làm gia tăng lực cản của dòng chảy. Hình 2 - 21 thể hiện dòng nước khá xiết, tuy nhiên độ sâu chỉ khoảng dưới 0,5m cho thấy mức độ nguy hiểm đối với người là bình thường, trong khi đó, Hình 2 - 20 thể hiện dòng chảy lũ nguy hiểm hơn rất nhiều chỉ với độ sâu ngập khoảng 0,6÷0,7m.



Hình 2 - 20. Một số hình ảnh lũ quét ghi nhận lúc 15h45p ngày 5/7/2023 trên sông tại Pác Mjầu, huyện Bảo Lâm, tỉnh Cao Bằng



Hình 2 - 21. Hình ảnh người lội qua dòng nước lũ tại xã Mường Giàng, huyện Quỳnh Nhai, tỉnh Sơn La 2023 (trái) và tại Mù Cang Chải 2023 (phải)

Theo đề xuất của Bae và cộng sự (2018) [157], mực nước tối thiểu trên lòng dẫn của một trận lũ quét là 0,5m. Vận tốc dòng chảy lũ quét lớn hơn 1.5 m/s thường xảy ra ở các dòng suối hẹp và dốc, và thông thường vượt quá 3 m/s, đặc biệt trong các trận lũ quét lớn [73] và vận tốc trung bình của lũ quét được đưa ra là từ 3÷5 m/s với chiều dài dòng chảy khoảng 10km. Một số trận lũ quét đặc biệt lớn có thể đạt vận tốc lên tới trên 12m/s [7]

Trong luận án, ***ngưỡng tối thiểu*** xem xét một trận lũ là lũ quét được lựa chọn cho mực nước là 0,5m và vận tốc là 2,0m/s. Mức tối thiểu này cũng đảm bảo sự phù hợp với tích số mực nước và vận tốc là 1,0m²/s theo hướng dẫn mức độ nguy hiểm ngập lũ của Úc [71].

3. Ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc

Mặc dù công suất dòng chảy đã bao gồm yếu tố vận tốc, tuy nhiên nó không đại diện được cho vận tốc dòng chảy. Một dòng chảy có công suất lớn (như trên các dòng sông lớn như sông Hồng, sông Mã…) có vận tốc ở mức độ vừa phải, do đó lũ ở đây dù lớn vẫn không được gọi là lũ quét. Càng về hạ du, xu hướng vận tốc càng bị giảm dần do sự điều tiết dòng chảy của lưu vực, trong khi đó, các dòng chảy mới hình thành (bắt đầu từ đường phân thủy của lưu vực) về hạ du chưa tích lũy đủ năng lượng (mặc dù có vận tốc rất lớn – chảy trên mái dốc) nên chưa thể gọi là lũ quét (là dòng chảy tràn trên

bề mặt).

Phân tích trên cho thấy công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy có sự liên quan đến nhau nhưng không quyết định lẫn nhau. Đối với các lưu vực nhỏ miền núi, công suất càng lớn thì vận tốc càng lớn. Tuy nhiên điều này không còn đúng với các lưu vực siêu nhỏ (vài trăm m^2 đến dưới $1km^2$) và các lưu vực lớn.

Luận án nhằm khái quát hóa được ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét với đa dạng về đặc điểm lưu vực, do đó, yếu tố vận tốc được đánh giá là yếu tố quan trọng góp phần phân cấp nguy cơ lũ quét. Khi đạt được mức công suất đơn vị là $1.200W/m^2$ (có khả năng cuốn trôi vật liệu có đường kính trên 1m), vận tốc phải đạt trên 3,0m/s mới có khả năng xảy ra nguy cơ lũ quét cao (mức vận tốc bình quân tài liệu đánh giá về các trận lũ quét [73, 7]). Trên cơ sở đó, bảng phân cấp nguy cơ lũ quét dựa vào công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy được đề xuất như sau:

Bảng 2 - 5. Phân cấp nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc

Vận tốc dòng chảy (m/s)	**Công suất đơn vị dòng chảy (W/m^2)**				
	< 200	**200 ÷ 500**	**500 ÷ 1.200**	**1.200 ÷ 2.000**	**≥ 2.000**
2,0 ÷ 3,0	Rất thấp	Thấp	Trung bình	Trung bình	Trung bình
3,0 ÷ 5,0	Thấp	Trung bình	Trung bình	Cao	Cao
5,0 ÷ 7,0	Trung bình	Trung bình	Cao	Cao	Rất cao
≥ 7,0	Trung bình	Cao	Cao	Rất cao	Rất cao

Lưu ý, khi vận tốc dòng chảy nhỏ hơn 2,0m/s hoặc mực nước ước tính nhỏ hơn 0,5m thì nguy cơ lũ quét không được xem xét.

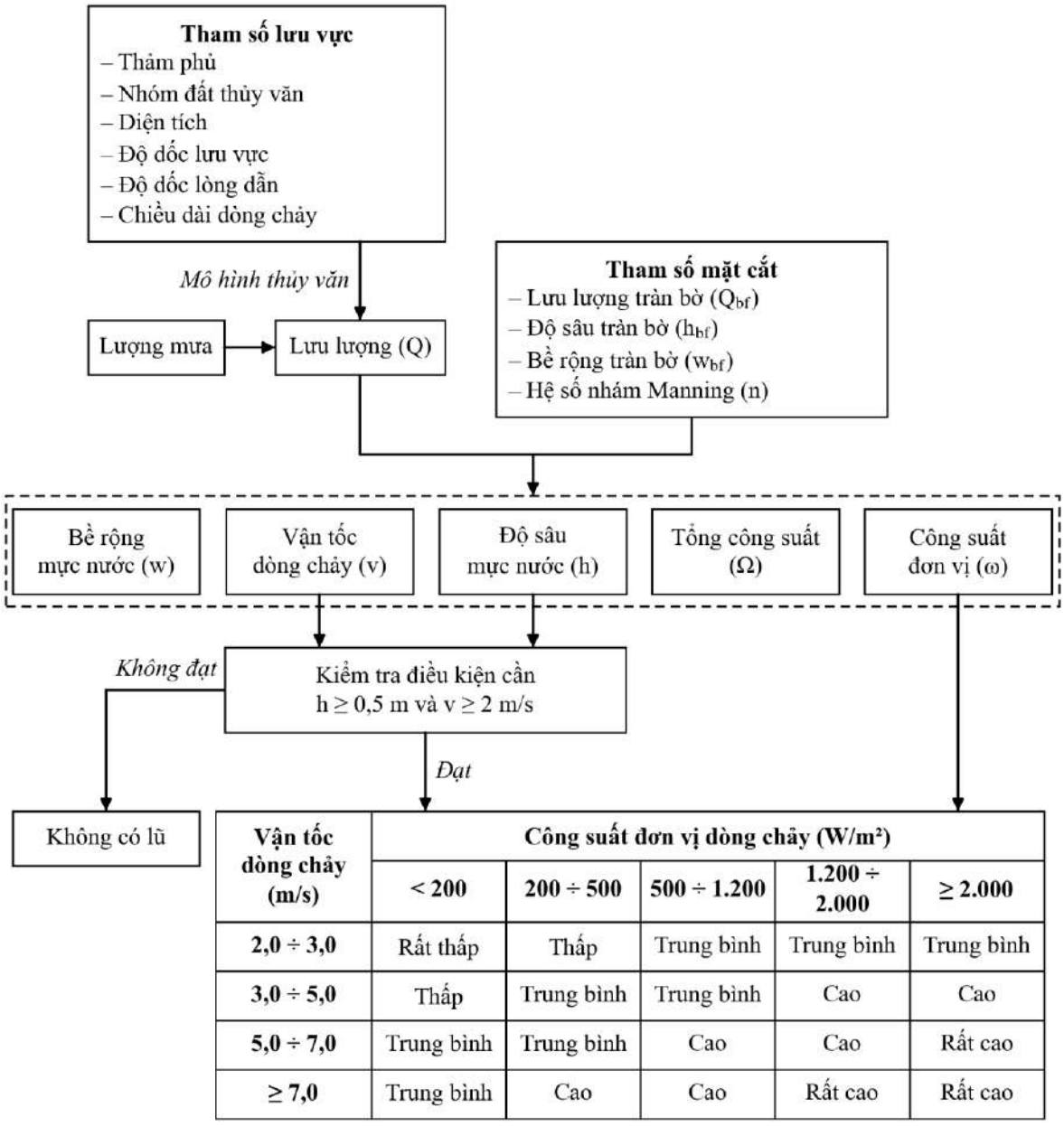
2.2.2. Xây dựng quy trình xác định nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc

2.2.2.1. Quy trình tổng quát xác định nguy cơ lũ quét

Mục đích của nội dung này trình bày các bước xác định nguy cơ lũ quét tại một vị trí cụ thể:

- Bước 1: Xác định độ dốc lòng dẫn tại vị trí tính toán
- Bước 2: Xác định lưu lượng lớn nhất tại vị trí tính toán
- Bước 3: Xác định bề rộng mực nước; vận tốc dòng chảy; độ sâu mực nước
- Bước 4: Xác định công suất đơn vị dòng chảy và phân cấp nguy cơ lũ quét.

Chi tiết các bước thực hiện được thể hiện qua Hình 2 - 22.



Vận tốc dòng chảy (m/s)	Công suất đơn vị dòng chảy (W/m²)				
	< 200	200 ÷ 500	500 ÷ 1.200	1.200 ÷ 2.000	≥ 2.000
2,0 ÷ 3,0	Rất thấp	Thấp	Trung bình	Trung bình	Trung bình
3,0 ÷ 5,0	Thấp	Trung bình	Trung bình	Cao	Cao
5,0 ÷ 7,0	Trung bình	Trung bình	Cao	Cao	Rất cao
≥ 7,0	Trung bình	Cao	Cao	Rất cao	Rất cao

Hình 2 - 22. Quy trình xác định nguy cơ lũ quét trong nghiên cứu cho một điểm

2.2.2.2. Các bước thực hiện

1. Xác định độ dốc lòng dẫn

Độ dốc lòng dẫn tại các vị trí trên lưu vực được xác định dựa trên phương pháp phân tích GIS đã được trình bày chi tiết trong mục 3 của nội dung 2.1.2 (phương pháp nghiên cứu). Cụ thể, tại mỗi vị trí cần tính độ dốc (điểm A), thuật toán hướng dòng chảy được sử dụng để xác định điểm xa nhất trên đường phân thủy (điểm C) thuộc lưu vực có cửa ra tại điểm A, cùng với chiều dài tuyến chảy (l). Độ dốc lòng dẫn tại điểm A được biểu thị bằng độ dốc của đoạn thẳng AB, trong đó điểm B là trung điểm của đoạn AC theo chiều dài dòng chảy. Phương pháp này đảm bảo phản ánh được đặc điểm địa hình, đặc biệt ở các khu vực miền núi có biến đổi lớn, đồng thời khắc phục hạn chế của dữ

liệu độ phân giải thấp và các sai lệch từ địa hình đã qua xử lý loại bỏ điểm trũng hoặc lồi cục bộ.

2. Xác định lưu lượng lớn nhất

Lưu lượng lớn nhất tại một vị trí trên lưu vực được xác định dựa trên phương pháp mô hình toán thủy văn đã trình bày chi tiết trong mục 2 của nội dung 2.1.2 (phương pháp nghiên cứu). Cụ thể, mô hình toán thủy văn được áp dụng để mô phỏng dòng chảy trên lưu vực, sử dụng dữ liệu đầu vào bao gồm thông số địa hình, lượng mưa và các đặc trưng thủy văn khác. Từ kết quả mô phỏng, đường quá trình lưu lượng (hydrograph) tại mỗi vị trí được xây dựng, thể hiện sự biến đổi lưu lượng theo thời gian. Lưu lượng lớn nhất được xác định bằng cách xác định giá trị đỉnh của đường quá trình lưu lượng tại vị trí cần tính. Phương pháp này đảm bảo tính chính xác trong việc ước lượng lưu lượng cực đại, đặc biệt phù hợp với các lưu vực miền núi có biến đổi địa hình và thủy văn phức tạp, đồng thời tận dụng dữ liệu từ mô hình GIS để tăng độ tin cậy của kết quả.

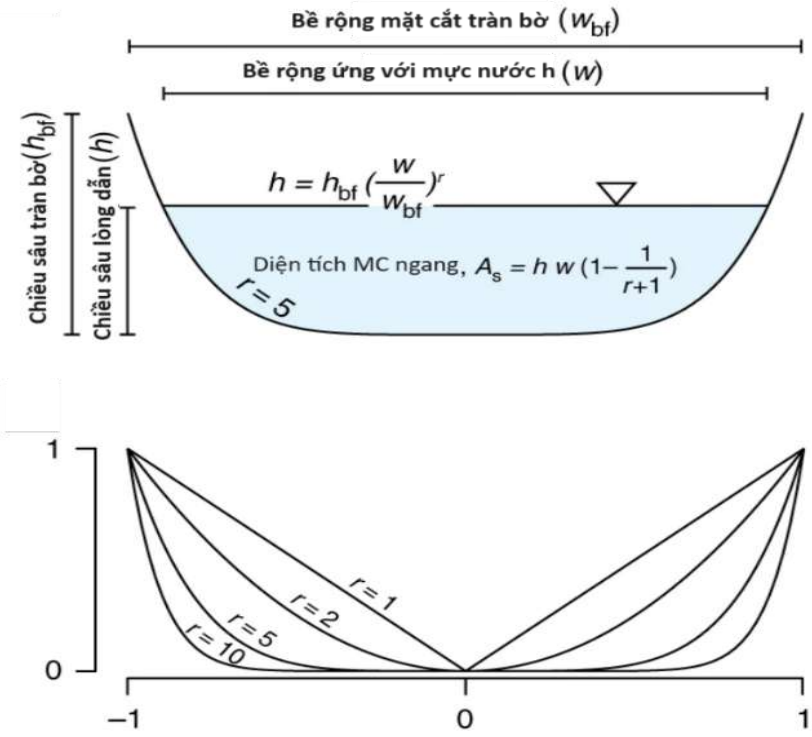
3. Xác định bề rộng mực nước, vận tốc dòng chảy và độ sâu mực nước

Các tham số này là các tham số thủy lực của dòng chảy, thông thường được xác định thông qua mặt cắt khảo sát đã biết trước kết hợp với kết quả tính toán lưu lượng tại vị trí đó. Tuy nhiên, để có thể xác định được các mặt cắt ở mọi vị trí trên một khu vực là điều không thể thực hiện. Các mô hình thủy lực mặt cắt thường xác định cho một số vị trí nhất định (các vị trí đo mặt cắt). Trong khi đó, để hướng tới khả năng cảnh báo nguy cơ lũ quét ở quy mô lớn hơn, có thể thấy rằng công tác khảo sát trên một khu vực lớn (toàn bộ miền núi phía Bắc hoặc cả nước) là chưa khả thi để thực hiện và cần một giải pháp khái quát hóa hình thái lòng dẫn.

Đặc điểm của lũ quét là hình thành ở các lưu vực nhỏ khu vực thượng nguồn, nơi bắt đầu có sự tập trung dòng chảy tạo thành các hệ thống sông suối nhỏ. Các hệ thống sông suối này được đặc trưng bởi sự tương tác giữa các quá trình thủy văn, địa chất, địa mạo làm thay đổi bề mặt địa hình. Do đó, trong một khu vực cụ thể với sự tương đồng về địa chất, địa mạo và lượng mưa, hình dạng lòng dẫn của mặt cắt có sự tương đồng nhất định và được nhiều nhà nghiên cứu khẳng định [158, 159, 160].

Do đó, để giải quyết bài toán tổng thể, phương pháp khái quát hình thái lòng dẫn của Dingman (2007) [160] được sử dụng, bề rộng của lòng dẫn (w) có mối quan hệ với độ sâu mực nước thông qua hình dạng đặc trưng của lòng dẫn. Các tham số thể hiện trong Hình 2 - 23.

Từ hệ số hình dạng r cùng bề rộng và độ sâu lòng dẫn ứng với lưu lượng tràn bờ, có thể suy ra bề rộng tại mực nước bất kỳ. Trường hợp r = 1, mặt cắt có dạng tam giác và diện tích tính theo công thức tam giác; khi r → ∞, mặt cắt tiệm cận hình chữ nhật và diện tích tính theo công thức chữ nhật.



Hình 2 - 23. Khái quát hình thái lòng dẫn với hệ số hình dạng mặt cắt ngang (r) [160]

$$h = h_{\text{bf}}\left(\frac{w}{w_{\text{bf}}}\right)^r \tag{2-16}$$

$$A_s = hw\left(1 - \frac{1}{r+1}\right) = hw\,\frac{r}{r+1} \tag{2-17}$$

Do:

$$Q = Av \tag{2-18}$$

Thay công thức (2-16), (2-17) vào công thức (2-18) và đặt $k = \frac{w_{bf}}{h_{bf}}$ ta có:

$$Q = vkh_{bf}^{1-\frac{1}{r}}h^{1+\frac{1}{r}}\left(\frac{r}{r+1}\right) \tag{2-19}$$

Theo phương trình Manning:

$$v = \frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}} \tag{2-20}$$

Ở dòng chảy tự nhiên, bề rộng w thường lớn hơn nhiều lần độ sâu, nên lực cản từ hai thành bên được xem là không đáng kể so với ma sát đáy. Vì vậy, bán kính thủy lực R xấp xỉ độ sâu trung bình của dòng chảy [161]. Do coi R là độ sâu trung bình của dòng

chảy tương ứng với bề rộng w, ta có diện tích mặt cắt ngang $A_s = Rw = hw\frac{r}{r+1} \rightarrow R = h\frac{r}{r+1}$

Như vậy, công thức (2-20) được viết lại thành:

$$v = \frac{1}{n}\left(\frac{hr}{r+1}\right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2\text{-}21)$$

Thay công thức (2-21) vào công thức (2-19) ta được:

$$Q = \frac{1}{n} kS^{\frac{1}{2}} h_{bf}^{1-\frac{1}{r}} h^{\frac{5}{3}+\frac{1}{r}} \left(\frac{r}{r+1}\right)^{\frac{5}{3}} \quad (2\text{-}22)$$

Khi biết lưu lượng tại một vị trí, có thể ước tính mực nước h theo công thức (2-22) nếu như biết được các tham số r, k, n và h_{bf}. Do đó cần khái quát các tham số này dựa trên đặc trưng của khu vực nghiên cứu. Trong trường hợp thiếu số liệu, có thể sử dụng các tham số đặc trưng của khu vực miền núi phía Bắc để áp dụng. Đối với tính nguy cơ lũ quét, hệ số nhám có thể lấy đặc trưng giá trị n = 0,04 cho khu vực miền núi phía Bắc.

a. Hệ số r và k

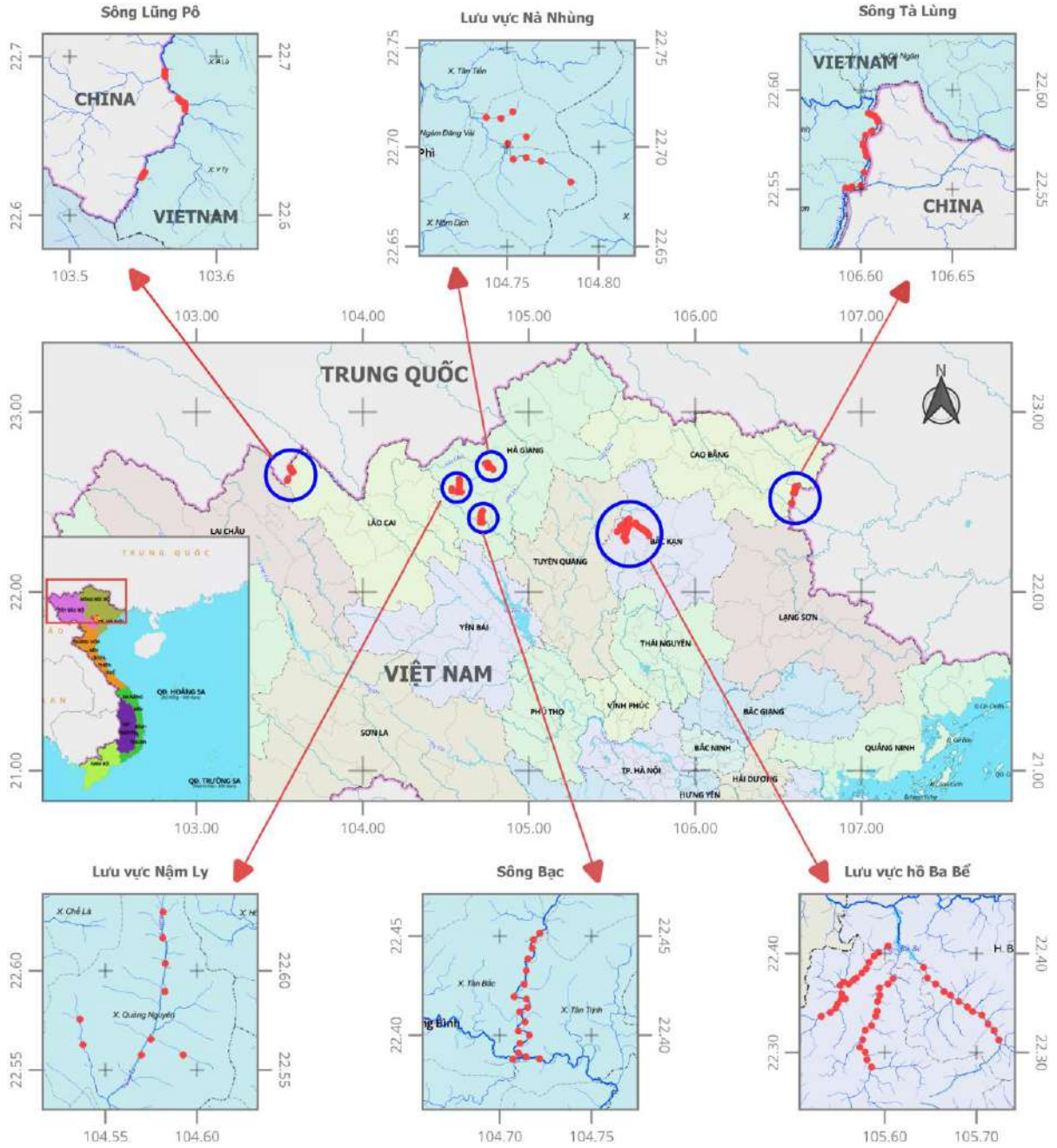
Một số nghiên cứu đã chỉ ra chỉ số thực nghiệm k (tỷ lệ giữa bề rộng lòng dẫn và chiều sâu lòng dẫn tương ứng với lưu lượng tràn bờ). Các kết quả nghiên cứu đề có những dao động rất lớn, thông thường từ 5÷30 và được khuyến nghị khảo sát một số mặt cắt đại diện nhằm xác định chỉ số k phù hợp cho từng khu vực tính toán. Phương pháp này giúp làm giảm chi phí khảo sát tốn kém trong khi vẫn đáp ứng được tính khái quát cho khu vực điển hình. Trong trường hợp không có điều kiện khảo sát, hệ số đại diện cho một vùng rộng lớn hơn cũng có thể được áp dụng.

Bảng 2 - 6. Hệ số thực nghiệm k theo các nghiên cứu

TT	Tác giả/nhóm tác giả	Khoảng $k = \frac{w_{bf}}{h_{bf}}$	Khu vực
1	Huang và cộng sự (1997) [162]	4,27 ÷ 23,75	Sông suối nhỏ miền nam nước Úc
2	Wohl và cộng sự (2005) [163]	5,4 ÷ 38,33	Sông suối nhỏ ở New Zealand
3	Wohl và cộng sự (2008) [164]	Lấy trung bình: 15,377	Tổng hợp từ nhiều nguồn nghiên cứu trước đây trên toàn thế giới
4	Allen và cộng sự (2018) [159]	1,5 ÷ 35; Trung bình là 14	Sông suối nhỏ ở Bắc Mỹ và New Zealand
5	Williams 1978 [165]	6,8 ÷ 61,96;	51 trạm ở Wisconsin, North Dakota,

TT	Tác giả/nhóm tác giả	Khoảng $k = \frac{w_{bf}}{h_{bf}}$	Khu vực
		Trung bình 20,6	Texas, Idaho, Alaska, Pennsylvania ở Hoa Kỳ và một số trạm ở Canada, Anh.s

Luận án thu thập 132 mặt cắt tại 8 nhánh sông, suối nhỏ thuộc khu vực miền núi phía Bắc làm cơ sở xác định chỉ số k đại diện. Chi tiết thể hiện như sau:



Hình 2 - 24. Sơ họa vị trí các mặt cắt được thu thập trong luận án phục vụ đánh giá hình thành mặt cắt ngang

Bảng 2 - 7. Chi tiết số liệu mặt cắt ngang sử dụng

TT	Nguồn tham khảo	Sông/suối	Khu vực	Số lượng mặt cắt
1	Đề tài cấp Quốc gia: Nghiên cứu các giải pháp ứng phó với một số thiên tai chính gây mất ổn định tự nhiên khu vực hồ Ba Bể phục vụ phát triển kinh tế xã hội của địa phương [166]	Suối Xuân Lạc (còn gọi là suối Tả Han)	Xã Xuân Lạc, huyện Chợ Đồn, tỉnh Bắc Kạn	18
		Suối Nam Cường (còn gọi là suối Bó Lù)	Xã Nam Cường, Xã Đồng Lạc, Xã Quảng Bạch, huyện Chợ Đồn, tỉnh Bắc Kạn	14
		Suối Pắc Ngòi (còn gọi là suối Chợ Lèng)	Xã Quảng Khê, Xã Đồng Phúc, huyện Ba Bể, tỉnh Bắc Kạn	12
2	Luận Án: Nghiên cứu phương pháp cảnh báo lũ quét cho lưu vực nhỏ miền núi và áp dụng thử nghiệm cho 2 lưu vực Nậm Ly và Nà Nhùng tỉnh Hà Giang (2023) [109]	Suối Nậm Ly	Xã Quảng Nguyên, huyện Hoàng Su Phì, tỉnh hà Giang	9
		Suối Nà Nhùng	Xã Bản Nhùng, xã Tả Sử Choóng, huyện Hoàng Su Phì, tỉnh Hà Giang	9
3	Các đề tài, dự án khác (tài liệu thu thập bổ sung)	Suối Tà Lùng	Huyện Quảng Hòa, tỉnh Cao Bằng	24
		Sông Lũng Pô	Huyện Bát Xát, tỉnh Lào Cai	28
		Sông Bạc	Huyện Quang Bình, tỉnh Hà Giang	18
	TỔNG CỘNG			**132**

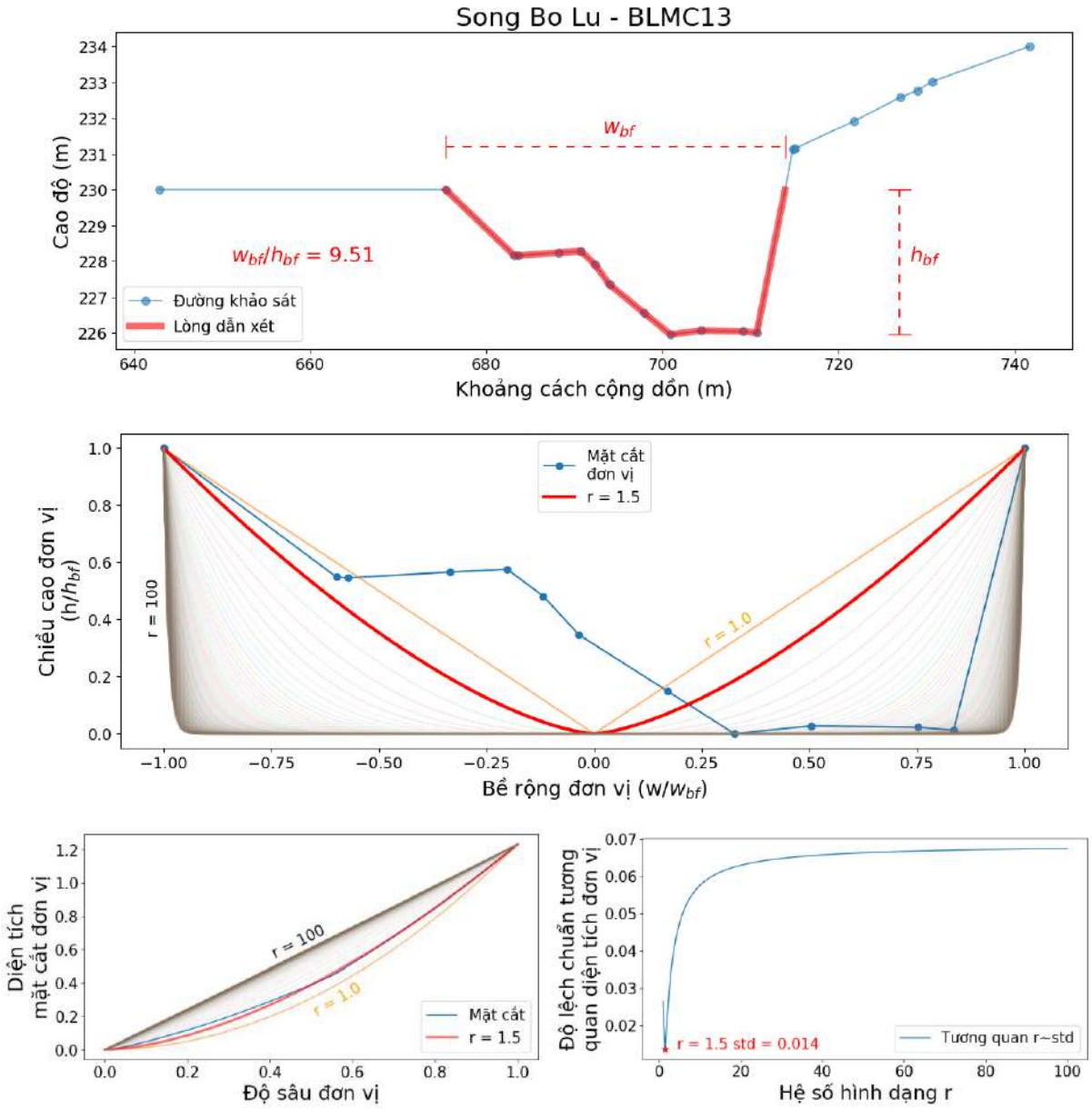
Tổng số 132 mặt cắt sẽ được sử dụng để đánh giá hình thái mặt cắt (Hình 2 - 24), phương pháp đánh giá dựa trên chỉ số độ lệch chuẩn được lựa chọn trong việc xác định r của mỗi mặt cắt từ đó lựa chọn hình thái mặt cắt đại diện cho miền núi phía Bắc. Độ lệch chuẩn được tính bằng căn bậc hai của phương sai của chuỗi tương quan diện tích ướt đơn vị so với mặt cắt chuẩn. Vì mục tiêu là ước lượng độ phân tán trên một mẫu, nghiên cứu dùng độ lệch chuẩn mẫu (ký hiệu D) thay cho độ lệch chuẩn quần thể σ.

$$D = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (2\text{-}23)$$

Theo đó, với mỗi mặt cắt, độ lệch chuẩn mẫu được tính so với từng mặt cắt mẫu (ứng với một chỉ số r) để chọn ra r phù hợp nhất. Sau khi xét toàn bộ tập mặt cắt, đặc trưng hình thái cho miền núi phía Bắc được rút ra bằng cách lấy trung vị và trung bình của chuỗi giá trị r và k thu được từ các mặt cắt. Trong luận án, chỉ số hình dạng r được quét trong khoảng 1÷100 với bước 0,5; tức gần 200 mặt cắt mẫu được đối chiếu cho mỗi mặt cắt nhằm tìm ra đặc trưng hình thái.

Mặt cắt được so khớp qua quan hệ giữa độ sâu và diện tích ướt (h~A) để bảo toàn các nguyên tắc thủy lực khi phân tích dòng chảy. Tại cùng một độ sâu h, diện tích ướt

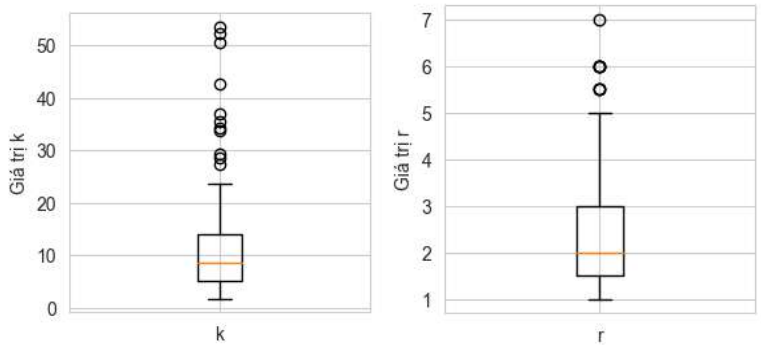
của mặt cắt thực được đối chiếu nhằm chọn mặt cắt mẫu có giá trị sát nhất, qua đó mô tả tốt nhất đặc điểm thủy lực. Cách dùng quan hệ h~A vừa áp dụng được cho mặt cắt đơn giản, vừa xử lý hiệu quả các mặt cắt phức tạp như có bãi giữa, mặt cắt lệch hoặc địa hình gồ ghề bất thường.



Hình 2 - 25. Xác định mặt cắt đơn vị để tìm đặc trưng r cho một mặt cắt điển hình ở khu vực thượng nguồn suối Nam Cường (Bó Lù), huyện Chợ Đồn, tỉnh Bắc Kạn

Phân tích 132 mặt cắt cho thấy r ở miền núi phía Bắc nằm trong khoảng 1÷7 (không mặt cắt nào vượt 7), tập trung nhiều nhất ở dải 1,5÷3 (khoảng một nửa). Khoảng 75% mặt cắt có r ≤ 3 và giá trị xuất hiện nhiều nhất là r = 2 (≈ 25%). Trên toàn bộ dữ liệu, r trung bình bằng 2,68 (làm tròn 2,5) còn trung vị bằng 2. Luận án kiến nghị lấy r = 2 làm chỉ số hình dạng đại diện cho miền núi phía Bắc để sử dụng, tính toán trong điều kiện thiếu số liệu. Đối với các lòng dẫn tự nhiên sông suối nhỏ trên khu vực miền núi phía

Bắc, đồng thời kiến nghị giới hạn r trong khoảng 1÷10 nhằm tạo cơ sở và giảm khối lượng tính toán cho các nghiên cứu sau. Phân bố số liệu các mặt cắt được thể hiện ở Hình 2 - 26.



Hình 2 - 26. Phân bố tỷ số k và hệ số hình dạng r của toàn bộ chuỗi số liệu

Bảng 2 - 8. Thống kê đặc trưng chỉ số hình dạng mặt cắt (r) theo các suối

Suối	Số mặt cắt	Trung bình	Phương sai	Nhỏ nhất	25%	50%	75%	Lớn nhất
Lũng Pô	28,00	1,96	0,90	1,00	1,00	2,00	2,50	4,00
Nà Nhùng	9,00	3,11	1,08	2,00	2,50	3,00	3,50	5,50
Nậm Ly	9,00	2,78	1,15	1,00	2,00	2,50	3,50	5,00
Nam Cường	14,00	3,18	1,62	1,50	2,13	2,75	3,38	7,00
Sông Bạc	18,00	2,33	0,79	1,00	2,00	2,25	2,88	4,00
Pắc Ngòi	12,00	3,21	1,44	1,00	2,50	3,00	4,13	6,00
Xuân Lạc	18,00	2,11	1,02	1,00	1,50	2,00	2,00	5,00
Tà Lùng	24,00	2,75	1,63	1,00	1,50	2,00	3,25	6,00

Về tỷ lệ giữa chiều rộng tràn bờ và chiều sâu tràn bờ (chỉ số k), Chỉ số này dao động từ 1,8÷53,55 trung bình toàn chuỗi đạt 11,3 nhưng trung vị chỉ 8,5; khoảng cách này cho thấy phân bố lệch, tồn tại nhiều điểm ngoại vi. Luận án đề xuất sử dụng chỉ số trung vị là 8,5 để sử dụng, tính toán trong điều kiện thiếu số liệu. Chỉ số 8,5 cũng là chỉ số nằm trong khoảng đã được xác định bởi các nghiên cứu trước đây nêu trong Bảng 2 - 6.

Bảng 2 - 9. Thống kê đặc trưng tỉ số w_{bf}/h_{bf} (chỉ số k) theo các suối

Suối	Số mặt cắt	Trung bình	Phương sai	Nhỏ nhất	25%	50%	75%	Lớn nhất
Lũng Pô	28,00	14,45	13,20	3,42	5,47	8,00	19,27	52,30
Nà Nhùng	9,00	5,04	1,05	3,60	4,13	4,97	5,85	6,53

Suối	Số mặt cắt	Trung bình	Phương sai	Nhỏ nhất	25%	50%	75%	Lớn nhất
Nậm Ly	9,00	7,14	1,84	4,75	5,91	6,38	8,33	10,17
Nam Cường	14,00	15,31	11,74	6,49	9,59	12,42	15,46	53,55
Sông Bạc	18,00	16,97	12,57	3,97	7,05	14,14	20,34	50,56
Pắc Ngòi	12,00	17,02	5,61	9,73	13,15	15,93	20,28	28,60
Xuân Lạc	18,00	7,10	3,88	1,87	4,62	5,56	8,41	16,31
Tà Lùng	24,00	7,40	5,20	1,68	3,28	5,50	10,35	19,37

b. Xác định lưu lượng tràn bờ và bề rộng lòng dẫn

Lưu lượng tràn bờ là một đại lượng có liên quan mật thiết đến diện tích lưu vực thượng nguồn, độ dốc lưu vực và lượng mưa trung bình năm. Mối tương quan này được nhiều nhà khoa học nghiên cứu.

Bảng 2 - 10. Tương quan xác định lưu lượng tràn bờ

TT	Dạng công thức	Tác giả/Nhóm tác giả	Khu vực áp dụng	Giá trị tìm được
1	$Q_{bf} = aA^{\beta}P^{\gamma}$ Q: lưu lượng tràn bờ (ft^3/s) A: diện tích lưu vực (mil^2) P: lượng mưa trung bình năm (inch)	Tortorelli and Bergman 1985 [167]	Khu vực xác định: Oklahoma, Hoa Kỳ	α = 0,03; β = 0,59 và γ = 1,84
2	$Q_{bf} = aA^{\beta}S^{\gamma}$ Q: lưu lượng tràn bờ (m^3/s) A: diện tích lưu vực (km^2) S: độ dốc lòng dẫn (m/m) a, b, c là các hệ số không thứ nguyên	Garnett P. Williams 1978 [165]	51 trạm ở Wisconsin, North Dakota, Texas, Idaho, Alaska, Pennsylvania ở Hoa Kỳ và một số trạm ở Canada, Anh.	α = 4,0; β = 1,21 và γ = 0,28
		Riggs 1976 [168]	Nhiều bang ở Mỹ	α = 3,39; β = 1,295 và γ = 0,316
3	$Q_{bf} = \alpha A^{\beta}$	Nixon 1959 [169]	Anh và xứ Wales	α = 0,57; β = 1,21 A: mil^2
		Emmett 1975 [39]	Idaho, Hoa Kỳ	α = 1,4; β = 1,14
		Emmett 1972	Alaska, Hoa Kỳ	α = 0,8; β = 1,16

Chủ yếu các tác giả nghiên cứu về lưu lượng tràn bờ phụ thuộc vào 3 yếu tố: Diện

tích lưu vực, độ dốc lòng dẫn và lượng mưa trung bình năm. Trong kết quả của dự án "Điều tra, khảo sát, xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ lũ quét khu vực miền trung, tây nguyên và xây dựng hệ thống thí điểm phục vụ cảnh báo cho các địa phương có nguy cơ cao xảy ra lũ quét phục vụ công tác quy hoạch, chỉ đạo điều hành phòng tránh thiên tai thích ứng với biến đổi khí hậu" do Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu (nay là Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển) thực hiện, kết quả xác định các hệ số cho khu vực miền núi phía Bắc được thể hiện như sau [170]:

Bảng 2 - 11. Kết quả xác định hệ số trong công thức tính lưu lượng tràn bờ cho khu vực miền núi phía Bắc

Công thức	Tham số	Toàn quốc (60 trạm)	Khu vực phía Bắc (34 trạm)	Đông Bắc và Việt Bắc (14 trạm)	Tây Bắc (20 trạm)
$Q_{bf} = \alpha A^{\beta}$	α	2,44	3,6	6,01	2,27
	β	0,844	0,765	0,768	0,721
	R^2	0,616	0,6	0,724	0,536
$Q_{bf} = \alpha A^{\beta} S^{\gamma}$	α	18	15	20	15
	β	0,079	0,076	0,0778	0,077
	γ	0,4	0,33	0,45	0,47
	R^2	0,67	0,602	0,796	0,537
$Q_{bf} = \alpha A^{\beta} P^{\gamma}$	α	0,31	0,26	0,44	0,38
	β	0,9	0,9	0,9	0,9
	γ	1,9	2	1,4	3,1
	R^2	0,725	0,737	0,81	0,768

Kết quả cho thấy công thức $Q_{bf} = \alpha A^{\beta} P^{\gamma}$ có độ tương quan cao nhất về lưu lượng tràn bờ đặc trưng cho khu vực miền núi phía Bắc, tuy nhiên việc sử dụng lượng mưa bình quân năm khiến cho việc xác định lưu lượng tràn bờ trở nên kém khả thi hơn 2 công thức còn lại. Lượng mưa bình quân năm ở các khu vực miền núi có sự phân bố không đồng đều, đồng thời, các trạm quan trắc thưa thớt trong quá khứ sẽ làm ảnh hưởng đến độ chính xác của việc xác định lưu lượng tràn bờ. Để đơn giản hóa, công thức $Q_{bf} = \alpha A^{\beta} S^{\gamma}$ sử dụng tương quan về diện tích lưu vực và độ dốc lưu vực là khả thi hơn trong việc đánh giá nhanh nguy cơ lũ quét.

Mặc dù vậy, theo đánh giá của chuyên gia của Trung tâm nghiên cứu thủy văn Hoa Kỳ (HRC) [170], nên cân nhắc chỉ sử dụng tương quan Q=f(A) để tính toán lưu lượng tràn bờ ban đầu cho các tiểu lưu vực khi xây dựng ngưỡng lưu lượng tràn bờ trong tính toán lũ quét. Do vậy, công thức $Q_{bf} = \alpha A^{\beta}$ trở thành công thức ưu tiên hơn, kết quả đánh giá tương quan cũng cho thấy không có sự cải thiện đáng kể bằng việc bổ sung thêm độ dốc trong phương trình tương quan. Ngoài ra, để kiểm chứng sự phù hợp của

lưu lượng tràn bờ trong đánh giá nguy cơ lũ quét, trong một nghiên cứu độc lập khác [133], công thức $Q_{bf} = \alpha A^{\beta}$ đã được xác định là phù hợp để sử dụng trong đánh giá nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc.

Do vậy, công thức tổng quát xác định lưu lượng tràn bờ cho khu vực miền núi phía Bắc là:

$$Q_{bf} = \alpha A^{\beta} \quad (2\text{-}24)$$

Cần xác định các tham số α và β phù hợp với khu vực nghiên cứu để có thể xây dựng được công thức phù hợp. Trong điều kiện thiếu số liệu đo đạc để xác định lưu lượng tràn bờ, công thức với các hệ số đã được xác định trong Bảng 2 - 11 được khuyến nghị sử dụng theo từng khu vực.

Khi xác định được lưu lượng tràn bờ, thay vào công thức (2-22) với $h = h_{\mathrm{bf}}$ và $Q = Q_{\mathrm{bf}}$ sẽ xác định được h_{bf} theo:

$$h_{bf} = \left[\frac{nQ_{bf}}{kS^{\frac{1}{2}}\left(\frac{r}{r+1}\right)^{5/3}}\right]^{\frac{3}{8}} \quad (2\text{-}25)$$

Khi biết lưu lượng tại một vị trí, thay vào công (2-22) để ước tính độ sâu dòng chảy, sau khi có độ sâu dòng chảy, thay vào công thức (2-21) để ước tính vận tốc dòng chảy và công thức (2-16) để xác định chiều rộng dòng chảy, từ đó xác định được công suất đơn vị của mặt cắt.

Như vậy, dựa trên các yếu tố hình thái đặc trưng mặt cắt của khu vực miền núi phía Bắc, về cơ bản có thể xác định được hầu hết các tham số đặc trưng của một trận lũ, từ đó làm cơ sở đánh giá nguy cơ lũ quét. Phương pháp này giúp ước tính các tham số dòng chảy mà không dùng đến mô hình thủy lực, làm giảm quy trình tính toán, đặc biệt là trong điều kiện thiếu số liệu. Bên canh đó, việc sử dụng mô hình thủy lực để mô phỏng trên các sườn dốc cho dòng chảy không ổn định cũng gặp nhiều hạn chế.

Trong nhiều trường hợp không có hoặc có hạn chế số liệu về địa hình (mặt cắt ngang), phương pháp này có thể giúp ước tính nguy cơ lũ quét một cách hiệu quả, đặc biệt là các khu vực miền núi phía Bắc với số liệu khảo sát địa hình và thủy văn hạn chế. Tùy vào điều kiện dữ liệu của từng khu vực nghiên cứu mà có thể linh hoạt áp dụng hay xây dựng tương quan nhằm thay thế các phương pháp xác định đặc trưng hình thái như đã trình bày ở phía trên để tăng cường độ tin cậy cho phương pháp tính.

4. Xác định công suất đơn vị và phân cấp nguy cơ

Công suất đơn vị dòng chảy tại các vị trí trên lưu vực được xác định dựa trên phương pháp của Bagnold, đã được trình bày chi tiết trong mục 1 của nội dung 2.2.1.

Cụ thể, công suất đơn vị dòng chảy (ω, W/m²) được tính theo công thức ω=Ω/w, trong đó tổng công suất dòng chảy (Ω, W/m) được xác định bằng $\Omega = \rho g Q S_e$. Quy trình tính toán sử dụng dữ liệu lưu lượng và độ dốc thủy lực từ các bước phân tích trước đó, kết hợp với thông số mặt cắt từ mô hình GIS, để đảm bảo phản ánh được các đặc trưng thủy lực của dòng chảy.

2.3. Kiểm chứng ngưỡng cảnh báo nguy cơ lũ quét với một số trận lũ quét đã xảy ra trên khu vực miền núi phía Bắc

Các lưu vực xảy ra lũ quét trên khu vực miền núi phía Bắc thường có diện tích nhỏ, nằm ở khu vực thượng nguồn nên các trạm quan trắc mưa hầu hết không nằm trong lưu vực hoặc cách xa lưu vực. Vì lý do đó, rất nhiều trận mưa không bắt được dữ liệu của trận mưa sinh lũ quét. Trong nghiên cứu "Nghiên cứu xây dựng công cụ đánh giá nhanh nguy cơ lũ quét khu vực miền núi phía Bắc (áp dụng cho huyện Nậm Pồ, tỉnh Điện Biên)" [133], 17 trận lũ quét có tác động đáng kể về người hoặc cơ sở hạ tầng từ năm 2020 trở lại đây được rà soát, đánh giá và lựa chọn được 9/17 trận lũ quét với đầy đủ dữ liệu quan trắc mưa theo giờ (với mật độ quan trắc tốt) nhằm đảm bảo khôi phục được tham số thủy văn của các trận lũ quét. Đúng với phạm vi nghiên cứu đã xác định (lũ quét dạng nước thuần túy do mưa, không xét bùn đá, nghẽn dòng và trượt lở đi kèm), cả 9 trận đều là lũ quét do mưa: nghiên cứu [133] xét lũ quét hình thành do mưa, số liệu mưa giờ của các trận ghi nhận mưa lớn ngay trước khi lũ xảy ra (như 94 mm trong 1 giờ tại trạm Nậm Păm sáng 25/8/2021), và hồ sơ các trận không ghi nhận vỡ đập hay nghẽn dòng. Theo cách phân loại của Church và Jakob (2020) [114], đây là loại lũ do dòng chảy vượt ngưỡng, không phải loại chuyển tiếp từ dòng bùn đá hay loại do vỡ đập. Phần bùn đá, đất đá do sạt lở đi kèm ở một số trận (như trận tại trạm Y tế xã Hồ Bốn) không được xét khi tính công suất dòng chảy, theo phạm vi nêu trên. Kết quả trong Bảng 2 - 12 dưới đây là kết quả tính toán khôi phục tham số bằng mô hình thủy văn lưu vực tương tự tại các trạm quan trắc lân cận khu vực xảy ra lũ quét:

Bảng 2 - 12. Kết quả khôi phục lưu lượng đỉnh lũ của một số trận lũ quét trên khu vực miền núi phía Bắc [133]

TT	Tên	Địa điểm	Thời gian	A (km²)	S (%)	Q (m³/s)	Q_{bf} (m³/s)
1	Bản Co Muồng	Xã Tạ Khoa, huyện Bắc Yên, Sơn La	06/08/20	27,221	2,564	49,44	39,67
2	Thôn Na Pao	Bản Lầu, Mường Khương, Lào Cai	23/03/22	32,587	0,598	59,59	46,17
3	Thôn Kim Vân	Kim Hỷ, Na Rì, Bắc Kạn	11/05/22	28,373	2,934	72,76	41,08
4	Lương Sơn	Phố Ràng, Bảo Yên, Lào Cai	14/06/22	30,91	0,668	79,93	44,16

TT	Tên	Địa điểm	Thời gian	A (km^2)	S (%)	Q (m^3/s)	Q_{bf} (m^3/s)
5	Nặm Păm	Ít Ong, Mường La, Sơn La	16/09/22	118,2	3,999	192,32	136,99
6	Trạm Y tế xã Hồ Bốn	Lao Chải, Mù Cang Chải, Yên Bái	06/08/23	30,44	4,78	240,93	43,59
7	Nậm Păm	Ít Ong, Mường La, Sơn La	25/08/21	118,2	3,999	350,57	136,99
8	Chà Tở	Chà Tở, Nậm Pồ, Điện Biên	15/07/23	31,43	1,883	58,10	44,79
9	Nậm Păm	Ít Ong, Mường La, Sơn La	03/08/17	118,2	3,999	84,22	136,99

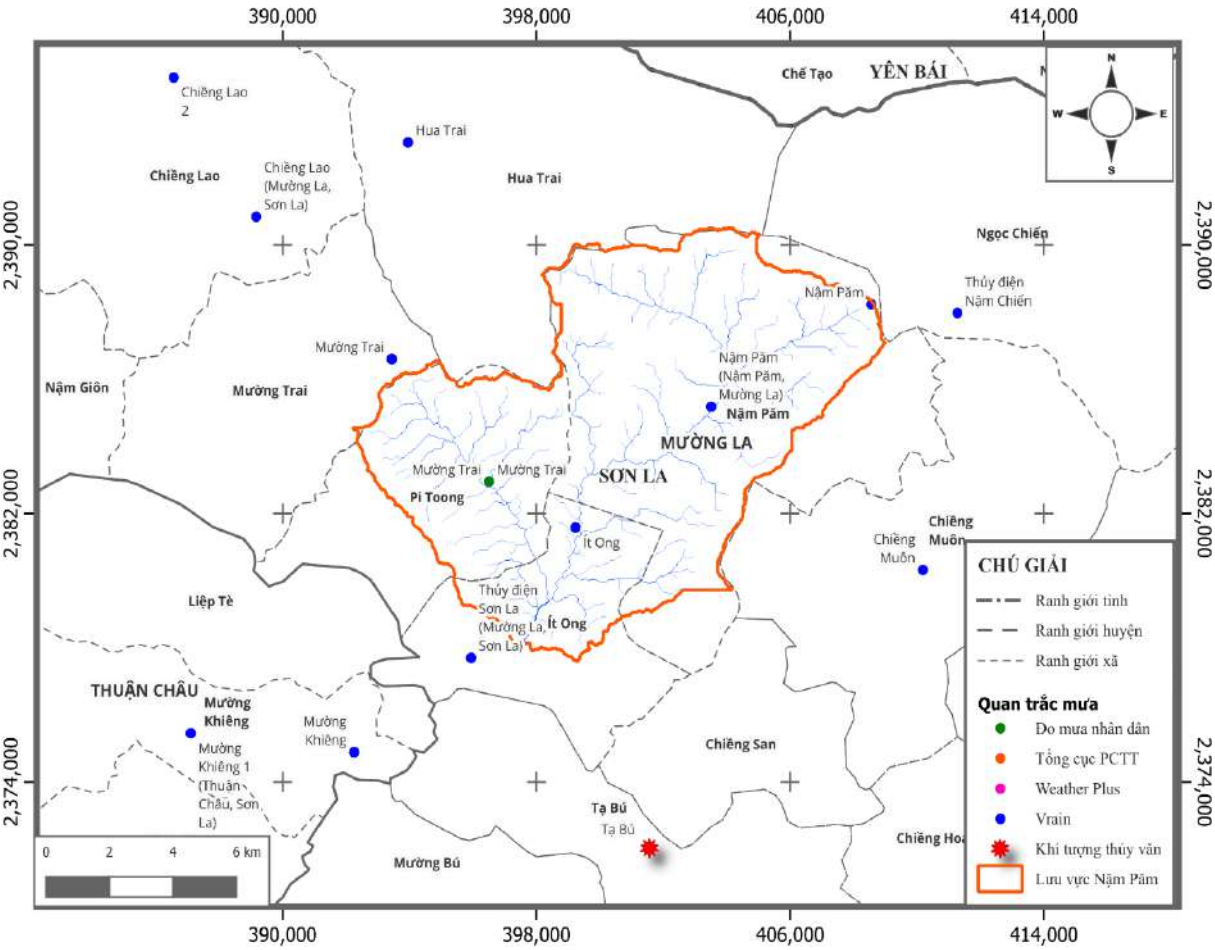
A: diện tích lưu vực; S: độ dốc lòng dẫn; Q: lưu lượng đỉnh lũ; Q_{bf}: lưu lượng tràn bờ.

Bảng 2 - 13. Kết quả các tham số phục vụ xác định nguy cơ lũ quét của một số trận lũ trên khu vực miền núi phía Bắc

TT	Tên	Q_{max} (m^3/s)	Q_{bf} (m^3/s)	S (%)	h_{bf} (m)	w_{bf} (m)	h (m)	w (m)	v (m/s)	Ω (W/m)	ω (W/m^2)	Phân cấp nguy cơ
Công thức		Số liệu cơ bản			(2-25)	$= kh_{bf}$	(2-22)	(2-16)	(2-21)	(2-14)	(2-15)	Bảng 2 - 5
1	Bản Co Muồng	49,44	39,67	2,564	1,365	11,600	1,260	11,235	3,563	12 436	1 107	Trung bình
2	Thôn Na Pao	59,59	46,17	0,598	1,898	16,133	1,782	15,731	2,168	3 496	222	Thấp
3	Thôn Kim Vân	72,76	41,08	2,934	1,348	11,460	1,475	11,880	4,235	20 942	1 763	Cao
4	Lương Sơn	79,93	44,16	0,668	1,828	15,540	2,022	16,178	2,493	5 238	324	Thấp
5	Nặm Păm	192,32	136,99	3,999	1,998	16,987	1,954	16,835	5,963	75 448	4 482	Rất cao
6	Trạm Y tế xã Hồ Bốn	240,93	43,59	4,78	1,258	10,693	2,387	13,816	7,451	112 976	8 177	Rất cao
7	Nậm Păm	350,57	136,99	3,999	1,998	16,987	2,613	18,909	7,238	137 529	7 273	Rất cao
8	Chà Tở	58,1	44,79	1,883	1,513	12,864	1,424	12,555	3,314	10 732	855	Trung bình
9	Nậm Păm	84,22	136,99	3,999	1,998	16,987	1,310	14,348	4,569	33 040	2 303	Cao

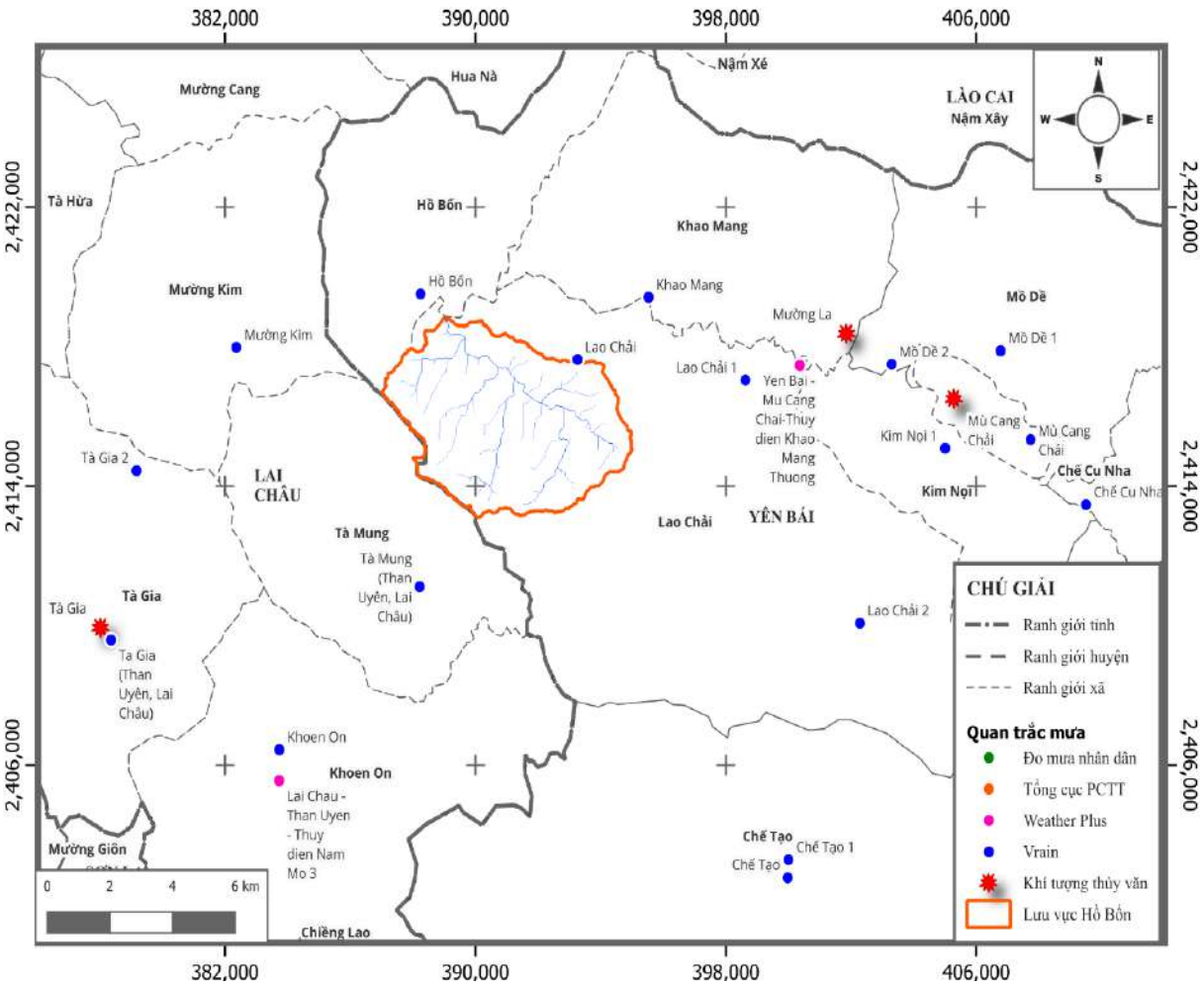
Lấy n = 0,04, k = 8,5 và r = 2,0 đại diện cho các trận lũ quét tính toán

Kết quả khôi phục lại tham số các trận lũ quét và đánh giá nguy cơ lũ quét cho thấy các trận lũ đều đáp ứng điều kiện cần ($h \geq 0,5m$; $v \geq 2m/s$). Trận lũ quét xảy ra tại trạm Y tế xã Hồ Bốn vào năm 2023 và tại Nậm Păm năm 2021 là hai trận lũ có các chỉ số công suất đơn vị và vận tốc rất lớn (**nguy cơ rất cao**). Vận tốc dòng chảy mô phỏng đạt trên 7,0 m/s và công suất đơn vị dòng chảy lũ đạt lên tới hơn 7.000 W/m². Bên cạnh đó, độ dốc lòng dẫn tại hai suối này cũng rất lớn (từ 4%).





Hình 2 - 27. Trận lũ xảy ra tại Nậm Păm năm 2021





Hình 2 - 28. Trận lũ xảy ra tại Hồ Bốn năm 2023

Trận lũ tại thôn Na Pao (Bản Lầu, Mường Khương, Lào Cai) được đánh giá là **nguy cơ thấp**, vận tốc đạt hơn 2m/s và công suất đơn vị dòng chảy đạt 222 W/m², mặc dù trận lũ này được phương tiện truyền thông gọi là lũ quét, hình ảnh mô tả trong các bài đăng tải chỉ hiển thị dưới dạng ngập lũ.



Hình 2 - 29. Hình ảnh nghi nhận của trận lũ tại Bản Lầu, Mường Khương [171]

Ngoài ra, một trận lũ khác ở Lương Sơn (Bảo Yên, Lào Cai) cũng được luận án đánh giá là **nguy cơ thấp**. Các hình ảnh ghi nhận trận lũ này cũng mang tính chất chính là ngập lũ tương tự như trận lũ xảy ra ở Bản Lầu, Mường Khương.



Hình 2 - 30. Một số hình ảnh tại Lương Sơn, Bảo Yên đợt mưa lũ ngày 14/6/2022 [172]

Kết quả đánh giá trên cho thấy việc phân cấp nguy cơ lũ quét được đề xuất theo Bảng 2 - 5 cho một số trận lũ điển hình gần đây có sự phù hợp về tính chất của trận lũ. Các trận lũ được xác định ở mức độ nguy cơ rất cao đều là các trận lũ quét lớn, trong khi đó, các trận xác định có nguy cơ lũ quét thấp là các trận lũ ở quy mô nhỏ (chủ yếu dưới dạng ngập lũ).

Kết quả phân cấp nguy cơ lũ quét trong luận án có thể sẽ là tài liệu hữu ích để tham khảo và ước tính quy mô trận lũ một cách hiệu quả, từ đó hiểu rõ hơn về bản chất của trận lũ quét, kết quả này cần tiếp tục được kiểm chứng với các trận lũ tiếp theo nhằm củng cố cơ sở phân cấp một cách hợp lý.

2.4. Tiểu kết chương 2

Luận án đã phân tích các đặc trưng thủy lực của dòng chảy lũ, khả năng vận chuyển trầm tích và kích thước hạt vật liệu bị cuốn trôi trong các sự kiện lũ quét lớn tại miền núi phía Bắc Việt Nam. Trên cơ sở lý thuyết về công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy như những chỉ số đặc trưng cho cường độ lũ quét, ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét dựa trên hai tham số này đã được đề xuất. Kết quả áp dụng phân cấp cho một số

trận lũ quét đã xảy ra cho thấy mức độ phù hợp của ngưỡng phân cấp đề xuất.

Mặc dù dữ liệu và các sự kiện lũ được phân tích chỉ giới hạn trong khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam, chưa được kiểm chứng hoặc mở rộng cho các vùng địa lý khác, nhưng về mặt lý thuyết, công suất dòng chảy và vận tốc dòng chảy là những đại lượng thể hiện bản chất vật lý của dòng chảy với tính chất bất biến về không gian địa lý. Do đó, phương pháp luận và ngưỡng phân cấp đề xuất có khả năng ứng dụng tham khảo cho các khu vực khác khi chưa có nghiên cứu chi tiết. Việc kiểm chứng bằng dữ liệu lũ quét từ các vùng địa lý đa dạng hơn sẽ nâng cao độ tin cậy và tính khách quan của ngưỡng phân cấp trên quy mô quốc gia.

Để mô phỏng lưu lượng phân bố không gian tại mọi vị trí trong khu vực nghiên cứu, luận án đã áp dụng phương pháp tích hợp GIS và mô hình thủy văn tập trung (SCS-CN), trong đó mỗi điểm được xem là cửa ra của một tiểu lưu vực độc lập. Quá trình tính toán được thực hiện độc lập cho từng điểm theo nguyên tắc xác định lưu vực thượng nguồn, áp dụng mô hình thủy văn tập trung, sau đó gán kết quả lưu lượng cho điểm cửa ra tương ứng. Quy trình này được lặp lại cho toàn bộ khu vực nghiên cứu, tạo ra bản đồ phân bố lưu lượng với độ phân giải không gian cao. Ưu điểm nổi bật là tối ưu hóa thời gian tính toán nhờ sử dụng mô hình thủy văn tập trung có độ phức tạp thấp nhưng vẫn đảm bảo kết quả mô phỏng dạng phân bố không gian, đáp ứng yêu cầu phân tích chi tiết trên quy mô lớn.

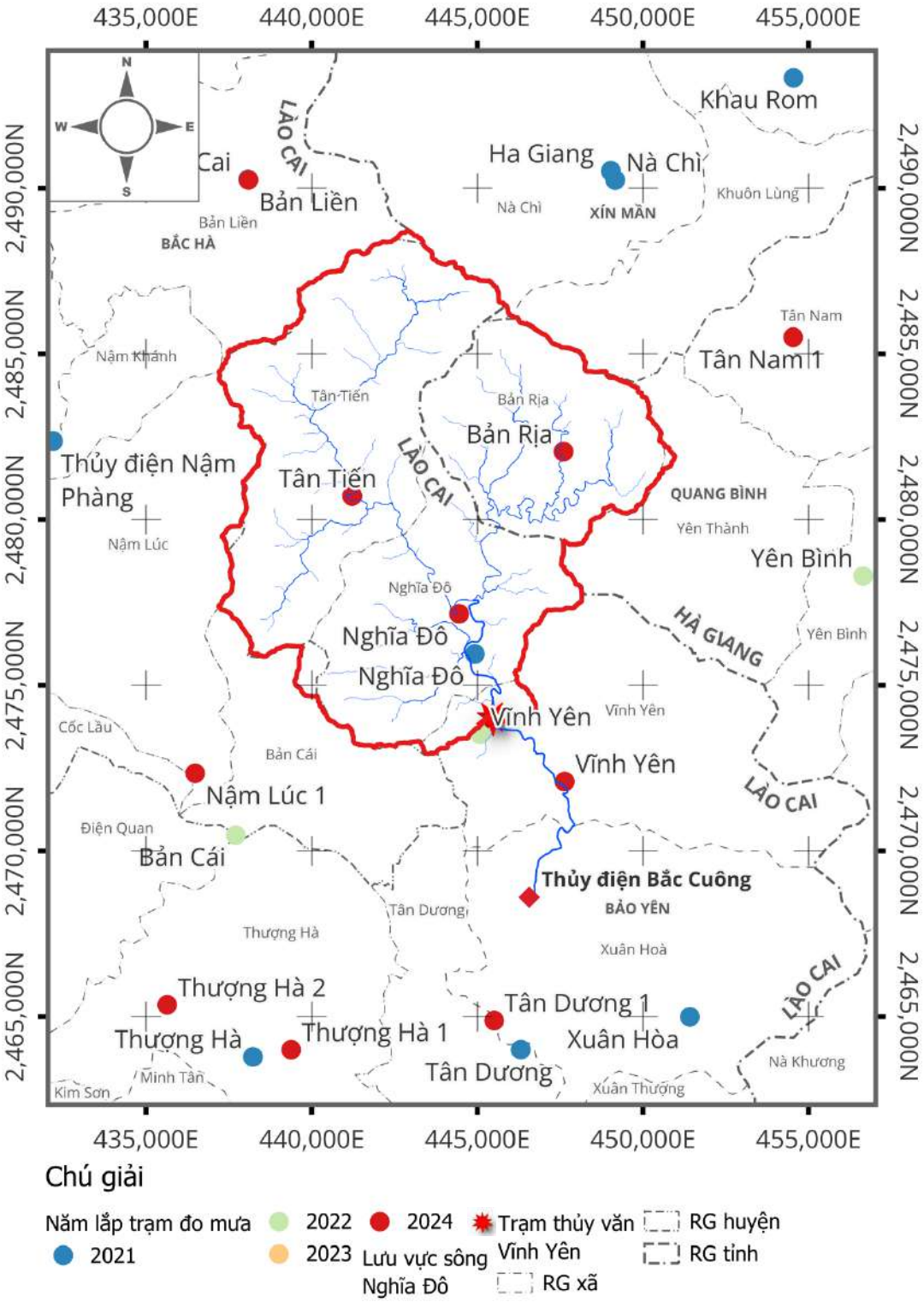
Hình thái mặt cắt ngang sông suối thông qua hai chỉ số đặc trưng r và k đã được khái quát hóa để xác định các tham số thủy lực quan trọng bao gồm vận tốc dòng chảy, độ sâu nước và bề rộng lòng dẫn. Dữ liệu từ 132 mặt cắt ngang phân bố trên 8 hệ thống sông suối tại miền núi phía Bắc Việt Nam cho thấy các mặt cắt có chỉ số r = 2,0 và k = 8,5 là giá trị đại diện cho khu vực miền núi phía Bắc. Các chỉ số này có ý nghĩa thực tiễn cao, có thể áp dụng cho các khu vực thiếu số liệu khảo sát mặt cắt, đặc biệt phù hợp với các vùng miền núi nhằm hỗ trợ mô phỏng thủy lực trong điều kiện dữ liệu hạn chế. Trong điều kiện lý tưởng, việc khảo sát một số mặt cắt mang tính đại diện cho từng khu vực cụ thể sẽ cung cấp cơ sở khoa học để lựa chọn các chỉ số r và k phù hợp nhất với đặc điểm địa hình và hình thái sông suối của khu vực nghiên cứu.

Quy trình xác định nguy cơ lũ quét được xây dựng trên cơ sở mô phỏng thủy văn để xác định lưu lượng lũ và sử dụng các đặc trưng lòng dẫn khu vực nghiên cứu nhằm tính toán các tham số cần thiết phục vụ phân cấp chỉ số nguy cơ. Quy trình này sẽ được áp dụng để xây dựng thử nghiệm bản đồ nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian cho lưu vực sông Nghĩa Đô ở Chương 3.

CHƯƠNG 3. ÁP DỤNG THỬ NGHIỆM XÁC ĐỊNH NGUY CƠ LŨ QUÉT THEO KHÔNG GIAN VÀ THỜI GIAN CHO LƯU VỰC SÔNG NGHĨA ĐÔ

3.1. Giới thiệu khu vực nghiên cứu

1. Giới thiệu chung



Hình 3 - 1. Bản đồ khu vực nghiên cứu và các trạm quan trắc

Khu vực nghiên cứu được lựa chọn là lưu vực sông Nghĩa Đô (một số nơi gọi là suối Bắc Cuông hay suối Nậm Lẹng), tỉnh Lào Cai với cửa ra tại vị trí trạm thủy văn

Vĩnh Yên, cách thủy điện Bắc Cuông khoảng 5,0 km về phía thượng lưu do có số liệu quan trắc đầy đủ của trạm thủy văn Vĩnh Yên. Thời gian thu thập số liệu mưa và lưu lượng tương ứng trong khoảng từ 01/01/2021 đến nay (trước khoảng thời gian này, các trạm quan trắc trên lưu vực quá ít để có thể tính toán được lượng mưa phân bố một cách phù hợp).

Từ năm 2021 trở lại đây, cùng với công tác xã hội hóa trong quan trắc khí tượng thủy văn chuyên dùng, các công ty đã tham gia nhiều hơn vào việc lắp đặt các trạm đo mưa, điển hình như công ty Watec (hệ thống đo mưa Vrain) và WeatherPlus với độ phủ lên tới khoảng 3.000 trạm đo mưa trên toàn quốc, đặc biệt hầu hết các xã đều được lắp đặt trạm đo mưa tại trung tâm xã. Việc đảm bảo mật độ quan trắc mưa có ý nghĩa quan trọng tính toán thủy văn, đặc biệt là các khu vực đồi núi có sự phân bố lượng mưa mang tính cục bộ.

2. Tình hình lũ quét trên khu vực

Khu vực nghiên cứu có nhiều đợt xảy ra lũ lớn, lũ quét, các trận điển hình trong 15 năm trở lại đây bao gồm:

Ngày 06/09/2010, lũ quét trên sông chính Nghĩa Đô qua các xã Tân Tiến, Nghĩa Đô huyện Bảo Yên làm trôi 02 nhà, sập đổ 07 nhà, 55 ha lúa bị thiệt hại và 09 công trình thủy lợi bị hư hỏng [173].

Ngày 03/10/2017, lũ quét xảy ra tại xã Bản Rịa, huyện Quang Bình, tỉnh Hà Giang gây thiệt hại lớn, gây sập 01 nhà và vùi lấp nhiều tài sản của người dân [174].

Ngày 22/10/2018 [175] do xảy ra mưa lớn cục bộ ở 2 phía: (1) xã Tân Tiến và xã Nghĩa Đô thuộc huyện Bảo Yên tỉnh Lào Cai và (2) xã Bản Rịa thuộc Huyện Quang Bình, tỉnh Hà Giang, làm ngập úng, gây hư hỏng, sập đổ hàng chục ngôi nhà, cuốn trôi nhiều tài sản của người dân sinh sống ven hai bên suối. Dòng nước mang đất, cát vùi lấp, gây hư hại nhiều diện tích hoa màu, cây trồng các loại,…

Nước lũ từ 2 nhánh sông (xã Tân Tiến, tỉnh Lào Cai và xã Bản Rịa, huyện Quang Bình, tỉnh Hà Giang) đã dồn về sông Nghĩa Đô tại trạm thủy văn Vĩnh Yên. lũ trên suối Nghĩa Đô (Bảo Yên, Lào Cai) lên nhanh. Mực nước lúc 07h ngày 22/10 tại trạm Vĩnh Yên là 127,85m và đến 10h là 134,44m, cao hơn đỉnh lũ lịch sử 1,68m (Đỉnh lũ lịch sử ngày 9/8/2008 tại Vĩnh Yên: 132,76m), biên độ lũ lên trong 3h (từ 07 -10h) là 6,59m. Sau khi đạt đỉnh, mực nước xuống nhanh.

Ngày 01/05/2019, mưa lớn như trút nước kèm theo lốc mạnh đã gây lũ quét trên suối Nghĩa Đô (tỉnh Lào Cai), cuốn trôi một nhịp cầu và cắt đứt giao thông tuyến tỉnh lộ 153 từ xã Nghĩa Đô đi xã Tân Tiến [176]. Tiếp đó, đến ngày 23/07/2019 tại bản Nà Đình, một nhịp cầu trên tuyến đường xã Nghĩa Đô đi xã Tân Tiến đã bị lũ cuốn trôi, gây ách tắc giao thông hoàn toàn [177].

Ngày 09/09/2024, lượng mưa trên lưu vực tăng đột biến và xuất hiện trên diện

rộng. Một trận lũ rất lớn đã xảy ra trên khu vực sông Nghĩa Đô và các nhánh suối, gây thiệt hại khoảng 4 tỷ đồng trên lưu vực nghiên cứu (phạm vi xã Nghĩa Đô, xã Tân Tiến và một phần xã Vĩnh Yên) [178]. Mực nước trên sông Nghĩa Đô vượt báo động III gần 2,0m. Các thiệt hại trong khu vực nghiên cứu bao gồm:

Bảng 3 - 1. Một số thiệt hại lớn điển hình trên khu vực nghiên cứu

TT	Tên công trình	Vị trí	Mô tả	Thiệt hại (triệu đồng)
1	Kênh mương bản Nà Khương	Xã Nghĩa Đô	Gãy đổ 1.100m kênh bê tông	562
2	Công trình thủy lợi Bản Ràng	Xã Nghĩa Đô	Sạt lở + gãy đổ 250m kênh bê tông	125
3	Kênh Bản Đon	Xã Nghĩa Đô	Gãy 50m, 750m bị vùi lấp	100
4	Đập Bản Rịa	Xã Nghĩa Đô	Vỡ thân đập	2.200
5	Kênh Thâm Mạ	Xã Nghĩa Đô	Gãy đổ 27m	135
6	Kênh Nậm Cằm	Xã Nghĩa Đô	Gãy đổ 12m, 50m bị vùi lấp	160
7	Mương Nà Luông	Xã Nghĩa Đô	Gãy đổ 500m	125
8	Công trình thủy lợi Nậm Đậu	Xã Tân Tiến	Gãy 110m kênh (phục vụ tưới 8ha lúa)	240

3. Nhận định về các trận lũ quét và số liệu quan trắc

Các trận lũ quét đã xảy ra thường xuyên trong những năm gần đây trên toàn quốc, đặc biệt có thể kể đến các tỉnh Lào Cai, Hà Giang, Yên Bái… gây ra những thiệt hại đáng kể về người và tài sản. Mặc dù vậy, các trận lũ trước năm 2021 có số liệu quá hạn chế để có thể khôi phục và đánh giá được thông qua mô hình thủy văn.

Trận lũ ngày 22/10/2018 vượt cả mức lũ lịch sử trước đó với biên độ lũ tại trạm thủy văn Vĩnh Yên trong 3 giờ lên tới 6,59m được cho là trận lũ lớn nhất từng xảy ra trên khu vực. Tuy nhiên, các dữ liệu quan trắc lại không thể hiện được quan hệ giữa lưu lượng và lượng mưa tương xứng. Lưu lượng ước tính theo dữ liệu quan trắc thủy văn đạt đỉnh là 721m^3/s, giá trị này chưa từng xảy ra trên khu vực. Lượng mưa quan trắc theo ngày tại trạm thủy văn Vĩnh Yên ghi nhận ngày 22/10/2018 với tổng lượng mưa chỉ 48,8mm (mưa ngày) và trạm đo mưa Bảo Yên ghi nhận 2 giờ mưa liên tiếp lúc 8:00 và 9:00 AM lần lượt là 17,8mm và 10mm. Dữ liệu này không đủ mức độ chi tiết để có thể mô phỏng được trận lũ với quy mô lớn như vậy. Số liệu trận mưa với quy mô tương

tự là trận mưa ngày 04/08/2024 (trên toàn lưu vực) chỉ sinh ra lưu lượng đỉnh lũ đạt khoảng 97m³/s.

Tiếp đến, trận lũ ngày 01/05/2019 được mô tả với trận mưa như trút nước và gây ra lũ quét trên sông Nghĩa Đô, cũng chính là đối tượng nghiên cứu chính của khu vực nghiên cứu. Tuy nhiên, trong suốt từ thời gian từ 30/04/2019 đến 05/05/2019, lưu lượng lũ ghi nhận tại trạm thủy văn Vĩnh Yên chỉ đạt 9,59m³/s là lớn nhất. Trận mưa ngày ghi nhận tại trạm thủy văn Vĩnh Yên là 43,9mm và tại trạm Bảo Yên không có ghi nhận mưa lớn hơn 1mm.

Các dữ liệu chưa phù hợp này cho thấy số liệu quan trắc giai đoạn này chưa đủ đảm bảo tin cậy để có thể mô phỏng được thủy văn trên lưu vực. Do đó, luận án tập trung vào các trận lũ xảy ra trong những năm gần đây (từ năm 2021 trở về đây) nhằm xây dựng mô hình thủy văn để làm tăng cường độ tin cậy của mô hình.

Lưu vực sông Nghĩa Đô được lựa chọn làm khu vực nghiên cứu điển hình ngoài việc thường xuyên xuất hiện các trận lũ quét trên khu vực còn có đầy đủ số liệu quan trắc về lượng mưa và lưu lượng trong những năm gần đây, làm cơ sở để luận án có thể kiểm chứng các kết quả mô phỏng một cách minh bạch.

3.2. Xây dựng mô hình thủy văn GIS cho lưu vực sông Nghĩa Đô

Mô hình thủy văn GIS là một hệ thống mô phỏng tích hợp sử dụng công nghệ Hệ thống Thông tin Địa lý (GIS) để nghiên cứu và mô phỏng các quá trình thủy văn trên một khu vực cụ thể. Đây là sự kết hợp giữa khả năng xử lý dữ liệu không gian của GIS với các phương pháp tính toán thủy văn nhằm xác định đường quá trình lũ tại mọi vị trí. Thuật toán GIS được sử dụng chính là thuật toán hướng dòng chảy D8, từ thuật toán này, tại mỗi vị trí cửa ra đều có thể tìm được lưu vực thượng nguồn của vị trí đó và tiến hành mô phỏng thủy văn một cách độc lập.

3.2.1. Số liệu sử dụng

Bảng 3 - 2. Số liệu và nguồn số liệu sử dụng

TT	Tên số liệu	Nguồn số liệu
1	Mực nước/ lưu lượng dòng chảy	Tại trạm thủy văn Vĩnh Yên, tỉnh Lào Cai (01/01/2021 ÷ 31/12/2024) - Khí tượng thủy văn
2	Lượng mưa tại khu vực Bảo Yên, tỉnh Lào Cai	- Nguồn dữ liệu Vrain, cung cấp miễn phí truy cập tại https://www.vrain.vn. Tài khoản: Laocai@vinarain; Mật khẩu: 123456 [179]. - Nguồn dữ liệu WeatherPlus (WPs), cung cấp miễn phí truy cập tại đường link: http://laocai.weatherplus.vn/. Tài khoản: pcttlaocai; Mật khẩu: laocai2021 [179]. - Các trạm đo mưa nhân dân: Khí tượng thủy văn (thu thập).
3	Nhóm đất thủy văn toàn cầu (HSG)	Dữ liệu về nhóm đất thủy văn toàn cầu (Global Hydrologic Soil Groups) ở độ phân giải 250m [180].

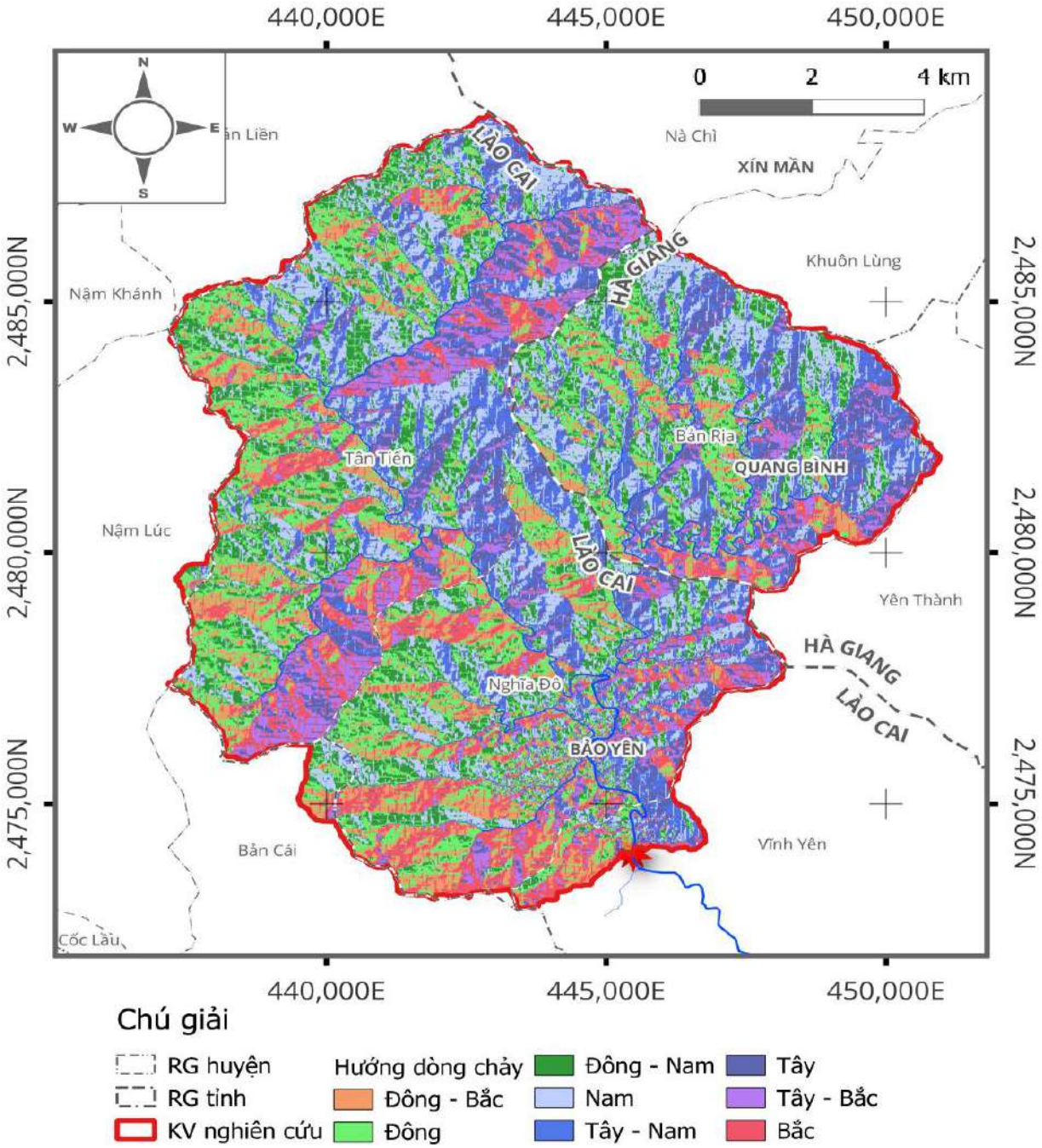
TT	Tên số liệu	Nguồn số liệu
4	Thảm phủ 2020 Việt Nam	Bản đồ thảm phủ được giải đoán từ ảnh Sentinel-2 ở độ phân giải 10m được cung cấp bởi JAXA/ALOS [181].
5	Dữ liệu địa hình	Dữ liệu địa hình được sử dụng là địa hình từ nguồn ALOS độ phân giải 12,5x12,5m cho khu vực nghiên cứu điển hình (lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai).

Bảng 3 - 3. Danh sách các trạm quan trắc mưa có số liệu trong khu vực nghiên cứu

TT	Tên trạm	Địa chỉ	Vĩ độ	Kinh độ	Nguồn	Thời gian bắt đầu
1	Bản Liền	Bắc Hà, Lào Cai	22,5178	104,3980	WPs	2021-03-06
2	Thủy điện sông Chung	Quang Bình, Hà Giang	22,5204	104,5045	WPs	2021-03-06
3	Xuân Hòa	Xuân Hòa, Xuân Hòa, Bảo Yên	22,2896	104,5284	Vrain	2021-04-14
4	Nghĩa Đô	Nghĩa Đô, Nghĩa Đô, Bảo Yên	22,3886	104,4650	Vrain	2021-04-14
5	Thủy điện Nậm Phàng	Thủy điện Nậm Phàng, Nậm Khánh, Bắc Hà	22,4462	104,3410	Vrain	2021-04-14
6	Nà Chì	Nà Chì, Nà Chì, Xín Mần	22,5180	104,5058	Vrain	2021-04-14
7	Khau Rom	Xín Mần, Hà Giang	22,5460	104,5580	WPs	2021-08-31
8	Bản Cái	Bản Cái, Bản Cái, Bắc Hà	22,3389	104,3951	Vrain	2022-07-15
9	Yên Bình	Yên Bình, TT Yên Bình, Quang Bình	22,4102	104,5789	ND	2022-08-01
10	Tân Tiến	Tân Tiến, Xã Tân Tiến	22,4316	104,4289	ND	2024-06-10
11	Nghĩa Đô	Nghĩa Đô, Xã Nghĩa Đô	22,3995	104,4604	ND	2024-06-10
12	Vĩnh Yên	Vĩnh Yên, Xã Vĩnh Yên	22,3539	104,4915	ND	2024-06-10
13	Thượng Hà 2	Thượng Hà 2, Xã Thượng Hà	22,2924	104,3752	ND	2024-06-10
14	Tân Nam 1	Tân Nam 1, Xã Tân Nam, Huyện Quang Bình	22,4753	104,5581	ND	2024-06-10
15	Bản Liền	Bản Liền, Xã Bản Liền, Huyện Bắc Hà	22,5177	104,3981	ND	2024-06-10
16	Bản Rịa	Bản Rịa, Xã Bản Rịa, Huyện Quang Bình	22,4439	104,4908	ND	2024-06-10
17	Nậm Lúc 1	Nậm Lúc 1, Xã Nậm Lúc, Huyện Bắc Hà	22,3558	104,3832	ND	2024-06-10
18	Tân Nam 2	Tân Nam 2, Xã Tân Nam, Huyện Quang Bình	22,4492	104,5867	ND	2024-06-10
19	Tân Dương 1	Tân Dương 1, Xã Tân Dương	22,2884	104,4711	ND	2024-06-10

3.2.2. Phân tích đặc trưng lưu vực

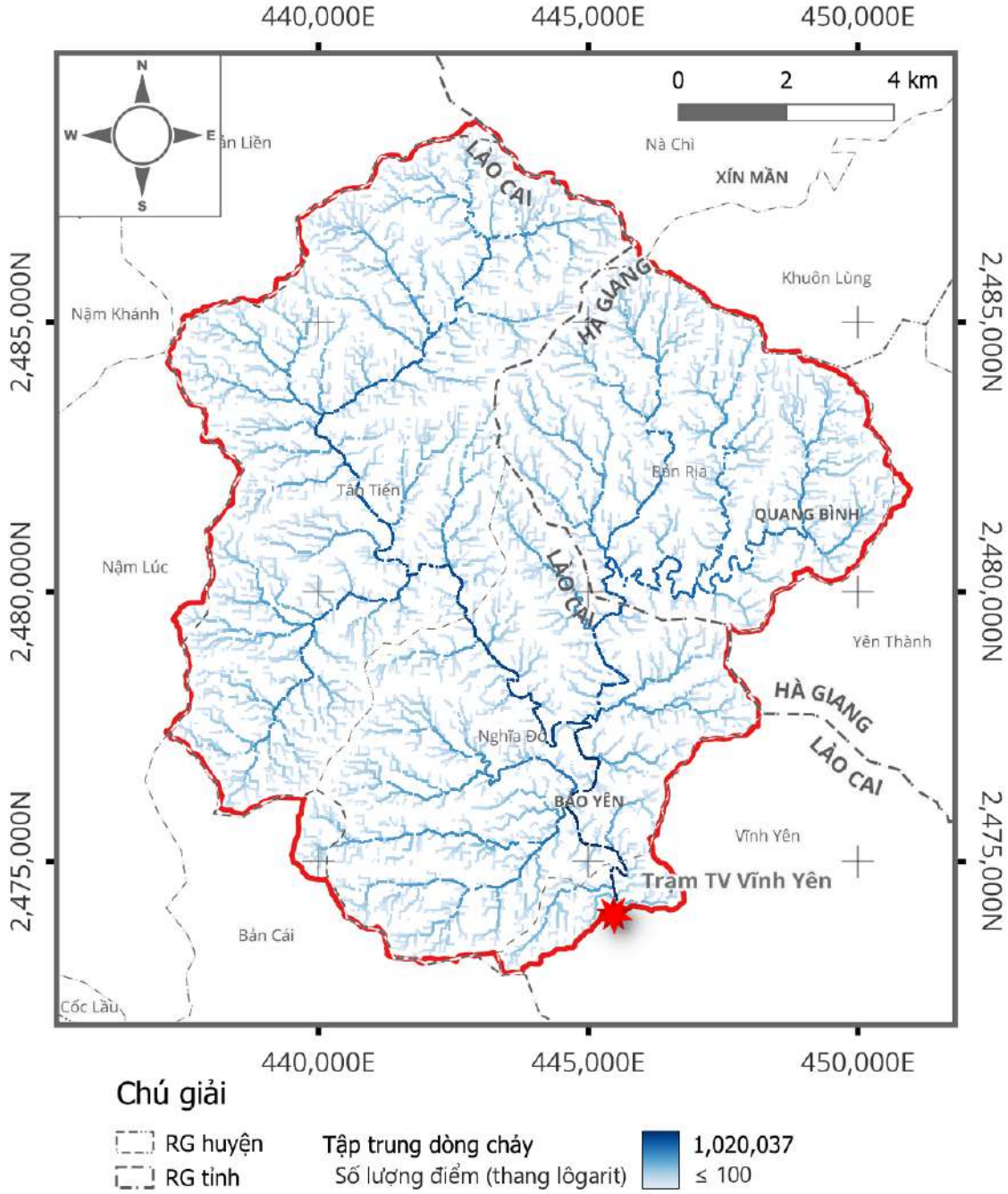
1. Hướng dòng chảy



Hình 3 - 2. Bản đồ hướng dòng chảy khu vực nghiên cứu

Hình 3 - 2 thể hiện bản đồ hướng dòng chảy của khu vực nghiên cứu, là kết quả của tính toán hướng đi dòng nước từ DEM địa hình. Trong luận án, bản đồ này được xây dựng từ công cụ Flow Direction trong QGIS theo thuật toán D8. Công cụ này được tích hợp trong thư viện GRASS có tên gọi là r.fill.dir.

2. Tập trung dòng chảy



Hình 3 - 3. Bản đồ tập trung dòng chảy khu vực nghiên cứu

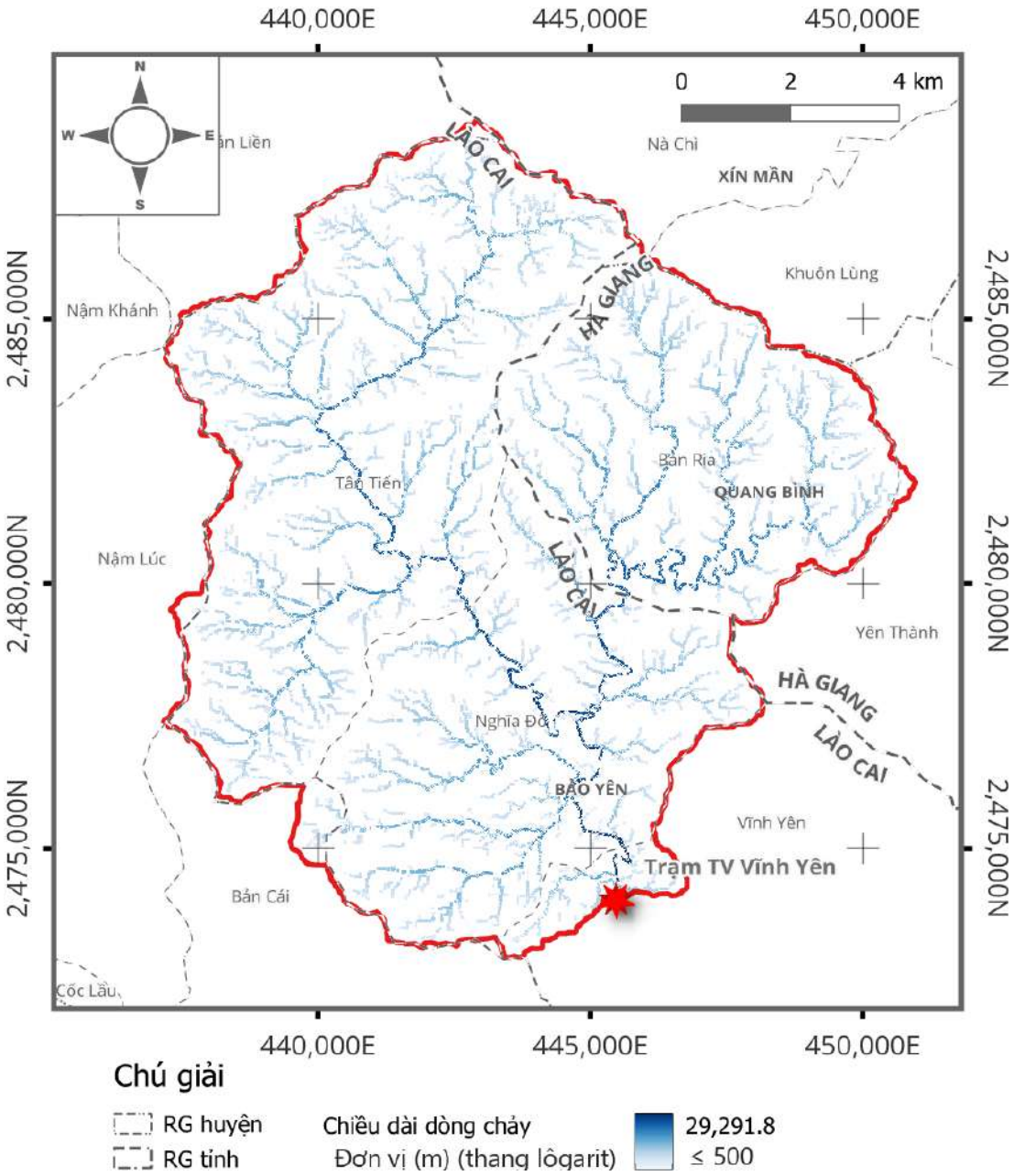
Các ô lưới có số điểm tập trung dòng chảy càng nhiều sẽ hình thành nên lòng dẫn sông/suối. Đây cũng là thuật toán cơ bản để xác định sông suối từ địa hình. Mặc dù có những sai lệch trong quá trình phân tích do số liệu địa hình thiếu tính chính xác và độ phân giải chưa đảm bảo, về cơ bản thuật toán này vẫn được sử dụng rất phổ biến.

Nghiên cứu này sử dụng thuật toán r.flow trong QGIS để phân tích bản đồ tập trung dòng chảy (flow accumulation). Bản đồ này có ý nghĩa quan trọng giúp người sử dụng có thể xác định cửa ra của lưu vực một cách chính xác nhằm loại bỏ những sai sót trong quá trình xác định cửa ra. Cửa ra của lưu vực là một điểm nằm trên các pixel có giá trị

tập trung dòng chảy cao. Kết quả bản đồ được thể hiện ở Hình 3 - 3. Kết quả phân tích cho thấy giá trị tập trung dòng chảy của lưu vực trạm thủy văn Vĩnh Yên là 1.020.372 điểm tương đương 135,57km² ở hệ tọa độ UTM (Ellipsoidal).

3. Chiều dài dòng chảy

Kết quả phân tích cho thấy, chiều dài dòng chảy của lưu vực trạm thủy văn Vĩnh Yên là 29.635m, chiều dài nhỏ nhất có giá trị bằng kích thước của một ô lưới (12,5m) (Hình 3 - 4).

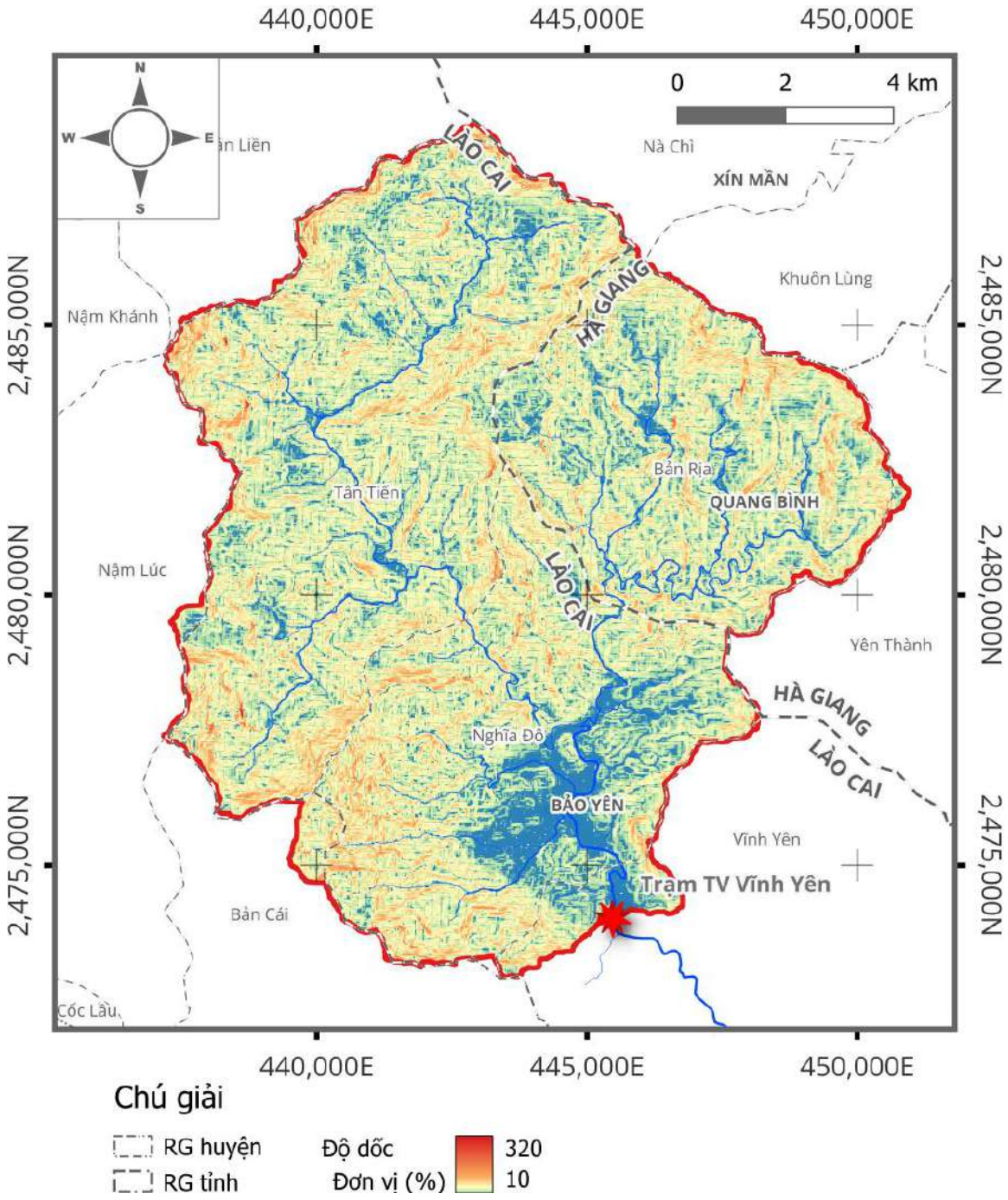


Hình 3 - 4. Bản đồ chiều dài dòng chảy khu vực nghiên cứu

Chiều dài dòng chảy trong luận án sử dụng là chiều dài từ cửa ra của lưu vực đến điểm xa nhất thuộc lưu vực đó. Khi xét một điểm là cửa ra của một lưu vực ô lưới, chiều dài dòng chảy là chiều dài từ điểm đang xét đến điểm xa nhất nằm trên đường phân thủy

của lưu vực ô lưới đó. Thuật toán tìm ngược theo hướng dòng chảy được sử dụng để xác định điểm xa nhất của lưu vực, từ đó tính toán chiều dài theo hướng dòng chảy tương ứng. Kết quả xây dựng được thể hiện trên bản đồ Hình 3 - 4.

4. Độ dốc



Hình 3 - 5. Bản đồ độ dốc lưu vực trạm thủy văn Vĩnh Yên

Phân tích từ địa hình cho thấy, độ dốc lưu vực nghiên cứu thấp nhất là 0,076% (gần bằng 0) và cao nhất đạt 316,34%. Độ dốc bình quân toàn lưu vực đạt 41,69% (tương đương 23,96°). Nghiên cứu sử dụng công cụ Slope trong QGIS để xác định độ dốc, công cụ Zonal statistics trong QGIS để tổng hợp độ dốc bình quân lưu vực. Kết quả bản đồ thể hiện ở Hình 3 - 5.

Khu vực xã Tân Tiến chiếm diện tích phần lớn thượng nguồn (40,72% diện tích) cũng là khu vực có độ dốc bình quân lưu vực lớn nhất (47,12%). Tiếp đến là xã Bản Rịa (thuộc Hà Giang) chiếm 23,55% diện tích lưu vực với độ dốc bình quân là 44,35%.

5. Chỉ số CN

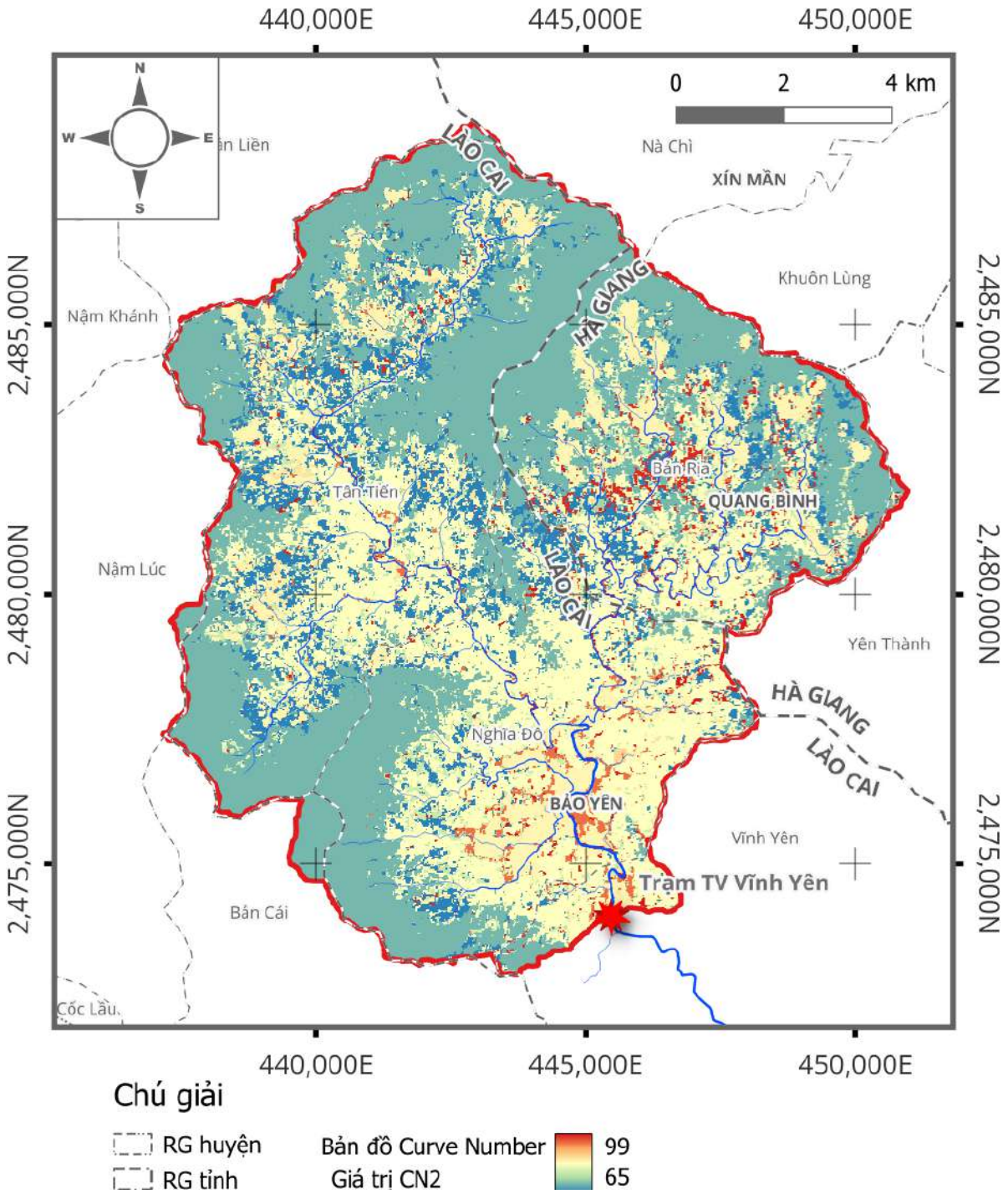
Chỉ số CN được xây dựng dựa trên bản đồ nhóm đất thủy văn của ORNL [180] và bản đồ sử dụng đất năm 2020 do JAXA mới công bố tháng 4/2024 [181]. Xây dựng CN theo bảng ra sau (Bảng 3 - 4):

Bảng 3 - 4. Quy đổi chỉ số CN từ nhóm đất thủy văn và sử dụng đất bề mặt

Mã hiệu trong dữ liệu	**Mô tả**	**Chỉ số CN theo nhóm đất thủy văn**				**Tham khảo**
		A	**B**	**C**	**D**	
#1: Water	Mặt nước	99	99	99	99	[182]
#2: Urban/Built-up	Khu vực đô thị/xây dựng	89	92	94	94	[182]
#3: Rice	Trồng lúa	61	75	83	87	[183]
#4: Other Crops	Các loại cây trồng khác	67	78	85	89	[184]
#5: Grass/Shrub	Cỏ/cây bụi	30	48	65	73	[182]
#6: Woody Crops/Orchards	Cây ăn quả/cây lâu năm	45	66	77	83	[182]
#7: Barren	Đất trống/cằn cỗi	63	77	85	88	[182]
#8: Evergreen Forest	Rừng thường xanh	25	55	70	77	[184]
#9: Deciduous Forest	Rừng rụng lá	45	66	77	83	[184]
#10: Plantation Forest	Rừng trồng	57	73	82	86	[185]
#11: Mangrove Forest	Rừng ngập mặn	98	98	98	98	[182]
#12: Aquaculture	Nuôi trồng thủy sản	99	99	99	99	[182]

Kết quả cho thấy, nhóm đất thủy văn ở trên khu vực nghiên cứu chủ yếu thuộc nhóm C, một số ít thuộc nhóm D, đây là nhóm có khả năng hấp thụ nước kém. Giá trị bình quân của CN đạt 75,80. Bản đồ CN cho lưu vực sông Nghĩa Đô thể hiện ở

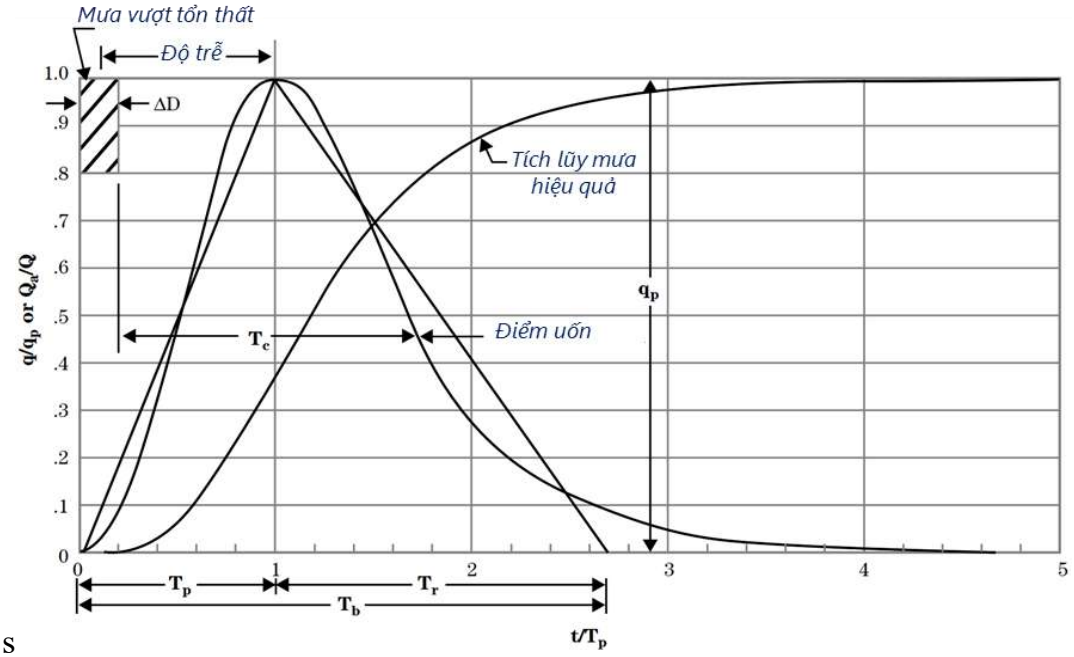
Hình 3 - 6.



Hình 3 - 6. Bản đồ hệ số CN2 lưu vực sông Nghĩa Đô

3.2.3. Xác định thời gian đạt đỉnh

Các yếu tố liên quan đến thời gian của trận lũ được nghiên cứu rất phổ biến, yếu tố này rất quan trọng do phản ánh được sự tương tác giữa mưa với lưu vực. Đối với các lưu vực có thời gian tập trung dòng chảy thấp, lũ sẽ hình thành nhanh hơn và nguy hiểm hơn. Nếu tỷ số thời gian tập trung dòng chảy và diện tích lưu vực càng nhỏ, con lũ càng nguy hiểm. Phương pháp SCS-CN cũng đưa ra cách xác định thời gian đạt đỉnh (time to peak) và được thể hiện như sau (Hình 3 - 7):



s

Hình 3 - 7. Các đặc trưng thời gian của trận lũ

$$T_p = \frac{\Delta D}{2} + L \quad (3\text{-}1)$$

$$L = \frac{(3280{,}84l)^{0{,}8}(\frac{S}{25{,}4}+1)^{0{,}7}}{1.900Y^{0{,}5}} \quad (3\text{-}2)$$

$$T_c = L/0{,}6 \quad (3\text{-}3)$$

$$\Delta D = 0{,}4/(3 * T_c) \quad (3\text{-}4)$$

Trong đó:

L là thời gian trễ của lưu vực (lag time) – giờ,

T_c là thời gian tập trung dòng chảy – giờ,

ΔD là thời gian mưa vượt ngưỡng – giờ,

l là chiều dài dòng chảy (km),

S là lượng trữ nước tiềm năng lưu vực (mm),

Y là độ dốc bình quân lưu vực (%),

Bảng 3 - 5. Tổng hợp các đại lượng cho lưu vực sông Nghĩa Đô

TT	Ký hiệu	Mô tả	Công thức	Giá trị	Đơn vị
1	CN2	Chỉ số CN2		75,80	
2	S2	Lượng trữ nước tiềm năng (tương ứng CN2)		82,96	mm
3	l	Chiều dài dòng chảy		29,635	Km
4	Y	Độ dốc bình quân lưu vực		41,69 24	% o

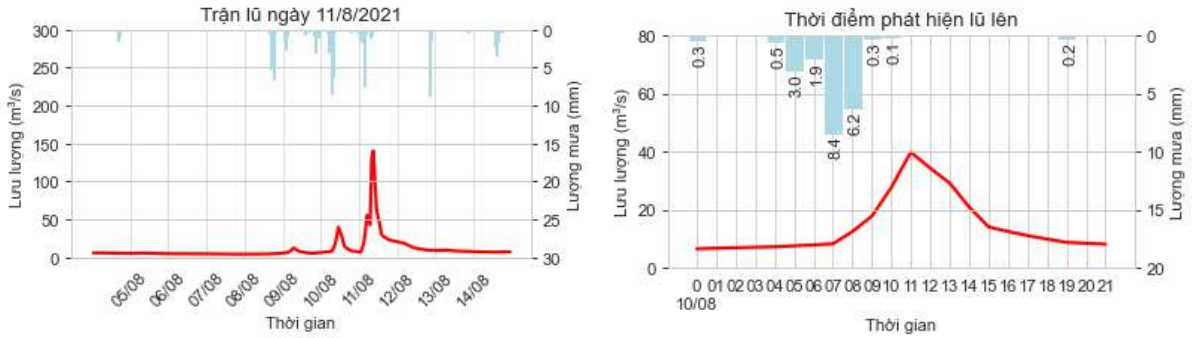
TT	Ký hiệu	Mô tả	Công thức	Giá trị	Đơn vị
5	L	Độ trễ lưu vực	(3-2)	2,2	Giờ
6	Tc	Thời gian tập trung dòng chảy	(3-3)	3,678	Giờ
7	ΔD	Thời gian mưa vượt ngưỡng	(3-4)	0,49	Giờ
8	Tp	Thời gian đạt đỉnh (điều kiện độ ẩm AMC II)	(3-1)	3,92	Giờ

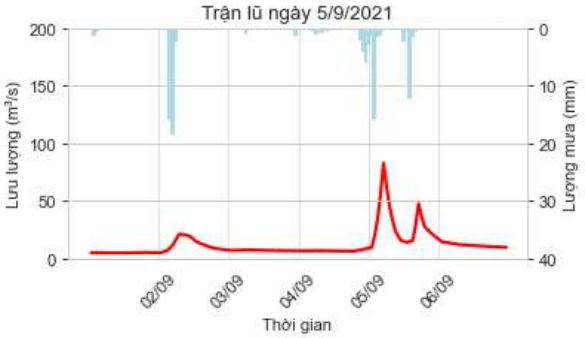
3.2.4. Xây dựng đường quá trình lũ đơn vị của lưu vực

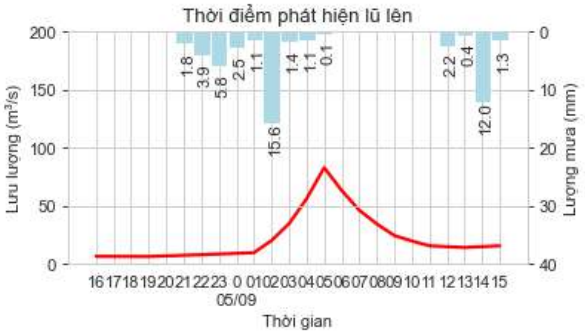
Để xây dựng đường quá trình lũ, cần xác định tham số λ (hệ số tổn thất thấm ban đầu, công thức 2-4) và lựa chọn các trận lũ để xây dựng điển hình. Trong đó, λ được xây dựng dựa trên một số trận lũ đã diễn ra trong quá khứ để xác định. Ngoài ra, trận lũ điển hình để xây dựng đường quá trình lũ đơn vị được lựa chọn phải thỏa mãn được 05 giả thiết cơ bản. Như vậy, ứng với thời gian đạt đỉnh là gần 4 giờ, trận mưa có thời gian mưa vượt thấm lý tưởng là 1 giờ là có thể được lựa chọn để xây dựng đường quá trình lũ đơn vị. Trong trường hợp không lựa chọn được trận mưa lý tưởng, thời gian vượt 2 hoặc 3 giờ cũng có thể được xem xét.

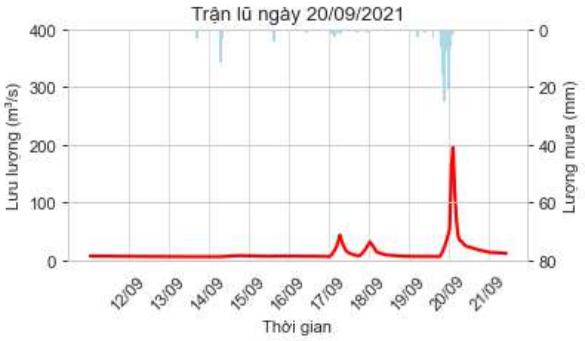
1. Xác định λ

Với các trận mưa lớn, chân đường quá trình lũ (lúc dòng chảy bắt đầu lên) khá dễ nhận biết và đánh dấu thời điểm mưa vượt tổn thất ban đầu. Tại thời điểm đó, điều kiện $P \geq \lambda S$ được thỏa mãn (P là lượng mưa tích lũy từ đầu trận), suy ra $\lambda \leq P/S$. Sau khi có CN và S cho từng trận mưa, một giá trị λ được tính; λ đặc trưng cho lưu vực lấy bằng trung bình của chuỗi giá trị này. Lượng mưa theo thời gian được nội suy rồi tổng hợp cho lưu vực có cửa ra tại trạm thủy văn Vĩnh Yên. Số liệu mưa – lưu lượng của một số trận lũ tổng hợp cho lưu vực nghiên cứu được trình bày ở các hình dưới đây (bên trái là diễn biến toàn trận, bên phải là thời điểm bắt đầu lên lũ).




Trận lũ ngày 5/9/2021
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Thời điểm phát hiện lũ lên
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian

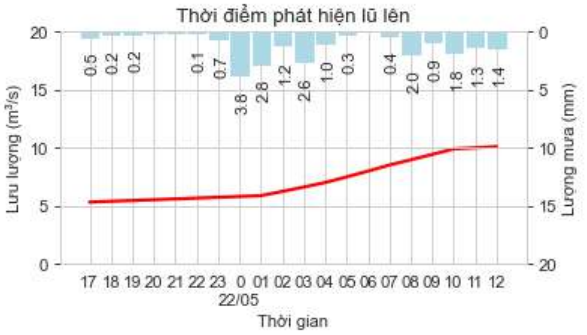

Trận lũ ngày 20/09/2021
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian

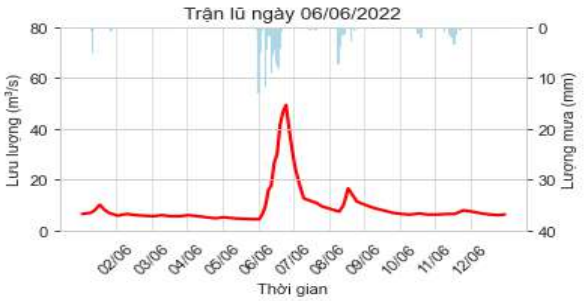

Thời điểm phát hiện lũ lên
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Trận lũ ngày 15/10/2021
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Thời điểm phát hiện lũ lên
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Trận lũ ngày 23/05/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Thời điểm phát hiện lũ lên
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Trận lũ ngày 06/06/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Thời điểm phát hiện lũ lên
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Trận lũ ngày 14/06/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
10/06
11/06
12/06
13/06
14/06
15/06
16/06
Thời gian


Thời điểm phát hiện lũ lên
0.6
2.9
3.1
4.2
7.1
7.1
7.3
5.5
3.0
0.5
0.3
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
19 20 21 22 23 0 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10
14/06
Thời gian


Trận lũ ngày 22/07/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
16/07
17/07
18/07
19/07
20/07
21/07
22/07
23/07
24/07
Thời gian


Thời điểm phát hiện lũ lên
0.4
4.7
8.5
1.1
0.1
2.5
0.2
0.9
6.2
18.0
2.9
3.1
2.7
0.2
0.2
0.2
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 0 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12
22/07
Thời gian


Trận lũ ngày 21/08/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
17/08
18/08
19/08
20/08
21/08
22/08
23/08
24/08
25/08
Thời gian

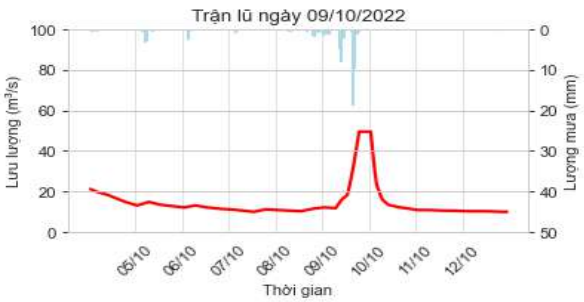

Thời điểm phát hiện lũ lên
2.5
0.8
2.7
0.5
0.5
16.0
15.2
10.0
0.5
0.7
0.3
1.4
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
0 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17
21/08
Thời gian


Trận lũ ngày 04/09/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
01/09
02/09
03/09
04/09
05/09
Thời gian

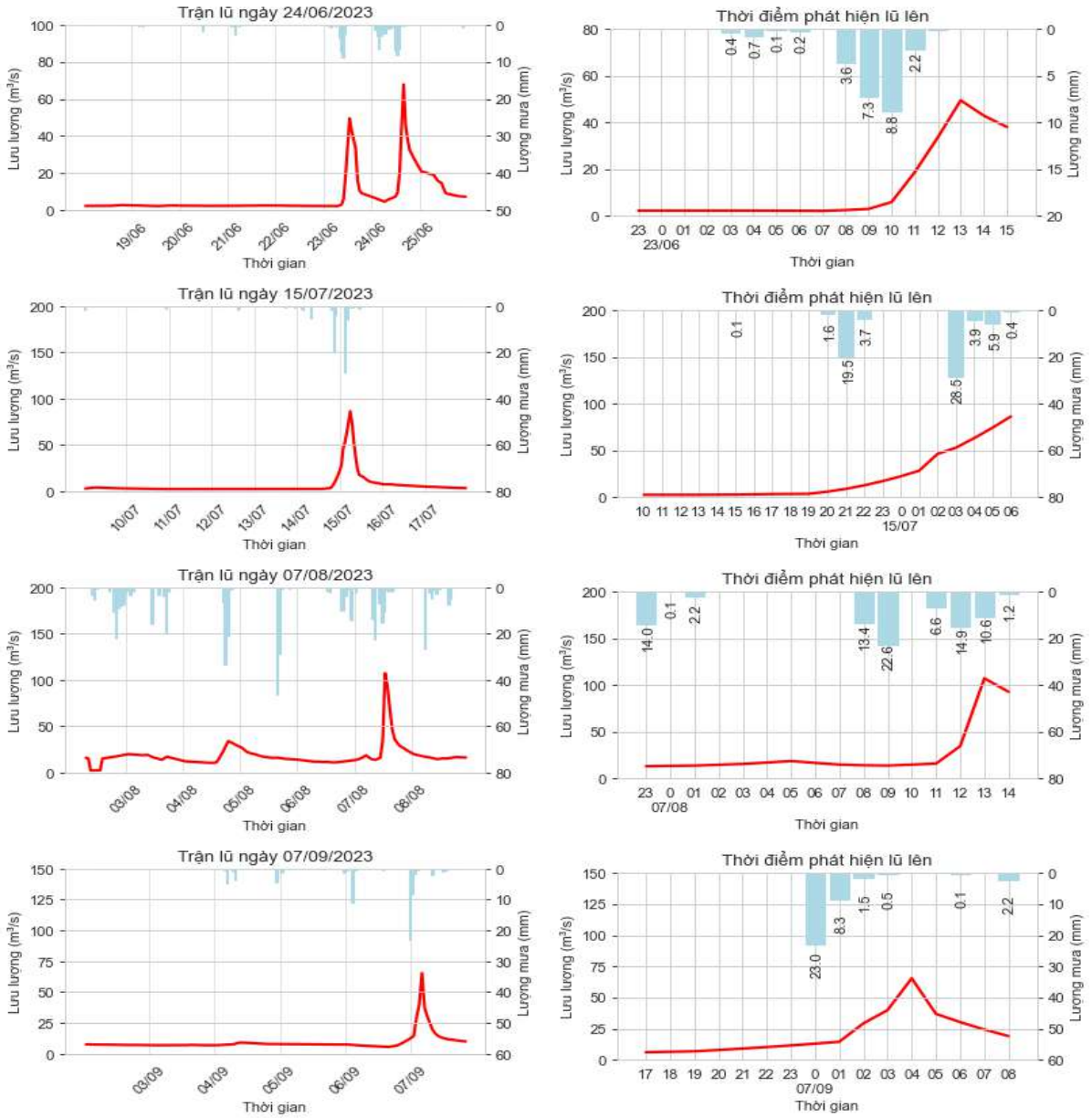

Thời điểm phát hiện lũ lên
1.1
7.7
8.6
10.2
20.1
12.4
5.6
4.4
2.2
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
21 22 23 0 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11
04/09
Thời gian


Trận lũ ngày 02/10/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
25/09
26/09
27/09
28/09
29/09
30/09
01/10
02/10
03/10
04/10
05/10
Thời gian


Thời điểm phát hiện lũ lên
0.1
0.4
3.7
7.9
3.3
0.7
4.3
8.4
7.3
7.2
16.9
10.7
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 0 01 02 03
02/10
Thời gian


Trận lũ ngày 09/10/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
05/10
06/10
07/10
08/10
09/10
10/10
11/10
12/10
Thời gian


Thời điểm phát hiện lũ lên
1.5
0.2
0.6
0.5
0.4
1.3
1.0
0.1
1.0
4.7
7.7
1.9
0.2
0.4
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
20 21 22 23 0 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15
09/10
Thời gian



Bằng cách chồng lớp trên GIS hai bản đồ – nhóm đất thủy văn và thảm phủ – rồi lấy trị bình quân theo lưu vực sông Nghĩa Đô, luận án đã xác định được hệ số CN2 theo NRCS của lưu vực là 75,83. Cần tính toán, xác định hệ số tổn thất ban đầu của lưu vực sông Nghĩa Đô để kiểm chứng. Kết quả xác định được thể hiện trong bảng sau.

Bảng 3 - 6. Tổng hợp các tham số trận lũ phục vụ tính λ

TT	Thời điểm bắt đầu	Mưa 5 ngày trước (mm)	Lượng mưa vượt (mm)	Trạng thái AMC	CN	S	λ
1	10/08/2021 03:00	23,060	13,760	I	55,94	200,02	0,069
2	04/09/2021 20:00	42,523	1,100	II	75,80	80,96	0,014
3	19/09/2021 19:00	22,660	5,550	I	87,82	35,20	0,158
4	14/10/2021 15:00	57,080	11,170	III	87,82	35,20	0,317
5	21/05/2022 21:00	22,950	8,591	I	55,94	200,02	0,043
6	05/06/2022 22:00	7,100	18,499	I	55,94	200,02	0,092

TT	Thời điểm bắt đầu	Mưa 5 ngày trước (mm)	Lượng mưa vượt (mm)	Trạng thái AMC	CN	S	λ
7	13/06/2022 23:00	14,600	6,560	I	55,94	200,02	0,033
8	21/07/2022 21:00	87,230	9,938	III	87,82	35,20	0,282
9	21/08/2022 07:00	29,310	16,019	I	55,94	200,02	0,080
10	04/09/2022 02:00	23,086	8,733	I	55,94	200,02	0,044
11	01/10/2022 21:00	43,047	4,260	II	72,80	94,90	0,045
12	09/10/2022 07:00	19,200	14,630	I	55,94	200,02	0,073
13	23/06/2023 07:00	8,490	19,593	I	55,94	200,02	0,098
14	14/07/2023 19:00	13,268	21,120	I	55,94	200,02	0,106
15	07/08/2023 10:00	338,000	6,600	III	87,82	35,20	0,188
16	06/09/2023 23:00	29,358	32,080	I	55,94	200,02	0,160

Từ bảng đánh giá cho thấy, hệ số λ của lưu vực sông Nghĩa Đô dao động từ 0,014÷0,317 với bình quân toàn chuỗi số liệu là 0,1. Hệ số λ ≈ 0,1 bình quân cũng chưa thấp như với nghiên cứu của Hawkins (1984) [136], Noori và cộng sự (2012) [186] kiến nghị lấy 0,05; song mỗi lưu vực phản ứng một khác, và số liệu cho thấy λ = 0,2 là quá lớn so với thực tế của lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai.

Các trận lũ được lựa chọn có thể không bao quát hết được đặc điểm mưa và dòng chảy trên lưu vực, tuy nhiên, việc đánh giá nhiều trận lũ phản ánh xu hướng dòng chảy một cách phù hợp hơn. Chất lượng của tính toán lưu lượng từ lượng mưa phụ thuộc rất nhiều yếu tố, đặc biệt quan trọng là độ tin cậy của dữ liệu mưa. Sự phân bố quan trắc mưa và mật độ quan trắc có thể tác động đáng kể đến quá trình mô phỏng.

2. Lựa chọn trận lũ

Trận lũ được lựa chọn nên là một trận lũ đơn. Để có thể tìm được trận lũ đơn tạo dòng chảy lũ lớn với đủ số liệu quan trắc mưa phản ánh được thực trạng lũ là điều khó khăn, đặc biệt trước năm 2020, các số liệu quan trắc mưa còn hạn chế. Ngoài ra, cường độ mưa ngắn hạn cũng là một trong những ưu tiên, do vậy, các trận mưa có lượng mưa tập trung trong thời đoạn ngắn từ năm 2020 trở lại đây sẽ được lựa chọn.

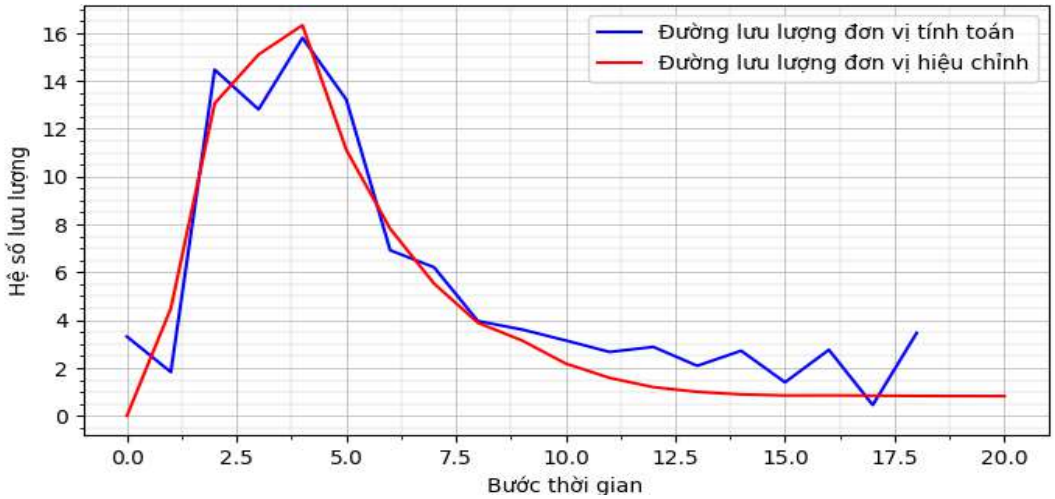
Kết quả đánh giá số liệu cho thấy, trận mưa ngày 21/08/2022 được sử dụng để tính toán đường quá trình đơn vị. Trong đó, mưa tập trung vượt ngưỡng ở 3 giờ liên tiếp và trước đó không bị tác động bởi trận mưa lớn phía trước. Dữ liệu sử dụng bao gồm lượng mưa và lưu lượng quan trắc trên sông được thống kê ở Bảng 3 - 7:

Bảng 3 - 7. Số liệu sử dụng khôi phục đường quá trình lũ đơn vị

Ngày	Giờ	P (mm)	Pe (mm)	Q (m³/s)	Qr (m³/s)
2022-08-21	7	0.03	-	4.86	-
	8	16.02	0.22	10.94	6.08
	9	15.20	1.96	19.84	14.98
	10	9.99	2.23	39.53	34.67
	11			66.20	61.34

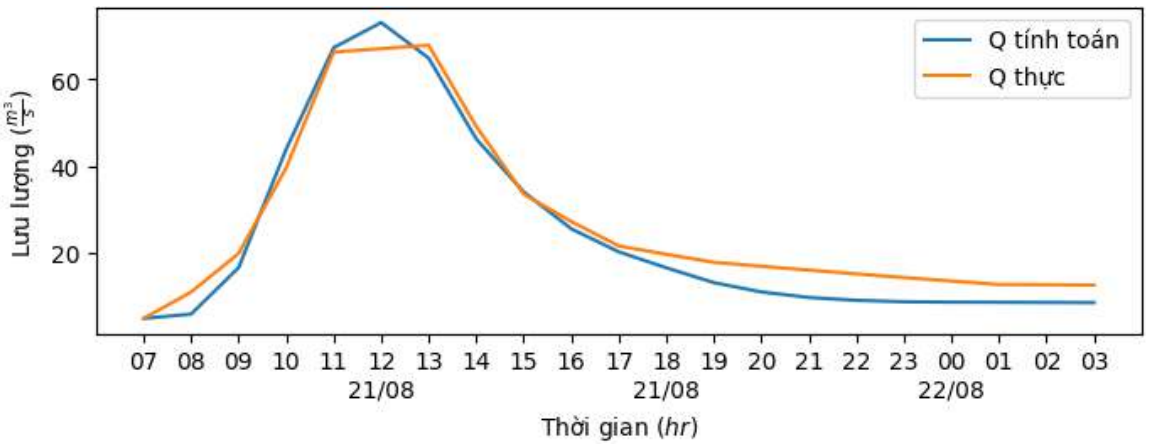
Ngày	Giờ	P (mm)	Pe (mm)	Q (m³/s)	Qr (m³/s)
	12			66.98	62.12
	13			67.77	62.91
	14			49.09	44.23
	15			33.47	28.61
	16			27.17	22.32
	17			21.56	16.70
	18			19.63	14.77
	19			17.79	12.93
	20			16.88	12.02
	21			15.99	11.13
	22			15.12	10.27
	23			14.29	9.43
2022-08-22	0			13.47	8.62
	1			12.69	7.83
	2			12.63	7.77
	3			12.58	7.72

Trong bảng, cột P là lượng mưa thực tế (nội suy về raster rồi gộp cho lưu vực), P_e là mưa hiệu dụng sinh dòng chảy mặt, Q là lưu lượng thực đo trên sông, còn Q_r là phần lưu lượng do dòng chảy mặt tạo ra (đã trừ dòng chảy cơ sở). Hai chuỗi cần dùng là P_e và Q_r; áp dụng công thức (2-10) được giải bằng phép tính ma trận với thư viện Numpy trong Python; kết quả thu được như Hình 3 - 8:



Hình 3 - 8. Đường quá trình lũ đơn vị khôi phục từ dữ liệu thực đo

Như vậy, đường quá trình lũ ở Hình 3 - 8 chính là đường quá trình ứng với 1 mm mưa hiệu dụng phân bố đều trên lưu vực, sinh ra quá trình lưu lượng tương ứng.

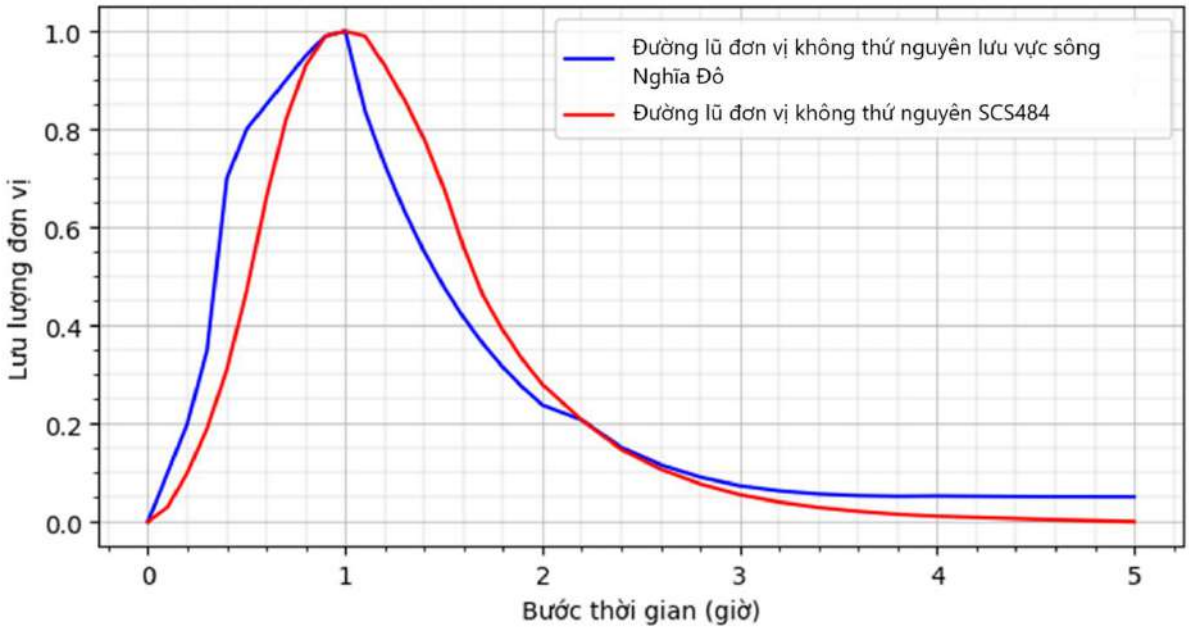


Hình 3 - 9. Kết quả mô phỏng lại trận lũ ngày 21/8/2022

Dựa trên đường quá trình lũ đơn vị khôi phục, nghiên cứu tính toán mô phỏng lại trận lũ ngày 21/8/2022, kết quả được thể hiện trong Hình 3 - 9.

3. Kết quả xây dựng đường quá trình lũ đơn vị không thứ nguyên

Đường quá trình lũ đơn vị không thứ nguyên là đường quá trình lũ ứng với vị trí đạt đỉnh lũ thì lưu lượng đơn vị đỉnh lũ và thời gian đều có giá trị là 1. Do vậy, có thể thể hiện như Hình 3 - 10:



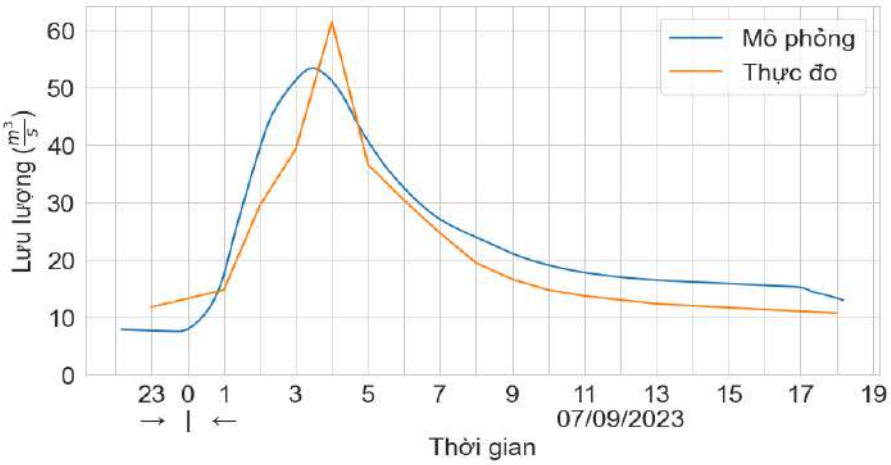
Hình 3 - 10. Đường quá trình lũ đơn vị không thứ nguyên lưu vực sông Nghĩa Đô

Từ các kết quả trên, bộ tham số áp dụng cho lưu vực sông Nghĩa Đô gồm hệ số tổn thất thấm ban đầu $\lambda = 0,1$ (giá trị bình quân của 16 trận lũ) và đường quá trình lũ đơn vị thời đoạn 1 giờ khôi phục từ trận lũ ngày 21/8/2022, được chuyển về dạng không thứ nguyên để áp dụng cho mọi lưu vực ô lưới theo thời gian đạt đỉnh của từng lưu vực.

3.2.5. Kiểm định mô hình SCS

1. Trận lũ ngày 07/09/2023

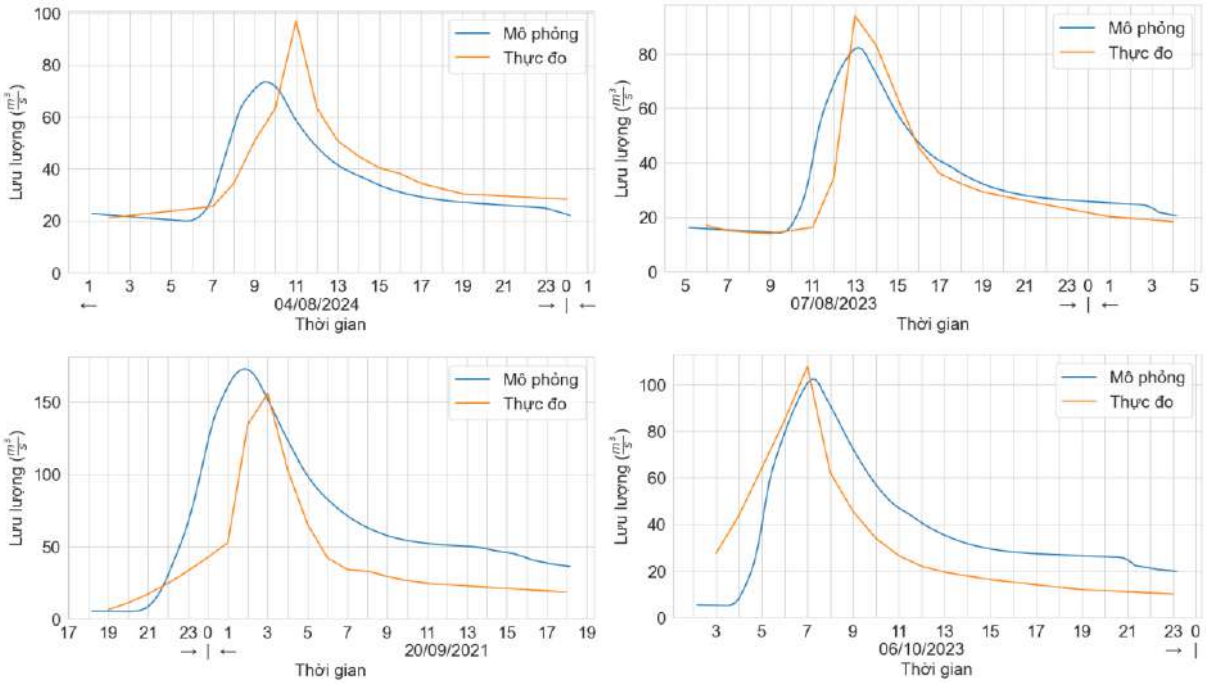
Sử dụng đường quá trình lũ đơn vị không thứ nguyên lưu vực sông Nghĩa Đô và mô phỏng lại trận lũ ngày 7/9/2023 ta được kết quả như sau:



Hình 3 - 11. Kết quả mô phỏng lại đường quá trình lưu lượng ngày 7/9/2023

Dựa trên Hình 3 - 9 và Hình 3 - 11 cho thấy, giai đoạn hiệu chỉnh (trận 21/8/2022) đạt NASH tới 0,95 – do chính bộ thông số của trận này được dùng để dựng ngược đường quá trình đơn vị. Ở giai đoạn kiểm định, NASH của trận 7/9/2023 đạt 0,813. Như vậy, bộ thông số mô hình tự xây dựng dựa trên phương pháp SCS-CN có cơ sở đảm bảo trong tính toán thủy văn cho lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai.

2. Một số trận lũ khác



Hình 3 - 12. Kết quả mô phỏng một số trận lũ trong khoảng thời gian từ năm 2021÷2024 trên lưu vực sông Nghĩa Đô.

Các kết quả mô phỏng thủy văn cho thấy có sự tương đồng về số liệu mô phỏng và số liệu thực đo, tuy nhiên đường quá trình thực đo có dạng gấp khúc theo từng giờ

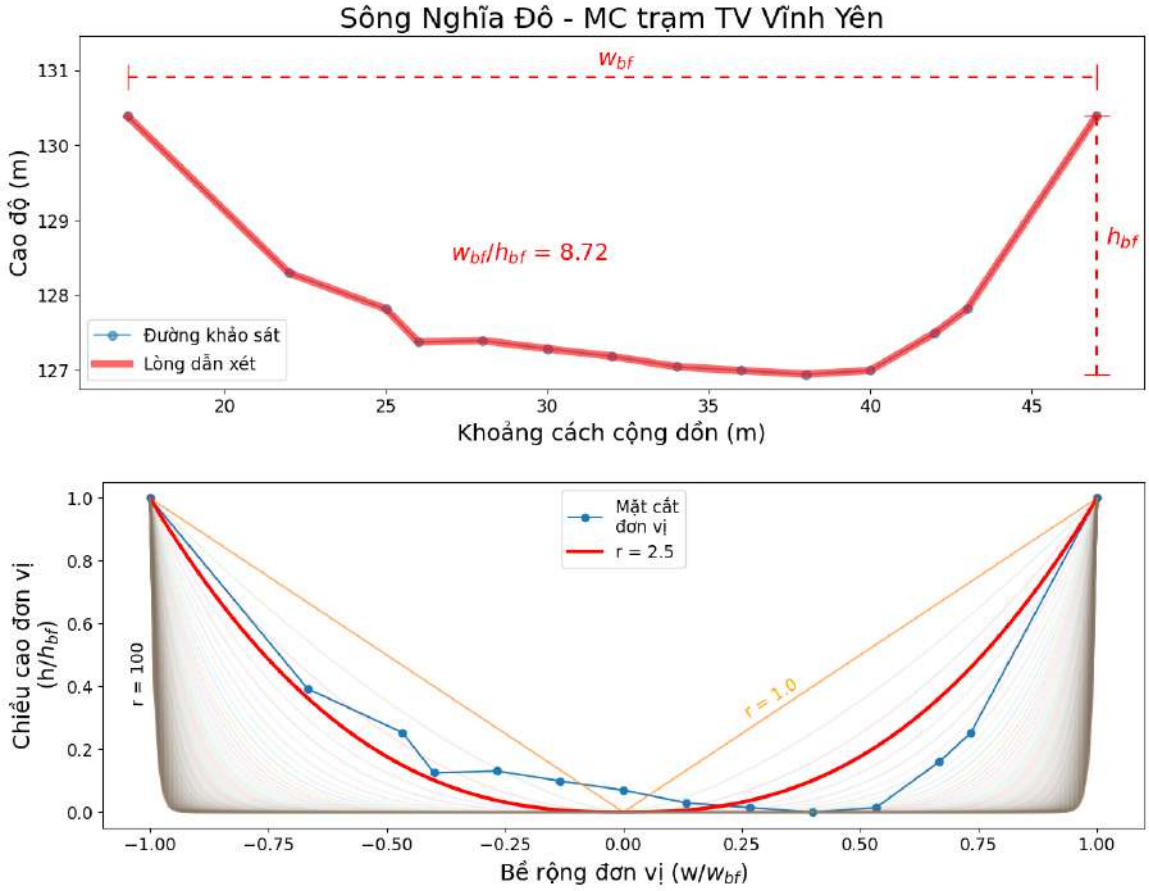
do mực nước tại trạm Vĩnh Yên trong các trận lũ này được quan trắc dày: trận 20/9/2021 và 6/10/2023 quan trắc 1 giờ/lần trong suốt con lũ, trận 7/8/2023 quan trắc 1 hoặc 2 giờ/lần; mực nước được quy đổi sang lưu lượng qua quan hệ Q = f(H) và chỉ được nội suy về bước giờ ở thời kỳ nước thấp trước và sau lũ, khi trạm quan trắc 6 giờ/lần. Ngoài ra, các trạm quan trắc mưa có thể không ghi nhận đầy đủ được dữ liệu mưa thực tế trên lưu vực (do khu vực miền núi có sự biến đổi cục bộ lớn về địa hình) cũng là một trong những nguyên nhân gây ra sự khác biệt giữa kết quả mô phỏng và dữ liệu quan trắc lưu lượng.

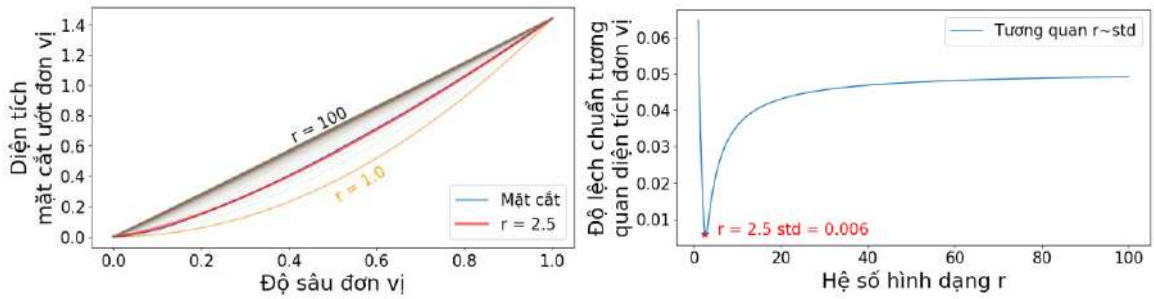
Với trận lũ ngày 09/09/2024, chuỗi lưu lượng thực đo theo giờ đầy đủ cho phép đánh giá chi tiết theo lưu lượng đỉnh, thời gian đạt đỉnh và tổng lượng dòng chảy; nội dung này được trình bày ở phần mô phỏng trận lũ ngày 09/09/2024.

3.3. Xác định đặc trưng lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai

3.3.1. Đặc trưng mặt cắt tại trạm thủy văn Vĩnh Yên

Tại khu vực nghiên cứu, số liệu mặt cắt ngang bình quân 03 năm tại trạm thủy văn Vĩnh Yên đã được thu thập (2017, 2018 và 2019) nhằm phân tích đặc trưng mặt cắt đại diện cho lưu vực sông Nghĩa Đô.





Hình 3 - 13. Phân tích đặc trưng mặt cắt ngang trạm thủy văn Vĩnh Yên

Mặt cắt trạm thủy văn Vĩnh Yên có hệ số đặc trưng mặt cắt r = 2,5. Hệ số này lớn hơn một chút so với hệ số bình quân được phân tích bình quân từ 132 mặt cắt khu vực miền núi phía Bắc ở trong Chương 2. Bên cạnh đó, hệ số k = 8,72 cũng lớn hơn một chút so với bình quân đã phân tích. Nhìn chung, hình dạng mặt cắt tại trạm thủy văn Vĩnh Yên khá tương đồng so với các mặt cắt đã đánh giá, và phù hợp với đặc trưng của khu vực miền núi phía Bắc.

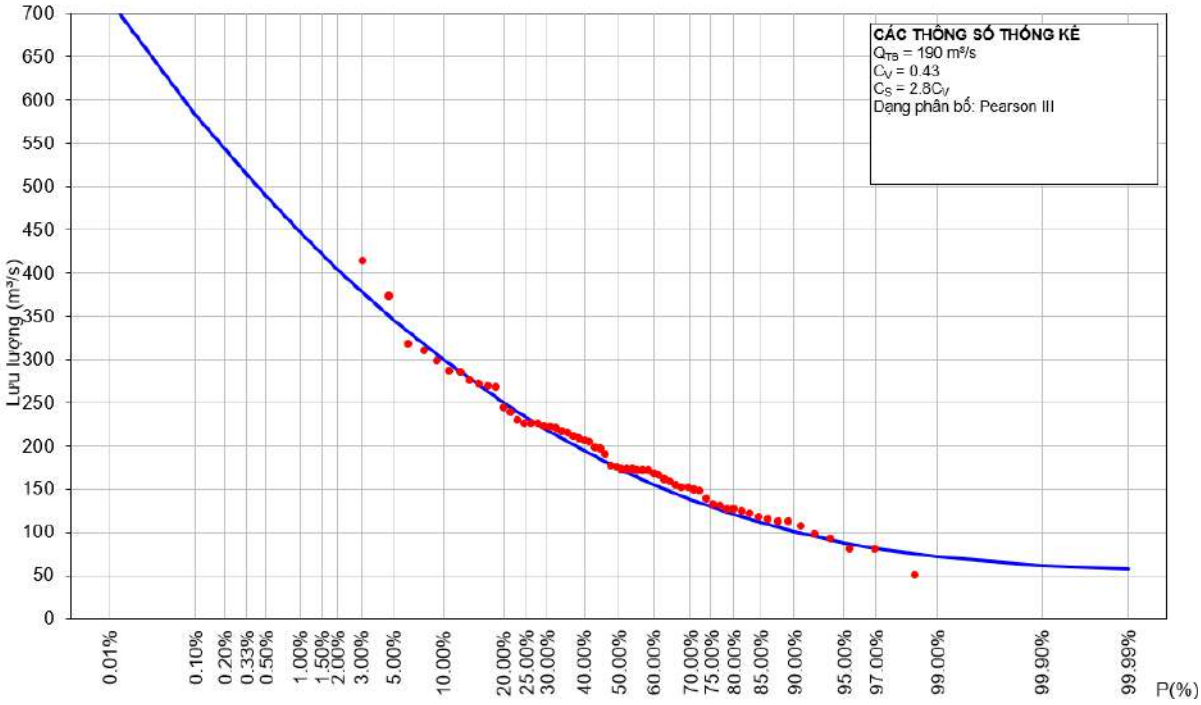
3.3.2. Đặc trưng lưu lượng tràn bờ tại trạm thủy văn Vĩnh Yên và độ nhám

Lưu lượng tràn bờ là một trong những tham số quan trọng của mặt cắt ngang, mặc dù chỉ là một giá trị mang tính ước lượng, nhưng giá trị này có thể giúp xác định được các đặc trưng trên sông suối một cách tương đối trong điều kiện thiếu số liệu đo đạc hình thái mặt cắt. Với mục tiêu có thể ước tính tham số tại mọi vị trí trên khu vực nghiên cứu, việc đưa ra công thức tổng quát của lưu lượng tràn bờ cho khu vực là rất quan trọng để có thể áp dụng vào các vị trí không có số liệu.

Để có thể xác định công thức tổng quát về lưu lượng tràn bờ cho một khu vực cụ thể, thông thường phương pháp khảo sát là đơn giản và hiệu quả nhất. Tuy nhiên việc này gây ra chi phí rất lớn, đặc biệt nếu áp dụng cho một khu vực rộng lớn (như phạm vi toàn tỉnh hoặc khu vực miền núi phía Bắc).

Trong dự án lũ quét của Bộ Tài nguyên và Môi trường [170], một số công thức về quan hệ giữa lưu lượng tràn bờ và các tham số bao gồm diện tích lưu vực, độ dốc lưu vực và lượng mưa trung bình năm được xây dựng. Bên cạnh đó, có thể ước tính lưu lượng tràn bờ dựa vào mặt cắt tính toán và tần suất 50% về lưu lượng.

Thông thường, khi không có số liệu về địa hình mà có số liệu quan trắc lưu lượng dài hạn, lưu lượng ứng với tần suất xuất hiện hai năm một lần (50%) được khuyến nghị [42]. Giá trị này là 174,0 m^3/s đối với trạm thủy văn Vĩnh Yên. Trong khi đó, do có cả số liệu về mặt cắt ngang, lưu lượng tràn bờ ước tính từ mặt cắt kết hợp quan hệ tần suất tại trạm thủy văn Vĩnh Yên ở mức 158,20 m^3/s, hơi thấp hơn giá trị theo tần suất 50%.



Hình 3 - 14. Đường tần suất lưu lượng đỉnh lũ (Qmax) trạm thủy văn Vĩnh Yên – Số liệu chi tiết trong phụ lục II.

Mặt cắt ngang tại trạm thủy văn Vĩnh Yên có cao trình đáy +126,95 m và cao trình tràn bờ (đỉnh bờ) +130,39 m; theo đó chiều sâu tràn bờ H_{bf} = 3,44 m, bề rộng tràn bờ W_{bf} = 30,00 m (tỷ số k = 8,72) và diện tích mặt cắt ướt tại mức tràn bờ khoảng 74,5 m². Hệ số nhám được hiệu chỉnh sao cho mô hình tái hiện được lưu lượng tràn bờ Q50% ≈ 174 m³/s tại mực nước tràn bờ này, cho giá trị n ≈ 0,095; vận tốc trung bình mặt cắt tương ứng khoảng 2,3 m/s. Với bộ tham số đó, các đặc trưng tính từ công thức (2-21) và (2-25) – diện tích, vận tốc, chiều sâu và bề rộng tràn bờ – gần như trùng với giá trị tính trực tiếp từ mặt cắt khảo sát (H_{bf} ≈ 3,44 m; W_{bf} ≈ 30,00 m), cho thấy phép quy đổi mặt cắt theo hai tham số r, k là phù hợp. Hệ số nhám n ≈ 0,095 tuy cao hơn mức thường gặp ở lòng dẫn sạch nhưng phù hợp với đặc điểm lòng dẫn nhiều cuội tảng của suối miền núi.

Bảng 3 - 8. Đối chiếu đặc trưng mặt cắt tại mực tràn bờ – trạm thủy văn Vĩnh Yên

Đặc trưng	**Ký hiệu**	**Tính trực tiếp từ mặt cắt khảo sát**	**Tính từ công thức quy đổi (r = 2,5; k = 8,72)**
Chiều sâu tràn bờ	H_{bf}	3,44 m	3,44 m
Bề rộng tràn bờ	W_{bf}	30,00 m	30,0 m
Diện tích mặt cắt ướt	A	74,5 m²	73,7 m²
Vận tốc trung bình (ứng Q_{50}% = 174 m³/s)	v	2,34 m/s	2,36 m/s

Với bộ tham số đó, các đặc trưng tính từ công thức (2-21) và (2-25) gần như trùng với giá trị tính trực tiếp từ mặt cắt khảo sát (Bảng 3 - 8), cho thấy phép quy đổi mặt cắt theo hai tham số r, k là phù hợp.

Các ước tính về lưu lượng tràn bờ dựa trên các kết quả nghiên cứu trên khu vực miền núi phía Bắc được thể hiện như sau (lưu vực suối Nghĩa Đô có diện tích lưu vực là 135,57 km²; lượng mưa trung bình nhiều năm (từ 2021÷2024) là 2.410mm; độ dốc lòng dẫn là 1,57%; hệ số hình dạng mặt cắt là r = 2,5; và tỷ số k = 8,72):

Bảng 3 - 9. Quan hệ Q_{bf} và các đặc trưng

Công thức	R^2	Khu vực áp dụng	Q_{bf} tại Vĩnh Yên (m^3/s)	H_{bf} (m)	W_{bf} (m)
$Q = 2{,}44A^{0{,}844}$	0,616	Toàn quốc	153,79	3,26	28,46
$Q = 3{,}60A^{0{,}765}$	0,600	KV phía Bắc	153,96	3,26	28,47
$Q = 6{,}01A^{0{,}768}$	0,724	Đông Bắc & Việt Bắc	260,84	3,98	34,69
$Q = 2{,}27A^{0{,}721}$	0,536	Tây Bắc	78,22	2,53	22,08
$Q = 12{,}45A^{0{,}53}$	-	Nậm Ly & Nà Nhùng	167,96	3,37	29,41
$Q = 18A^{0{,}79}S^{0{,}4}$	0,670	Toàn quốc	165,18	3,35	29,23
$Q = 15A^{0{,}76}S^{0{,}33}$	0,602	KV phía Bắc	158,90	3,30	28,81
$Q = 20A^{0{,}778}S^{0{,}45}$	0,796	Đông Bắc & Việt Bắc	140,58	3,16	27,52
$Q = 15A^{0{,}777}S^{0{,}47}$	0,537	Tây Bắc	96,55	2,74	23,90
$Q = 10{,}749A^{0{,}493}S^{-0{,}121}$	-	Nậm Ly & Nà Nhùng	199,91	3,60	31,40
$Q = 0{,}31A^{0{,}9}R^{1{,}9}$	0,725	Toàn quốc	136,82	3,12	27,24
$Q = 0{,}261A^{0{,}9}R^{2}$	0,737	KV phía Bắc	125,30	3,02	26,35
$Q = 0{,}44A^{0{,}9}R^{1{,}4}$	0,810	Đông Bắc & Việt Bắc	125,09	3,02	26,34
$Q = 0{,}38A^{0{,}9}R^{3{,}1}$	0,768	Tây Bắc	481,93	5,01	43,67
Theo tần suất 50% về lưu lượng (64 năm dữ liệu)			174,00	3,42	29,81
Theo giá trị mặt cắt tính toán			158,20	3,30	28,76

Kết quả đánh giá cho thấy công thức tương quan xây dựng cho khu vực Nậm Ly & Nà Nhùng của Nguyễn Thế Toàn (2023) [109] cho lưu vực Nậm Ly & Nà Nhùng có kết quả khá phù hợp với giá trị lưu lượng tràn bờ tần suất 50% và hình dạng mặt cắt ngang tại trạm thủy văn Vĩnh Yên.

Giá trị lưu lượng tràn bờ là một giá trị tương đối, một số nghiên cứu [165] yêu cầu phải xác định trên nhiều mặt cắt để có thể loại bỏ được những đặc điểm mang tính cục bộ, giúp tăng cường độ tin cậy của lưu lượng tràn bờ. Một số các nghiên cứu cũng đã sử dụng phương pháp khảo sát để xây dựng biểu thức tương quan [109], tuy nhiên trong điều kiện không có số liệu đầy đủ về mặt cắt khảo sát, công thức tổng quát mang tính phù hợp với khu vực áp dụng dựa trên các nghiên cứu trước đây và đặc điểm mặt cắt đại

diện tại khu vực nghiên cứu được lựa chọn để áp dụng. Do đó trong luận án, công thức $Q = 12{,}45A^{0{,}53}$ được lựa chọn để làm cơ sở tính toán lưu lượng tràn bờ theo không gian các vị trí trên khu vực nghiên cứu.

3.3.3. Kết quả xác định các đặc trưng lưu vực sông Nghĩa Đô, tỉnh Lào Cai

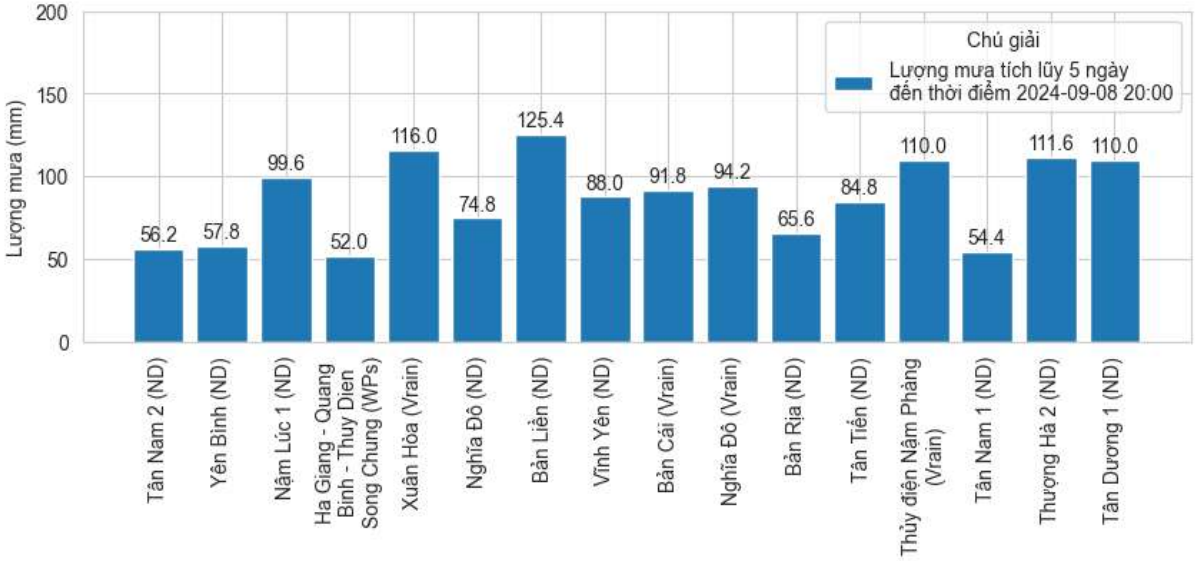
Như vậy, các đặc trưng sẽ được áp dụng trong tính toán nguy cơ lũ quét sông Nghĩa Đô bao gồm hệ số nhám n, hệ số hình dạng mặt cắt r, tỷ số bề rộng tràn bờ và chiều sâu tràn bờ k, và đặc trưng lưu lượng tràn bờ được thể hiện trong bảng sau:

Bảng 3 - 10. Tổng hợp tham số phục vụ tính toán nguy cơ lũ quét lưu vực sông Nghĩa Đô

TT	Đặc trưng	Ký hiệu	Giá trị/công thức	Ghi chú
1	Độ nhám (manning)	n	0,095	Thiên lớn.
2	Hệ số hình dạng mặt cắt	r	2,5	Phù hợp
3	Tỷ số bề rộng tràn bờ và chiều sâu tràn bờ	k	8,72	Phù hợp
4	Lưu lượng tràn bờ	Q_{bf}	$Q_{bf} = 12{,}45A^{0{,}53}$	A: diện tích lưu vực (km²). Q_{bf}: lưu lượng tràn bờ (m³/s).

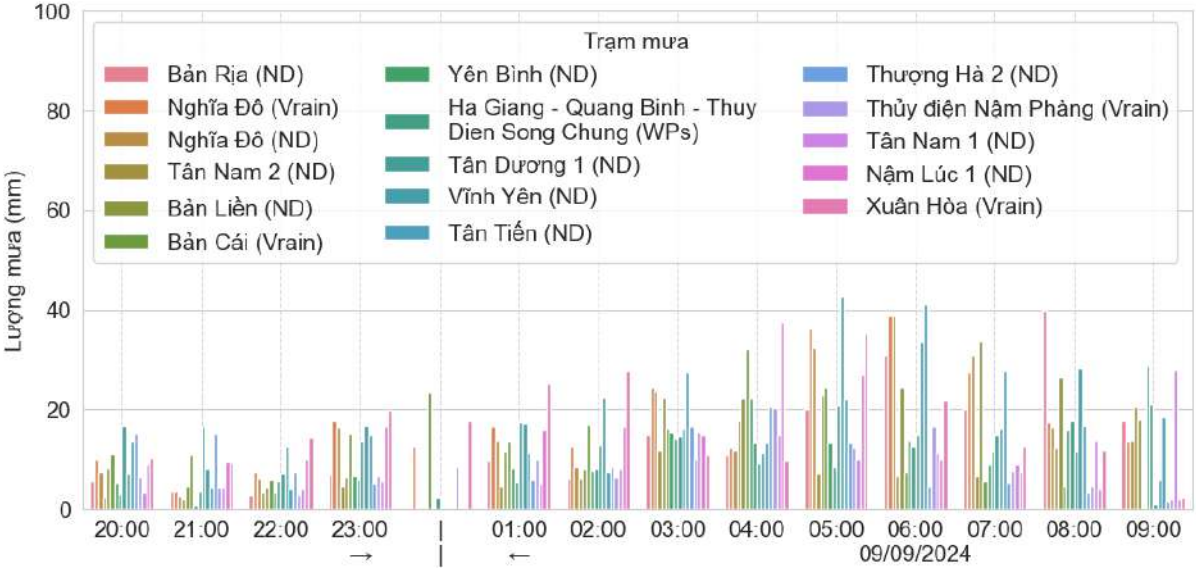
3.4. Xây dựng bản đồ nguy cơ lũ quét trận lũ ngày 09/09/2024

3.4.1. Kết quả mô phỏng dòng chảy lũ tại trạm thủy văn Vĩnh Yên



Hình 3 - 15. Lượng mưa tích lũy 5 ngày tại các trạm trên toàn lưu vực

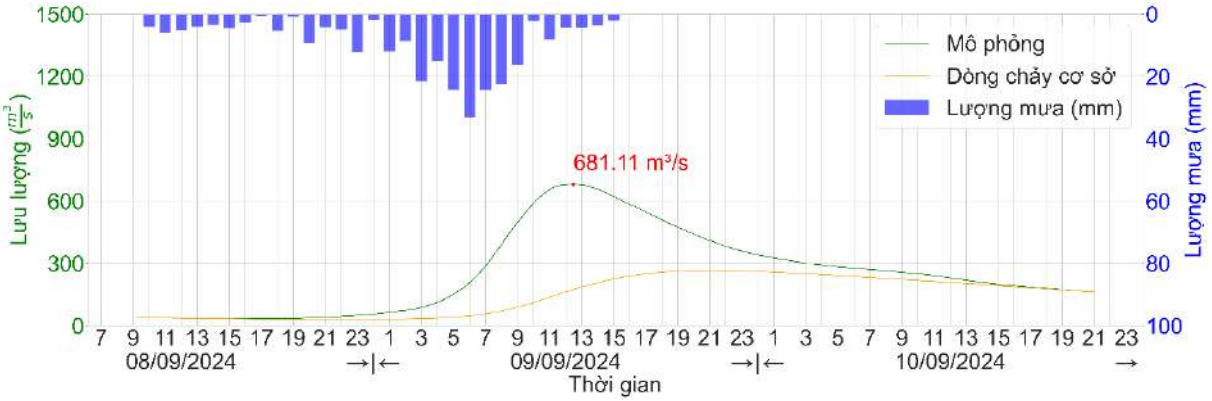
Đến thời điểm 20:00 ngày 08/09/2024, lượng mưa tích lũy tại các trạm là khá cao, trên lưu vực có các trạm Tân Tiến, Bản Rịa, Nghĩa Đô ở mức lớn hơn 65mm. Trạng thái này cho thấy độ ẩm kỳ trước trên khu vực là cao. Đây cũng là trận lũ mà lượng mưa được ghi nhận ở rất nhiều trạm, trong đó có tới 4 trạm nằm trong khu vực nghiên cứu (02 trạm Nghĩa Đô nguồn Vrain và đo mưa nhân dân).



Hình 3 - 16. Lượng mưa giờ tại các trạm ngày 09/09/2024

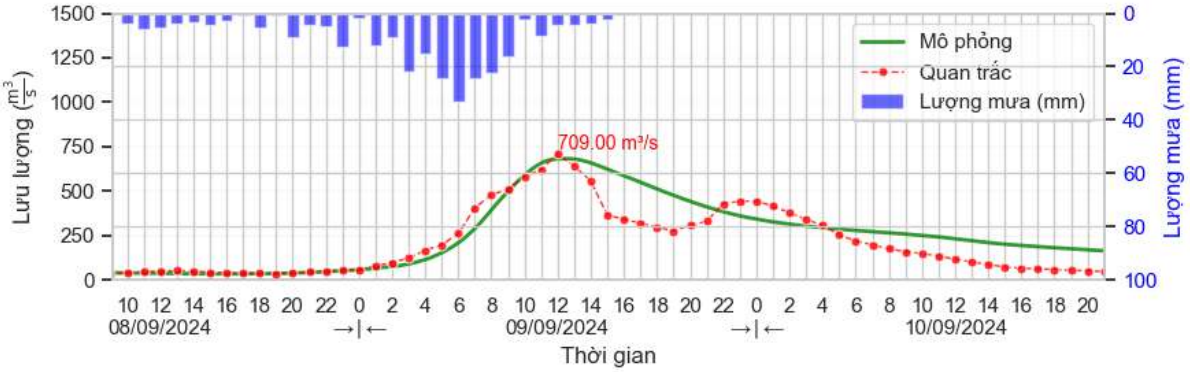
Thời gian tập trung mưa lớn nhất từ lúc 03:00 ÷ 9:00 sáng ngày 09/09/2024. Toàn bộ các trạm đo mưa đều ghi nhận dữ liệu rất lớn, dao động mức trung bình từ 10÷20mm/giờ. Mưa liên tục trong khoảng thời gian này đã gây ra lũ lớn trên sông Nghĩa Đô. Theo số liệu công bố, lúc 15:00 ngày 08/09/2024, mực nước tại suối Nghĩa Đô tương ứng là +128,65m [187] (tương đương lưu lượng chỉ khoảng 42m³/s), mực nước lớn nhất

ghi nhận tại suối Nghĩa Đô tại Vĩnh Yên đạt +134,30m (lúc 12:00), mức này thấp hơn mức lũ lịch sử thiết lập năm 2018 là +134,44m (tương ứng với lưu lượng ghi nhận là 721m³/s).



Hình 3 - 17. Kết quả mô phỏng dòng chảy tại trạm thủy văn Vĩnh Yên 09/09/2024

Kết quả mô phỏng cho thấy đỉnh lũ xuất hiện lúc 12:30, tương đồng so với đỉnh lũ quan trắc. Hình 3 - 18 dưới đây thể hiện kết quả so sánh giữa tính toán mô phỏng và lưu lượng thực đo tại trạm thủy văn Vĩnh Yên trong trận lũ 09/09/2024.



Hình 3 - 18. So sánh kết quả mô phỏng và kết quả quan trắc 09/09/2024

Về lưu lượng đỉnh, mô hình cho 681,11 m³/s, thấp hơn giá trị thực đo 709 m³/s là 3,9 %; đỉnh lũ mô phỏng xuất hiện lúc 12:30 ngày 09/09/2024, trễ 30 phút so với thực đo. Tổng lượng con lũ chính từ 10:00 ngày 08/09 đến 19:00 ngày 09/09 đạt 29,53 triệu m³, lớn hơn thực đo (27,04 triệu m³) 9,2 %, và hệ số NASH theo giờ đạt 0,73. Mô hình chưa tái hiện được con lũ thứ hai (442 m³/s lúc 23:00 ngày 09/09) và cho nhánh nước rút cao hơn thực đo; vì vậy, khi tính cho cả đợt đến 21:00 ngày 10/09, tổng lượng mô phỏng lớn hơn thực đo 17,7 % (bảng dưới đây).

Bảng 3 - 11. Lưu lượng đỉnh, thời gian đạt đỉnh và tổng lượng dòng chảy tại trạm Vĩnh Yên, trận lũ ngày 09/09/2024

Chỉ tiêu	Thực đo	Mô phỏng	Sai lệch
Lưu lượng đỉnh (m^3/s)	709,00	681,11	-3,9 %
Thời điểm đạt đỉnh	12:00 09/09/2024	12:30 09/09/2024	trễ 30 phút
Tổng lượng con lũ chính, 10:00 08/09 đến 19:00 09/09 (triệu m^3)	27,04	29,53	+9,2 %
Tổng lượng cả đợt, 10:00 08/09 đến 21:00 10/09 (triệu m^3)	46,77	55,05	+17,7 %
Hệ số NASH theo giờ		0,73	

Sự kiện lũ quét này xảy ra vào thời điểm sáng ngày 09/09, khi hoàn lưu cơn bão số 03 (Yagi) đang gây mưa lớn trên diện rộng cả khu vực miền Bắc, tuy nhiên trận lũ này chưa gây thiệt hại về người trên khu vực nghiên cứu.

Kết quả tính toán cho thấy, nguy cơ lũ quét cao đã xảy ra ở dọc suối chính Nghĩa Đô, bắt đầu từ gần cuối xã Tân Tiến (suối Nậm Bắt) và quét qua xã Nghĩa Đô, xã Vĩnh Yên. Công suất đơn vị tại khu vực trạm thủy văn Vĩnh Yên ≈ 3.900W/m² với vận tốc đạt cực đại khoảng 3,96m/s và độ sâu mực nước tính toán ≈ 7,02m. Tương ứng với cao trình đáy mặt cắt là +126.95m có thể xác định được cao trình mực nước đạt ≈133,97m (thấp hơn giá trị đo thực tế là 0,33m). Mặc dù ở lưu lượng tràn bờ, mực nước đạt gần giá trị như nhau trong quá trình mô phỏng, tuy nhiên ở lưu lượng lớn hơn nhiều lần lưu lượng tràn bờ, cao trình mực nước lại có sự chênh lệch đáng kể, sự khác biệt này có thể được lý giải bởi một số nguyên nhân sau:

- Thứ nhất là sự mô phỏng về vận tốc trong công thức manning: một số nghiên cứu [188, 189] đã chỉ ra rằng, có một loại "lực cản hình dạng" trong các sông suối miền núi có thể chiếm tới 40% tổng lực cản dòng chảy, điều này chưa được xét trong phương trình manning. Do đó, việc tăng cường lực cản có thể được xem xét tương đương với sự suy giảm vận tốc dẫn đến diện tích mặt cắt ướt tăng trong cùng điều kiện lưu lượng và độ dốc.
- Thứ hai là hình dạng mặt cắt quy đổi: với sự quy đổi về mặt cắt về mặt cắt tiêu chuẩn thông qua hệ số hình dạng r có thể gây ra những sai số nhỏ trong tính toán.
- Thứ ba là phần mặt cắt xét khi vượt cao trình tràn bờ có ảnh hưởng đến quá trình tính toán các tham số do sự không chắc chắn của phần cao trình bãi.
- Thứ tư là việc mô phỏng thủy văn để ước tính các tham số sẽ có độ tin cậy thấp hơn bằng quá trình mô phỏng dòng chảy bằng thủy lực do được xét một cách đầy đủ về truyền lũ trong sông. Đặc biệt mô hình thủy lực có thể xem xét đủ các yếu tố bao gồm chuỗi mặt cắt, phân loại độ nhám lòng dẫn và độ nhám bãi (hoặc nhám theo cao trình).
- Thứ năm là sự sai khác giữa giá trị lưu lượng mô phỏng so với giá trị thực tế: Kết

quả tính toán cho thấy giá trị lớn nhất đạt 681,11m³/s, trong khi giá trị quan trắc thực tế là 709m³/s.

- Thứ sáu là sự khác nhau về hình dạng lũ cho thấy, giá trị lưu lượng thực đo phát hiện trận lũ liền kề, trong khi đó kết quả mô phỏng không phát hiện được. Điều này được lý giải sự hạn chế của mô hình thông số tập trung so với các mô hình thông số bán phân bố và phân bố. Việc trung bình hóa lượng mưa trên toàn lưu vực có tác động trực tiếp đến kết quả mô phỏng. Nếu một khu vực mưa cục bộ lớn, lượng mưa bình quân toàn lưu vực nhỏ sẽ không sinh được đỉnh lũ thứ 2 trong khi nếu xét ở mô hình bán phân bố, điều này sẽ được thể hiện thông qua quá trình truyền lũ giữa các tiểu lưu vực.

Các nguyên nhân trên là một trong những các nguyên nhân chính gây ra sự khác biệt về kết quả tính toán mô phỏng và thực đo, mặc dù vậy trong mô phỏng thủy văn và các tham số trong trận lũ này vẫn có sự phù hợp nhất định giúp ước tính các tham số dòng chảy lũ phục vụ tính toán nguy cơ lũ quét.

3.4.2. Kết quả xác định nguy cơ lũ quét cho toàn bộ trận lũ

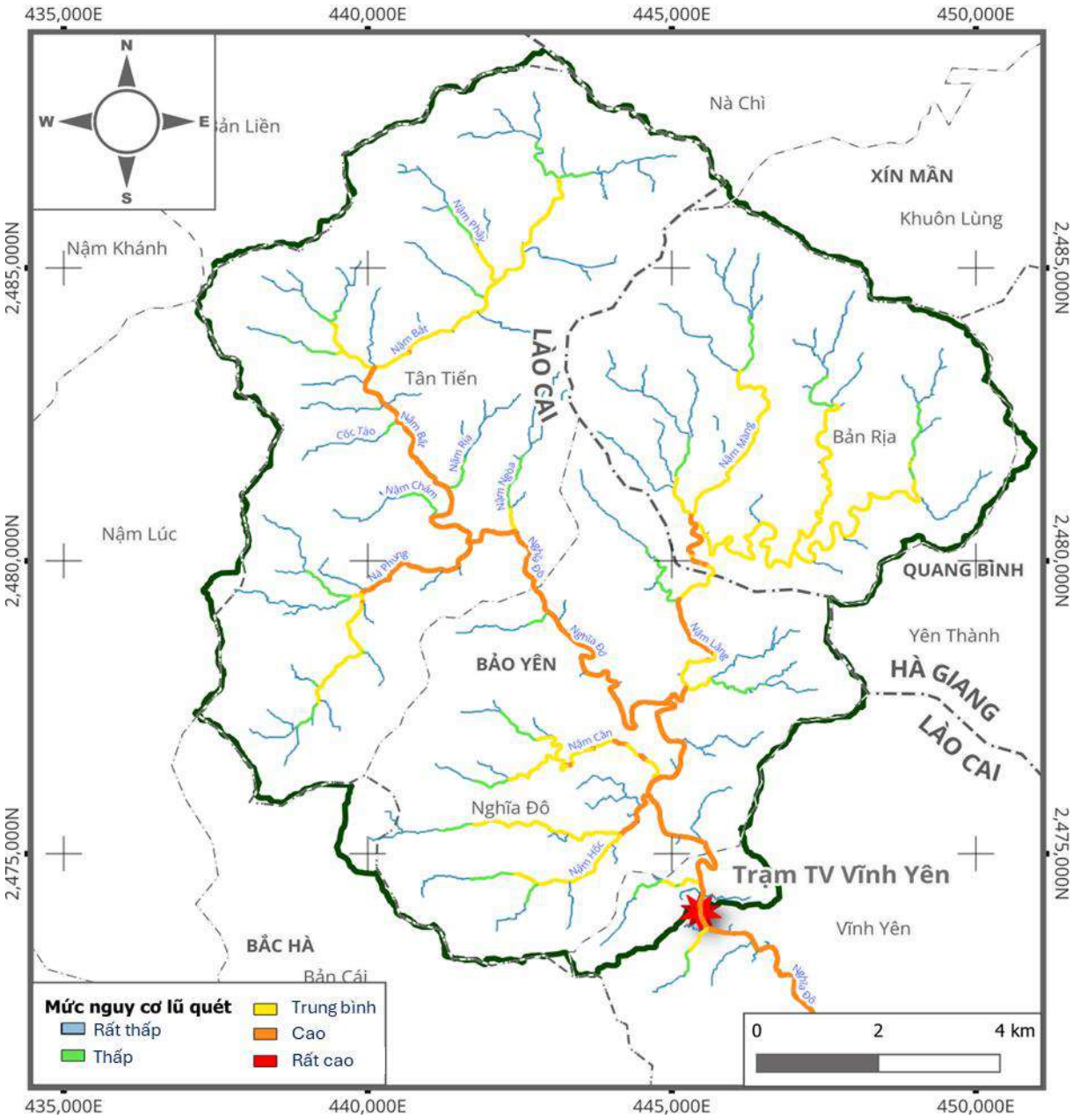
Tại mọi vị trí trên khu vực nghiên cứu đều được mô phỏng đường quá trình lưu lượng, công suất đơn vị dòng chảy, vận tốc dòng chảy và độ sâu mực nước lớn nhất. Trên nhánh suối Nậm Bắt (thượng nguồn sông Nghĩa Đô – đi qua khu vực xã Tân Tiến), lũ quét có nguy cơ cao bắt đầu từ nhập lưu suối Nậm Rịa, lưu lượng tại vị trí này đạt 155,20m³/s; công suất đơn vị dòng chảy là ≈ 2.300W/m², độ sâu mực nước là 3,27m với vận tốc 3,26m/s.

Phía Bản Rịa, lũ quét có nguy cơ cao bắt đầu xuất hiện ở nhánh suối Nậm Lằng. Lưu lượng tại đầu suối đạt 179,30m³/s; công suất đơn vị dòng chảy là ≈ 2.100W/m², độ sâu mực nước là 3,66m với vận tốc đạt ≈ 3,15m/s. Các nhánh thượng nguồn khu vực xã Bản Rịa chỉ xuất hiện mức nguy cơ thấp và trung bình do chưa tích lũy đủ năng lượng dòng chảy. Dọc suối chính Nghĩa Đô (bắt đầu thuộc phạm vi xã Nghĩa Đô), công suất đơn vị dòng chảy dao động từ 2.700W/m² đến ≈ 3.200W/m², vận tốc từ 3,5m/s đến ≈ 4,0m/s. Bản đồ nguy cơ lũ quét trận lũ 09/09/2024 thể hiện như Hình 3 - 19 (thể hiện nguy cơ lớn nhất tại từng vị trí – không đồng bộ về mặt thời gian)

Theo kết quả phân cấp, khu vực nghiên cứu không xuất hiện lũ quét lớn (do vận tốc lớn nhất trên khu vực tính toán chỉ đạt ≈ 4,0m/s). Các nhánh suối thượng nguồn có phân cấp hầu hết chỉ là nguy cơ lũ quét rất thấp và thấp. Một số khu vực được phân cấp là lũ nhanh thường có diện tích lưu vực đạt từ 3km² trở lên.

Vận tốc tại các nhánh suối thượng nguồn đều nhỏ hơn 2,0m/s, mặc dù có độ dốc lòng dẫn lớn hơn, vận tốc được tính toán theo công thức còn phụ thuộc cả vào độ sâu mực nước. Tại các khu vực này, mực nước chỉ đạt khoảng dưới 0,5m. Lòng dẫn suối Nghĩa Đô có vận tốc từ 3,0÷4,0m/s, các nhánh suối Nậm Bắc và Nậm Lằng có vận tốc

dao động từ 2,0÷3,5m/s.

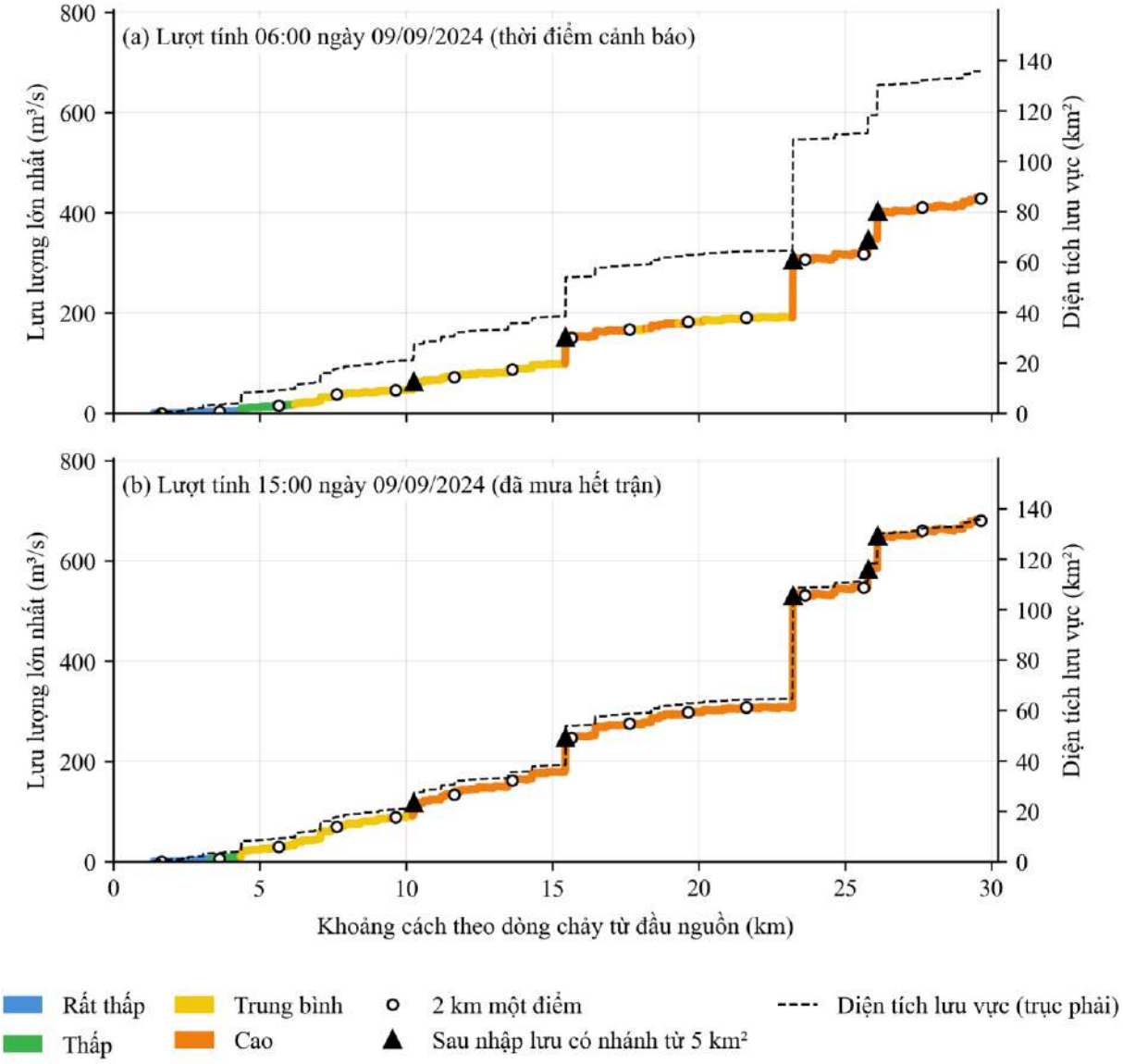


Hình 3 - 19. Bản đồ nguy cơ lũ quét ngày 09/09/2024 khu vực suối Nghĩa Đô

Do lượng mưa trên lưu vực ngày 09/09/2024 ghi nhận ở hầu hết các trạm, nên có xu hướng phân bố khá đồng đều, kết quả tính toán nguy cơ lũ quét có xu hướng tăng dần về hạ lưu. Trong một số trường hợp, nếu lượng mưa phân bố không đồng đều thì chỉ những nhánh suối có lượng mưa phát sinh mới bị nguy cơ lũ quét, khi đó càng về hạ lưu, lượng mưa bình quân của toàn bộ lưu vực tính toán sẽ giảm dần (do sự phân bố không đều) nên mặc dù lưu lượng tăng nhưng nguy cơ lũ quét vẫn ở mức thấp.

Để xem xét sự biến đổi của lưu lượng và nguy cơ theo chiều dòng chảy, hình dưới đây thể hiện lưu lượng lớn nhất và cấp nguy cơ dọc nhánh chính dài nhất của lưu vực trạm Vĩnh Yên (29,64 km, tính từ đầu nguồn) cho hai lượt tính ngày 09/09/2024: (a) 06:00, thời điểm cảnh báo ở Hình 3 - 26, và (b) 15:00, khi đã mưa hết trận (bản đồ ở

hình trên); lưu lượng lớn nhất tại các điểm xảy ra ở những thời điểm khác nhau.Ở cả hai lượt, lưu lượng lớn nhất tăng dần theo chiều dòng chảy, với các bậc tăng nhanh tại 5 nhập lưu có nhánh từ 5 km² trở lên, đi cùng bậc tăng diện tích lưu vực; bậc lớn nhất ở nhập lưu nhánh phía Bản Rịa (44,05 km²), nơi lưu lượng lớn nhất của lượt 15:00 tăng từ 306,51 lên 530,12 m³/s. Ngoài các nhập lưu, lưu lượng lớn nhất biến đổi liên tục, không có điểm đột biến.



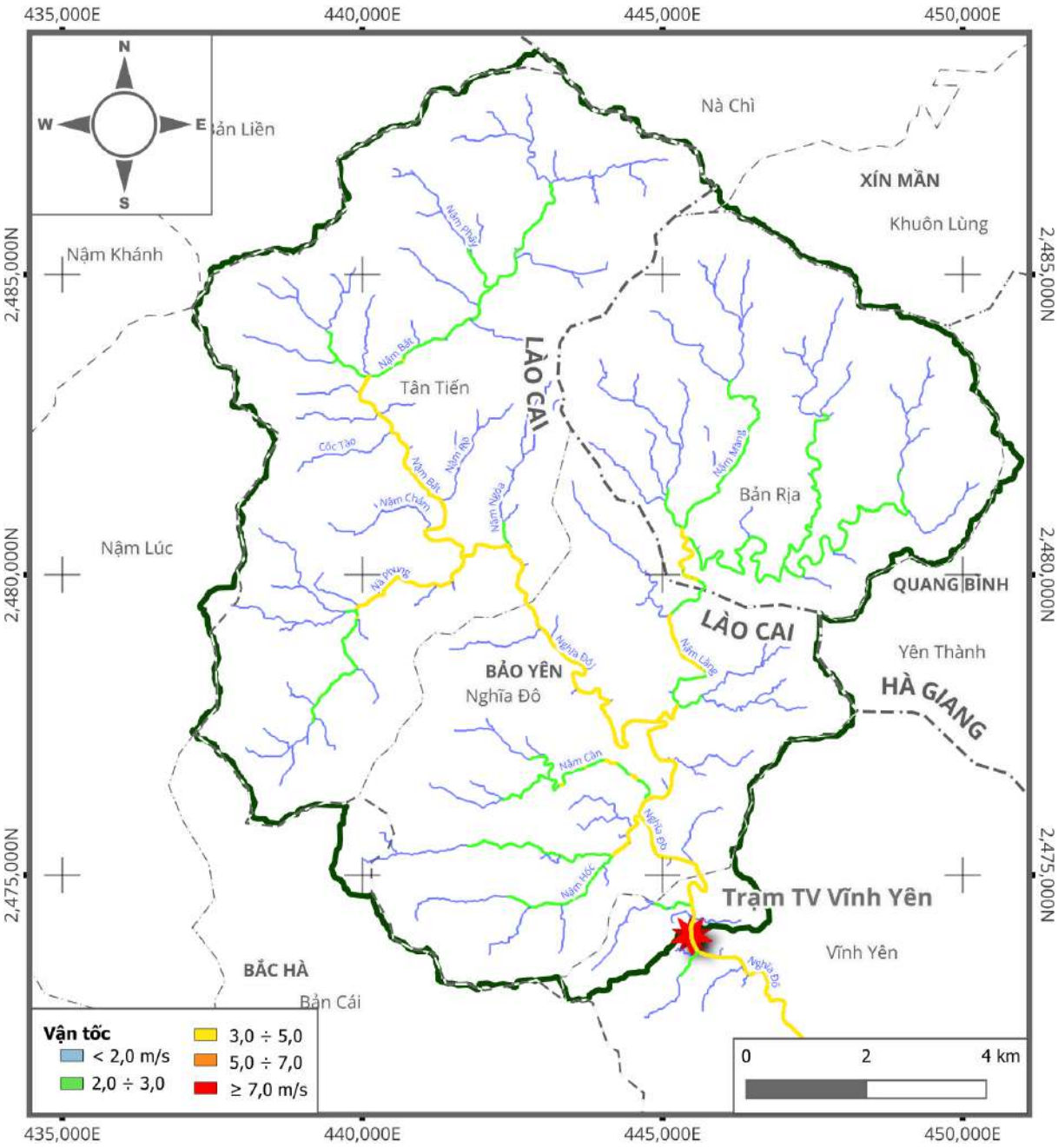
Hình 3 - 20. Lưu lượng lớn nhất và cấp nguy cơ dọc nhánh chính dài nhất của lưu vực trạm Vĩnh Yên, trận lũ ngày 09/09/2024

Ở lượt 06:00, nguy cơ trên dòng chính ngắt quãng. Đoạn ngay sau nhập lưu nhánh 15,47 km² (cách đầu nguồn 15,5 đến 17,9 km, lưu vực 53,78 đến 58,73 km²) ở cấp cao. Xuôi xuống, đoạn từ 20,2 đến 23,2 km trở về cấp trung bình dù lưu vực lớn hơn (63,37 đến 64,45 km²): đoạn này không có nhánh lớn nhập vào nên lưu lượng lớn nhất chỉ tăng từ 184,71 lên 192,25 m³/s, trong khi độ dốc lòng dẫn giảm; công suất đơn vị còn 1.517 đến 1.733 W/m² và vận tốc khoảng 2,94 m/s, nên theo bảng phân cấp nguy cơ (công suất

đơn vị 1.200 ÷ 2.000 W/m², vận tốc 2,0 ÷ 3,0 m/s) xếp cấp trung bình. Từ nhập lưu nhánh phía Bản Rịa trở xuống, lưu lượng lớn nhất tăng lên 304,90 đến 429,59 m³/s, công suất đơn vị 1.931 đến 2.267 W/m², vận tốc khoảng 3,31 m/s, nên trở lại cấp cao. Giữa hai đoạn (17,9 đến 20,2 km), cấp nguy cơ đổi qua lại giữa cao và trung bình vì vận tốc dao động quanh ngưỡng 3,0 m/s. Diễn biến này cho thấy cấp nguy cơ phụ thuộc đồng thời vào lưu lượng, độ dốc lòng dẫn và vận tốc dòng chảy ($\omega = \rho gQS/w$), không đơn thuần tăng theo diện tích lưu vực; điều này phù hợp với các nghiên cứu về biến đổi công suất dòng chảy dọc sông, trong đó công suất không tăng đều về hạ lưu mà thay đổi chủ yếu theo độ dốc [149], [190].

Xét theo quy mô lưu vực, lũ quét là hiện tượng đặc trưng của các lưu vực nhỏ. Khi diện tích lưu vực tăng, mưa phân bố không đều hơn, lượng mưa bình quân trên lưu vực giảm, do đó công suất đơn vị dòng chảy và cấp nguy cơ giảm dần; đây cũng là lý do lũ quét không xuất hiện trên các sông lớn. Các nghiên cứu về lũ lớn cho thấy ứng suất tiếp lớn nhất ở các lưu vực cỡ 10 đến 100 km² [6], công suất dòng chảy thường đạt cực đại ở lưu vực 10 đến 100 km² rồi giảm nhanh về hạ lưu [190], và lũ ở các lưu vực nhỏ có ứng suất tiếp, công suất đơn vị lớn gấp hàng trăm lần lũ trên các sông lớn [7]. Lưu vực trạm Vĩnh Yên (135,57 km²) thuộc cỡ lưu vực phổ biến xảy ra lũ quét ở miền núi; trong trận 09/09/2024, mưa phân bố khá đều trên toàn lưu vực nên ở lượt 15:00, dòng chính từ khoảng 10,2 km trở xuống đều ở cấp cao. Xu hướng nguy cơ tăng dần về hạ lưu trên bản đồ của trận lũ này phản ánh đặc điểm của lưu vực và trận mưa cụ thể, không phải quy luật tăng theo diện tích. Khi áp dụng trên phạm vi toàn quốc, tại hạ du các sông lớn, độ dốc lòng dẫn nhỏ, lòng dẫn rộng và lượng mưa bình quân lưu vực giảm, nên công suất đơn vị $\omega = \rho gQS/w$ tính theo cách tiếp cận của luận án không thể đạt giá trị cao; bản đồ nguy cơ vì vậy phản ánh đúng bản chất của lũ quét.

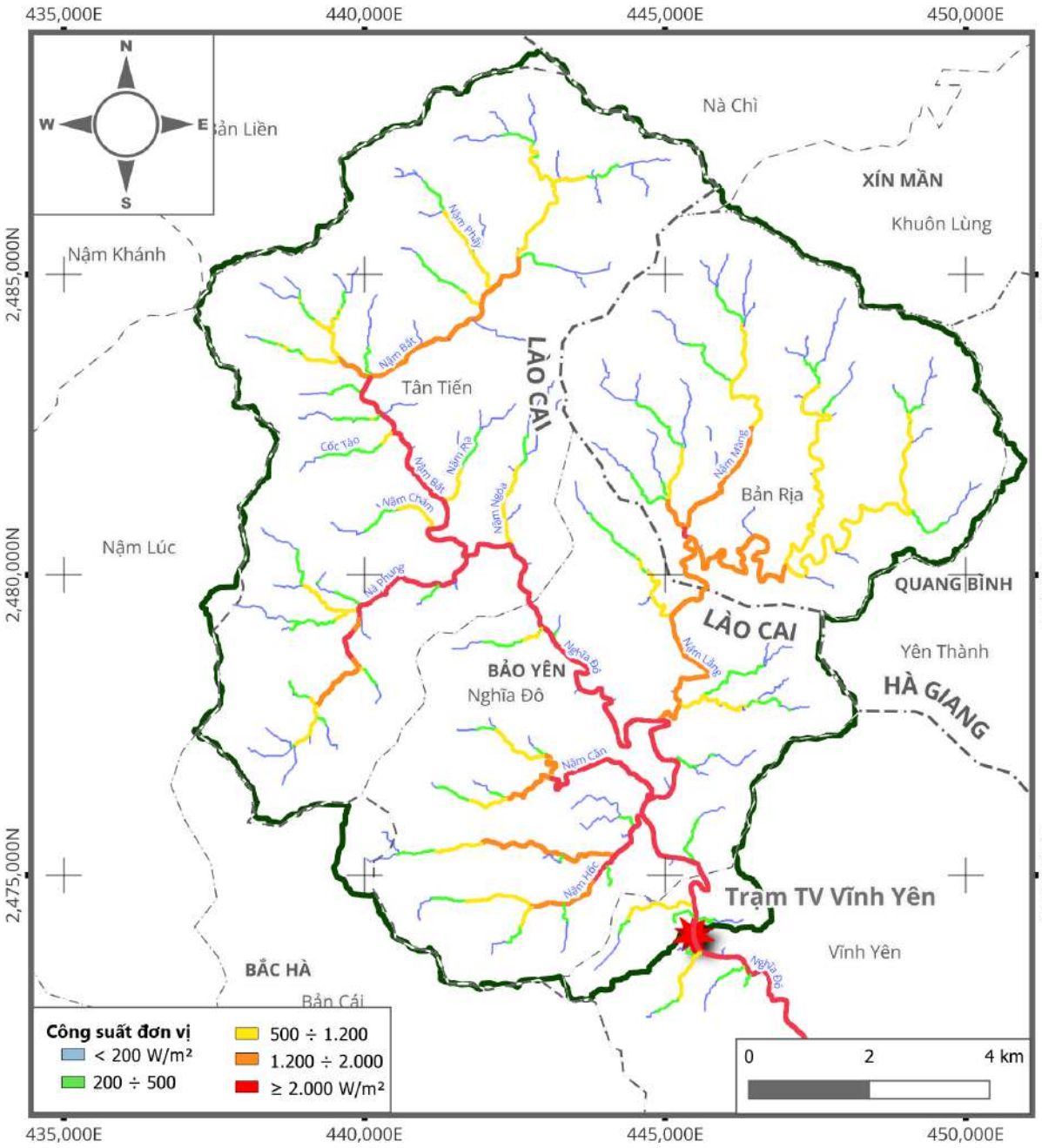
Bản đồ nguy cơ lượt 15:00 thể hiện nguy cơ cao nhất tại từng điểm trong cả trận, không đồng bộ về thời gian, nên phù hợp cho phân vùng. Khi vận hành cảnh báo, công cụ dùng kết quả theo từng giờ như lượt 06:00: các nhánh thượng nguồn đạt đỉnh sớm hơn trạm Vĩnh Yên từ khoảng 2 đến 5 giờ (từ 07:40 đến 10:40 so với 12:30 trong trận này), nên nguy cơ và thời điểm đạt đỉnh tại các điểm thượng nguồn là tín hiệu cảnh báo sớm cho khu dân cư ven suối chính ở hạ lưu. Hạn chế của công cụ là mới đánh giá nguy cơ do dòng nước tại từng điểm, chưa tính tác động của bùn đá, vật liệu bị cuốn từ thượng nguồn xuống; với các nhánh thượng nguồn có nguy cơ sạt lở, kết quả cần được dùng cùng bản đồ nhạy cảm sạt lở, lũ bùn đá.



Hình 3 - 21. Bản đồ phân bố vận tốc dòng chảy (m/s) tại các vị trí

Kết quả tính toán cho thấy, các suối thượng nguồn có công suất đơn vị phổ biến nhỏ hơn 500W/m². Kích thước vật liệu dưới 0,5m có khả năng bị cuốn trôi tại các khu vực này. Khu vực lòng sông chính Nghĩa Đô có công suất đơn vị lớn hơn 2.000W/m² và đạt cực đại ở ≈ 3.800W/m². Theo lý thuyết, nguồn năng lượng này đủ khả năng đẩy trôi các loại vật liệu lòng dẫn có kích thước lớn hơn 1,5m.

Các giá trị mô tả ở đây đều là các giá trị cực đại xuất hiện, không đồng bộ về thời điểm diễn ra. Khu vực thượng nguồn đạt vận tốc cực đại sớm hơn rất nhiều so với thời điểm đạt vận tốc lớn nhất trên suối Nghĩa Đô.



Hình 3 - 22. Bản đồ phân bố công suất đơn vị (W/m²) tại các vị trí

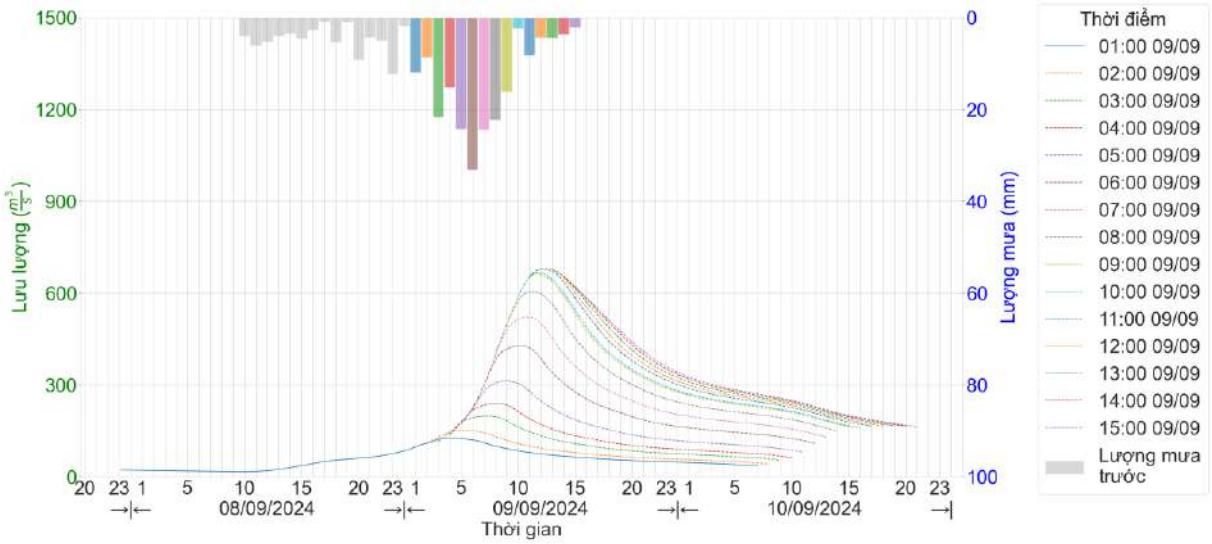
3.4.3. Kết quả xác định nguy cơ lũ quét theo thời gian

Việc đánh giá nguy cơ lũ quét hiệu quả đòi hỏi phải được thực hiện theo thời gian thực, ngay khi có dữ liệu lượng mưa quan trắc. Lý thuyết cho rằng việc kết hợp dữ liệu mưa quan trắc với mưa dự báo sẽ tạo thành một chuỗi thời gian liên tục, từ đó mở rộng khả năng cảnh báo sớm và nâng cao hiệu quả ứng phó với lũ quét. Chương 2 của luận án đã phát triển khung lý thuyết nhằm xác định nguy cơ lũ quét thông qua hai thành phần chính: (1) kết quả mô phỏng thủy văn và (2) các đặc trưng thủy lực được rút ra từ việc khái quát hóa hình dạng mặt cắt sông.

Tuy nhiên, để tập trung vào mục tiêu chính của nghiên cứu, luận án này áp dụng phương pháp đơn giản hóa bằng cách sử dụng duy nhất dữ liệu mưa quan trắc thay vì

tích hợp mưa dự báo. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá nguy cơ lũ quét dựa trên điều kiện thực tế đã xảy ra, từ đó xác định khả năng xảy ra lũ quét ứng với lượng mưa quan trắc. Điều đó vẫn mang lại ý nghĩa thực tiễn cao trong việc xác định mối quan hệ nhân-quả giữa lượng mưa thực tế và nguy cơ lũ quét. Quá trình mô phỏng sẽ được thực hiện và thời gian cảnh báo sẽ được tăng lên với sự giảm thiểu về cảnh báo khống nếu có dữ liệu mưa dự báo tin cậy.

Phần trình bày phía trên có thời điểm mô phỏng là lúc 15:00 ngày 09/09/2024, sau khi đã mưa hết toàn bộ trận mưa của đợt. Kết quả mô phỏng đã trình bày được nguy cơ lũ quét lớn nhất tại từng điểm (mang tính khôi phục). Tuy nhiên, thời điểm xảy ra lưu lượng/công suất cực đại tại trạm thủy văn Vĩnh Yên là lúc 12:30 ngày 09/09/2024. Như vậy, lũ quét xảy ra sớm hơn thời điểm mô phỏng sẽ không có ý nghĩa trong cảnh báo nguy cơ lũ quét mà chỉ có ý nghĩa xác định/khôi phục lại quy mô của trận lũ. Phần này trình bày kết quả mô phỏng tại từng thời điểm từ lúc 01:00 ngày 09/09/2024 đến khi kết thúc trận mưa để xem xét diễn biến thời gian của nguy cơ lũ quét và hiệu quả thời điểm cảnh báo nguy cơ lũ quét.



Hình 3 - 23. Mô phỏng lũ tại từng thời điểm và kết quả dự báo lưu lượng đỉnh lũ tại trạm thủy văn Vĩnh Yên

Hình 3 - 23 thể hiện kết quả mô phỏng lưu lượng tại trạm thủy văn Vĩnh Yên theo từng thời điểm mô phỏng. Ứng với mỗi bước thời gian nhận được lượng mưa, đường quá trình mô phỏng lũ sẽ được xác định thông qua mô hình thủy văn. Các giá trị dự báo lưu lượng từ 13:00 trở đi không có giá trị cảnh báo lũ quét vì thời gian đạt đỉnh đã trôi qua (đã đạt đỉnh lúc 12:30) và trên thực tế, cảnh báo lũ quét đã được đưa ra từ các thời điểm trước đó.

Bảng 3 - 12. Tổng hợp diễn biến lưu lượng dự kiến tại trạm Vĩnh Yên theo thời gian

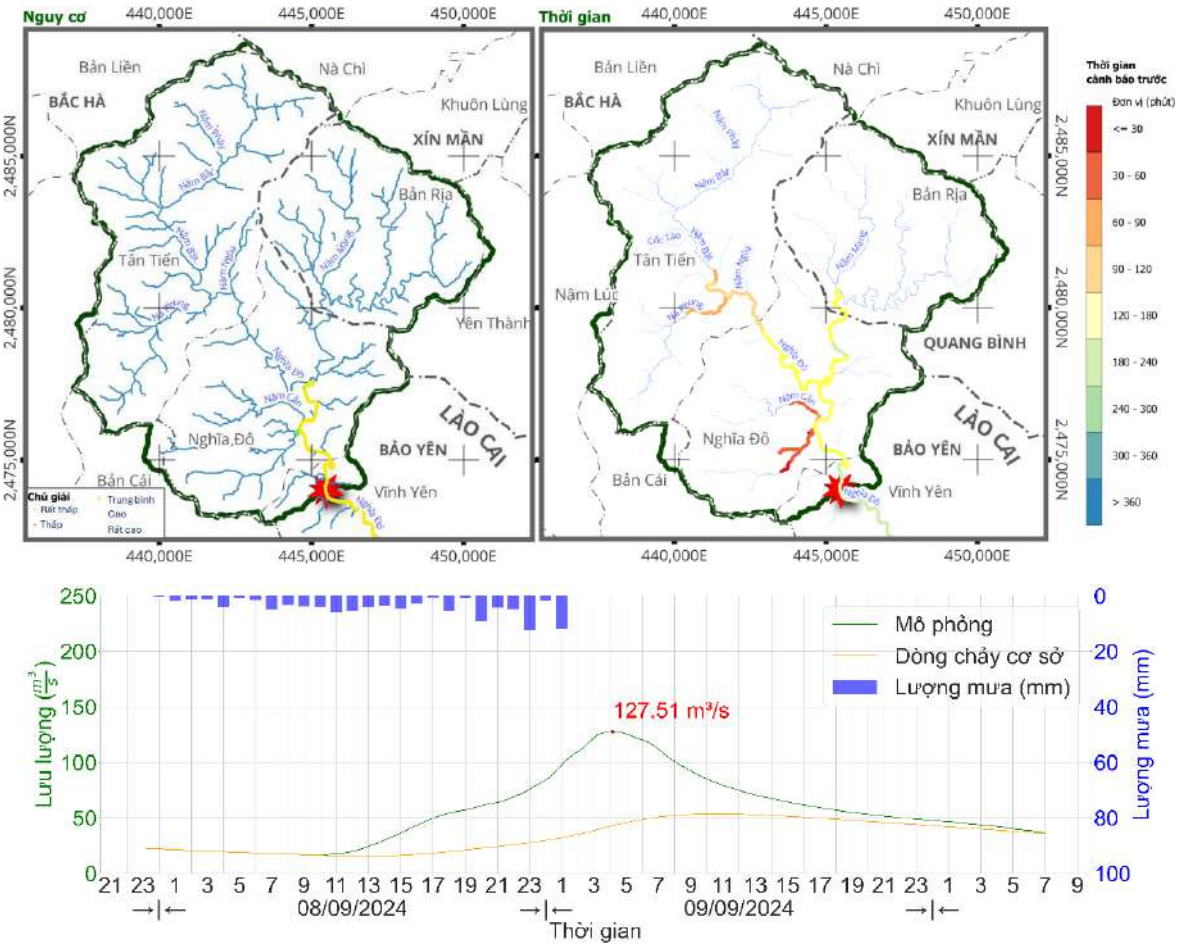
Thời điểm mô phỏng	Lưu lượng lớn nhất dự kiến (m^3/s)	Thời gian đạt đỉnh	Thời gian cảnh báo trước (phút)
01:00 09/09	127,51	04:10 09/09	190
02:00 09/09	150,81	04:50 09/09	170
03:00 09/09	198,21	07:10 09/09	250
04:00 09/09	240,06	08:10 09/09	250
05:00 09/09	312,71	08:50 09/09	230
06:00 09/09	428,49	10:10 09/09	250
07:00 09/09	521,72	10:50 09/09	230
08:00 09/09	606,10	11:20 09/09	200
09:00 09/09	663,20	11:40 09/09	160
10:00 09/09	668,18	11:50 09/09	110
11:00 09/09	677,02	12:10 09/09	70
12:00 09/09	679,02	12:30 09/09	30
13:00 09/09	678,76	12:30 09/09	-30
14:00 09/09	679,05	12:30 09/09	-90
15:00 09/09	681,11	12:30 09/09	-150

1. Thời điểm mô phỏng lúc 01:00 ngày 09/09/2024

Giả thiết đang quay trở lại thời điểm 01:00 ngày 09/09/2024, khi đó không có dự báo mưa tiếp theo và giả thiết toàn bộ thời gian sau 01:00 là không có mưa. Quá trình mô phỏng nguy cơ lũ quét bắt đầu và kết quả tính toán (sau 3 phút) cho thấy lưu lượng tại trạm thủy văn Vĩnh Yên dự kiến đạt 127,51m^3/s sau khi ghi nhận lượng mưa (bình quân trên toàn lưu vực) là 11,96mm thời điểm lúc 01:00 sáng.

Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét cho thấy, khu vực sông Nghĩa Đô sau nhập lưu với suối Nậm Lằng (phía Bản Rịa) có xuất hiện nguy cơ trung bình. Thời gian cảnh báo trước là 150 phút (2 giờ 30 phút) cho vị trí nhập lưu và 190 phút (3 giờ 10 phút) cho vị trí trạm thủy văn Vĩnh Yên. Các khu vực không có đường quá trình lũ lên (lượng mưa chưa vượt tổn thất ban đầu) không xác định thời gian cảnh báo trước (các điểm phía

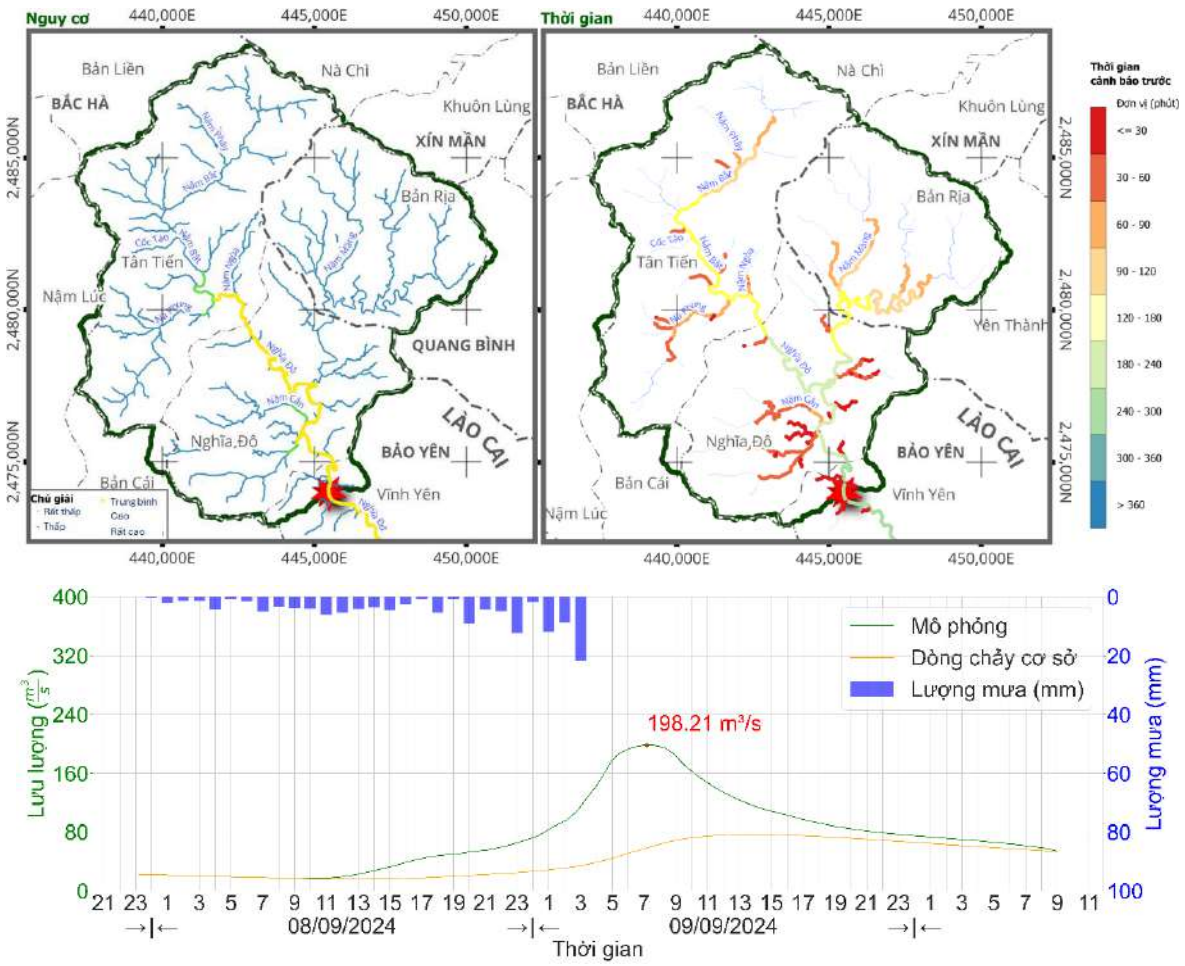
thượng nguồn không có thời gian cảnh báo trước – bản đồ thời gian cảnh báo trước Hình 3 - 24)



Hình 3 - 24. Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét thời điểm 01:00 09/09/2024

2. Thời điểm mô phỏng lúc 03:00 ngày 09/09/2024

Tại thời điểm lúc 03:00, lượng mưa nhận được lúc 02:00 và 03:00 lần lượt là 8,75 và 12,70mm (lượng mưa bình quân toàn lưu vực). Nguy cơ lũ quét trung bình tiếp tục xuất hiện xuất hiện trên thượng nguồn sông Nghĩa Đô nằm cuối xã Tân Tiến. Các nhánh sông/suối khác ghi nhận nguy cơ thấp. Thời gian cảnh báo trước tại vị trí bắt đầu xuất hiện nguy cơ lũ quét trung bình trên sông Nghĩa Đô là 170 phút (3 giờ 10 phút) và tại cửa ra trạm thủy văn Vĩnh Yên là 250 phút (4 giờ 10 phút). Đỉnh lũ dự kiến tại trạm thủy văn Vĩnh Yên đạt 198,21m³/s. Các khu vực có thời gian cảnh báo trước dưới 120 phút chỉ xuất hiện nguy cơ thấp.



Hình 3 - 25. Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét thời điểm 03:00 09/09/2024

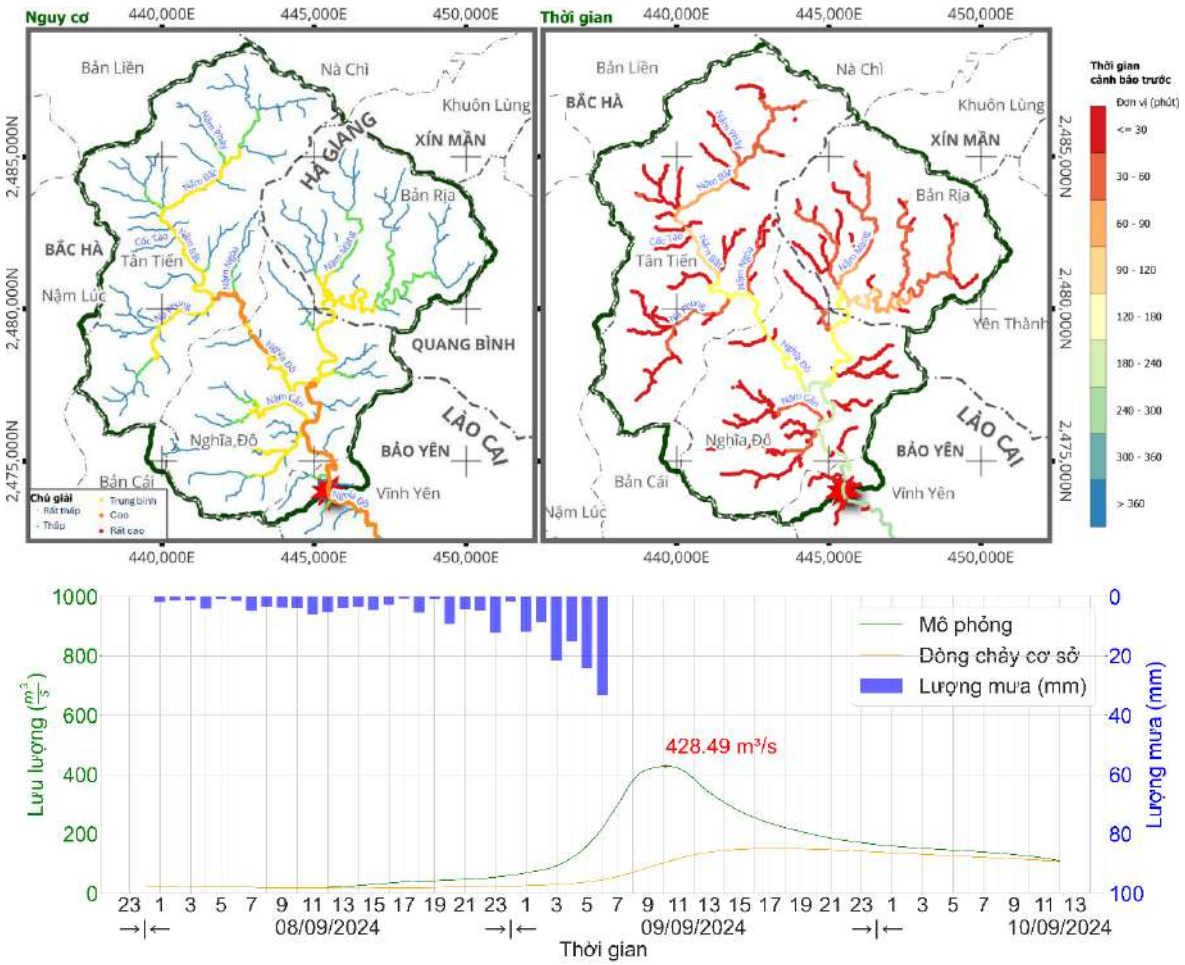
3. Thời điểm mô phỏng lúc 06:00 ngày 09/09/2024

Thời điểm lúc 06:00 là thời điểm lượng mưa bình quân trên toàn lưu vực đạt giá trị lớn nhất (33,24 mm) sau khi nhận các giá trị mưa liên tiếp của các giờ trước ở các thời điểm 03:00; 04:00 và 05:00 lần lượt là 21,7mm; 15,19mm và 24,8mm. Kết quả mô phỏng thể hiện như sau:

Ở thời điểm này, kết quả tính toán nguy cơ lũ quét cho khu vực nghiên cứu thay đổi rõ rệt. Trên sông Nghĩa Đô được tính toán có nguy cơ lũ quét cao bắt đầu từ hợp lưu của suối Nậm Bắt và suối Nà Phung (điểm bắt đầu sông Nghĩa Đô) với thời gian cảnh báo trước là 130 phút (2 giờ 10 phút) và điểm tại trạm thủy văn Vĩnh Yên là 250 phút (4 giờ 10 phút). Lưu lượng dự kiến tại trạm thủy văn Vĩnh Yên đạt 428,49m³/s.

Trên nhánh suối Nậm Bắt và Nhà Phung xuất hiện nguy cơ lũ quét trung bình, thời gian cảnh báo trước của 2 nhánh suối này lần lượt là 50 phút và 30 phút (tại các vị trí đầu tiên xuất hiện nguy cơ trung bình). Khu vực cuối xã Bản Rịa cũng bắt đầu có nguy cơ trung bình sau khoảng 70 phút. Như vậy, nguy cơ lũ quét cao có thể được cảnh báo trước từ ngay sau thời điểm mô phỏng (lúc 06:00 sáng) với thời gian cảnh báo trước lên tới 2 giờ. Lũ nhanh trên các nhánh sông/suối nhỏ được cảnh báo với khoảng thời gian cảnh báo trước ít hơn nhiều, trung bình từ 30 đến 60 phút. Các nhánh suối có thời gian

cảnh báo ít hơn 30 phút chỉ xuất hiện mức nguy cơ thấp và rất thấp.

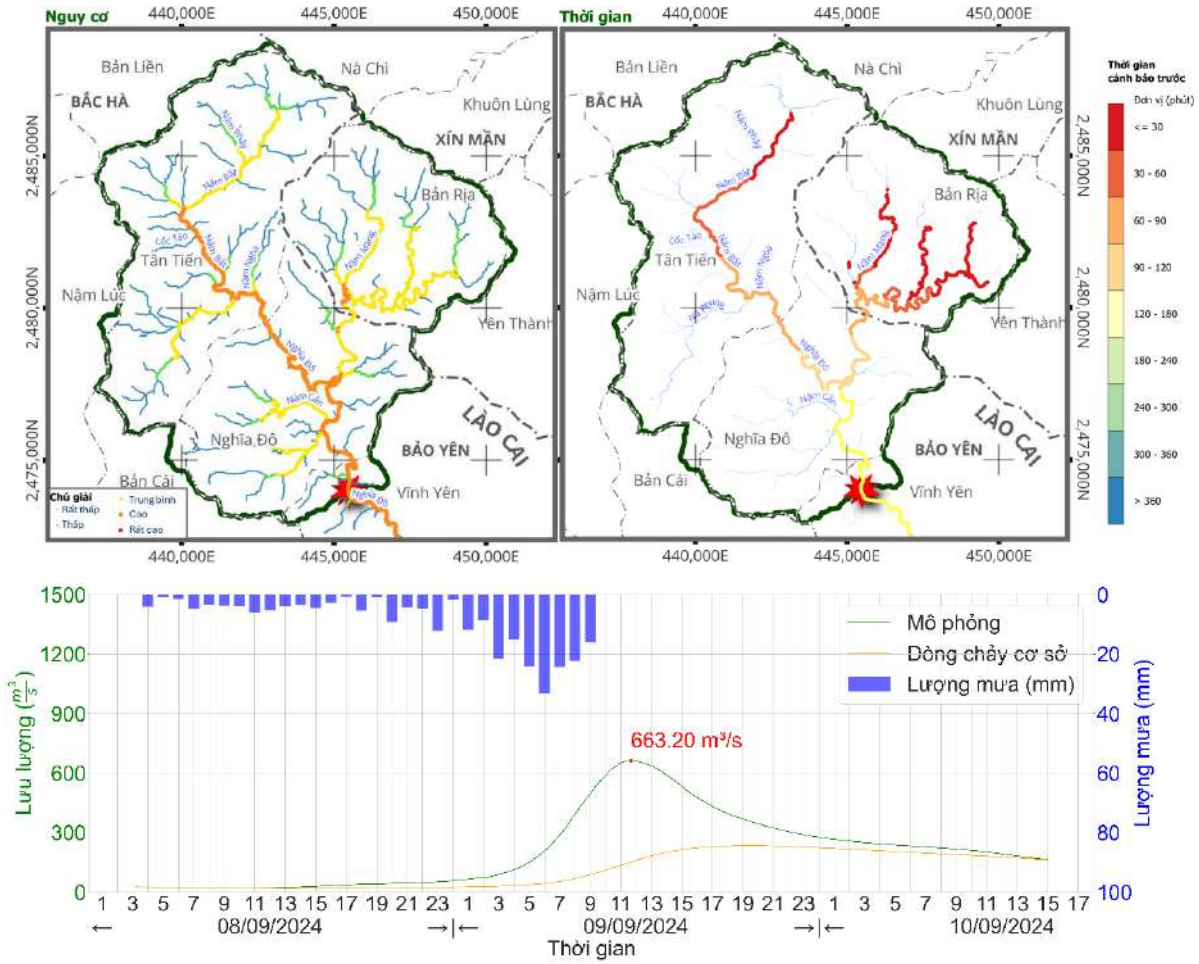


Hình 3 - 26. Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét thời điểm 06:00 09/09/2024

4. Thời điểm mô phỏng lúc 09:00 ngày 09/09/2024

Thời điểm này là thời điểm ghi nhận lượng mưa lớn cuối cùng của trận mưa với bình quân trên toàn khu vực đạt 16,17mm. Thời điểm này được coi như gần kết thúc trận mưa, nếu sau thời điểm này, lượng mưa là không đáng kể thì lưu lượng lớn nhất tại các vị trí tính toán gần tiệm cận với lưu lượng thực tế và kết quả tính toán nguy cơ lũ quét sẽ gần tương tự với kết quả tính toán cho toàn bộ trận lũ đã được trình bày phía trên. Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét thời điểm 09:00 thể hiện như Hình 3 - 27.

Kết quả mô phỏng cho thấy mọi dữ liệu mô phỏng tại thời điểm này gần như có sự tương đồng so với kết quả tính toán cho toàn bộ trận lũ. Vị trí xuất hiện nguy cơ lũ quét cao trên nhánh suối Nậm Bắt được cảnh báo sớm trước chỉ 50 phút và tại cửa ra trạm thủy văn Vĩnh Yên là 160 phút (2 giờ 40 phút). Cuối nhánh suối Nậm Màng thuộc khu vực xã Bản Rịa xuất hiện nguy cơ lũ quét cao với thời gian cảnh báo sớm 40 phút.



Hình 3 - 27. Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét thời điểm 09:00 09/09/2024

Lưu lượng dự kiến tại trạm thủy văn Vĩnh Yên đạt 663,20m³/s gần với lưu lượng mô phỏng toàn bộ trận lũ (681,11m³/s). Thời gian đạt đỉnh dự kiến là lúc 11:40 ngày 09/09/2024.

Như vậy, nguy cơ lũ quét cao được cảnh báo sớm với khoảng thời gian cảnh báo trung bình từ 40 phút đến vài giờ tùy thuộc vào độ trễ của thời gian tập trung dòng chảy cho từng vị trí tính toán. Việc sử dụng nguyên lý thủy văn để mô phỏng mưa – dòng chảy từ lượng mưa thực đo có độ tin cậy rất cao và hạn chế vấn đề cảnh báo khống (do quy luật thể hiện nguyên nhân – kết quả). Hạn chế lớn nhất của dữ liệu này là thời gian cảnh báo sớm chưa đủ dài dẫn đến vẫn còn bị động trong công tác phòng, chống thiên tai. Tuy nhiên, có thể khắc phục được hạn chế này bằng việc sử dụng lượng mưa dự báo hạn cực ngắn với độ tin cậy cao.

Khi lượng mưa càng lớn, thời gian dự báo đạt đỉnh càng dài. Lúc 6:00 ngày 09/09, lượng mưa lớn nhất đạt 33,24mm. Kết quả mô phỏng cho thấy đỉnh lũ dự kiến đạt 428,49m³/s với thời gian cảnh báo trước lên tới 4 giờ 10 phút. Khi lượng mưa càng giảm thì đường quá trình mô phỏng càng gần kết quả thực tế, tuy nhiên thời gian cảnh báo trước lại suy giảm dần. Tại thời điểm lúc 09:00, dự báo lưu lượng đỉnh lũ lên tới 663,20m³/s, tuy nhiên thời gian cảnh báo trước chỉ 2 giờ 40 phút. Tại bước thời gian tiếp

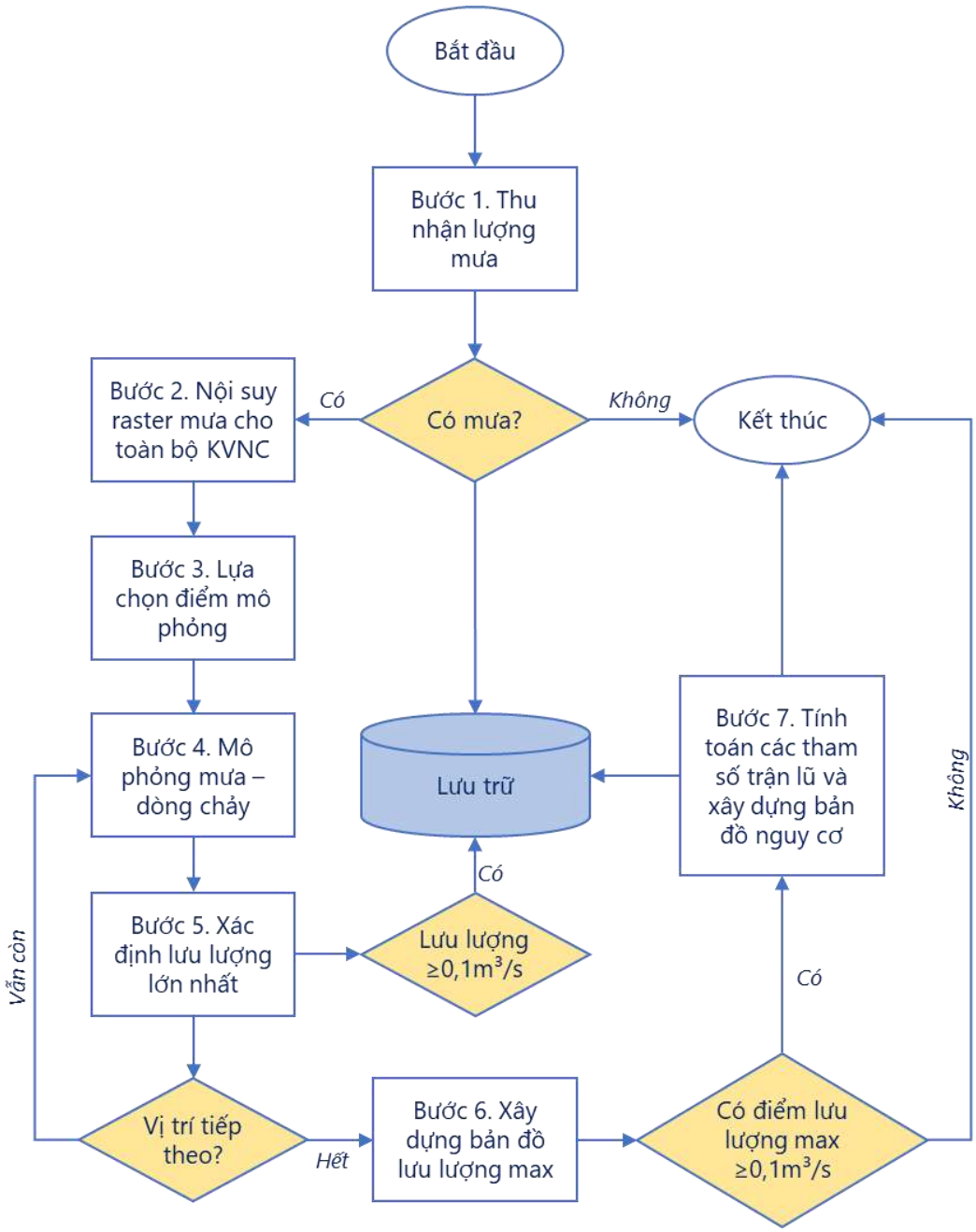
theo là 10:00 dự báo lưu lượng đỉnh lũ lên tới ≈ 679m³/s, gần với giá trị đỉnh mô phỏng của toàn bộ trận lũ do bước thời gian này chỉ xuất hiện lượng mưa là 2,36mm (trong khi giả thiết lượng mưa sau thời điểm tính là 0, lượng mưa này gần với giá trị giả thiết, do đó kết quả mô phỏng tương đối tiệm cận với giá trị mô phỏng cho toàn bộ trận lũ), tuy nhiên thời gian dự báo còn lại chỉ đạt 1 giờ 50 phút.

3.5. Xây dựng công cụ mô phỏng nguy cơ lũ quét theo không gian và thời gian

3.5.1. Trình tự mô phỏng

Công cụ mô phỏng nguy cơ lũ quét cần được tiến hành như quy trình thể hiện ở Hình 2 - 22 bao gồm công tác mô phỏng thủy văn, tính toán các tham số cần thiết và xác định nguy cơ. Trình tự mô phỏng được thể hiện trong Hình 3 - 28 theo từng bước.

- **Bước 1:** Thu nhận lượng mưa: từ các nguồn quan trắc. Trong luận án, nguồn dữ liệu mưa của Vrain và WeatherPlus được sử dụng dựa trên các tài khoản đã công bố. Nếu lượng mưa xuất hiện tại bất kỳ trạm nào, quy trình tính toán chuyển sang bước 2, nếu không ghi nhận lượng mưa tại bất kỳ trạm nào, kết thúc mô phỏng.
- **Bước 2:** Nội suy raster mưa. Bước này nhằm thực hiện nội suy mưa từ dạng điểm thành dạng raster. Có 2 bước nhỏ thực hiện trong bước này bao gồm: (1) Nội suy từ điểm thành raster; (2) Xây dựng bản đồ raster mưa cho lưu vực ô lưới. Kết quả bản đồ raster mưa cho lưu vực ô lưới được sử dụng cho các bước tiếp theo.
- **Bước 3:** Lựa chọn điểm mô phỏng. Mô phỏng được thực hiện cho toàn bộ các điểm trên lưu vực, bước này lựa chọn điểm đầu tiên, sau đó mô phỏng lần lượt cho các điểm tiếp theo đến khi hết.
- **Bước 4:** Mô phỏng mưa – dòng chảy: Tại mỗi điểm, các giá trị đặc trưng lưu vực ô lưới và lượng mưa tương ứng được trích xuất, sau đó tiến hành mô phỏng thủy văn để xác định đường quá trình lũ.
- **Bước 5:** Nếu đường quá trình lũ có lưu lượng đỉnh lũ lớn nhất lớn hơn 0,1m³/s thì kết quả được lưu trữ. Tiếp tục xác định lưu lượng lũ cho các điểm tiếp theo.
- **Bước 6:** Sau khi hoàn tất mô phỏng mưa – dòng chảy, giá trị lưu lượng đỉnh lớn nhất được sử dụng để xây dựng bản đồ lưu lượng max. Nếu có điểm nào đó trên khu vực nghiên cứu xuất hiện lưu lượng max lớn hơn 0,1m³/s thì tiến hành tính toán các tham số trận lũ ở bước 7.
- **Bước 7:** Xác định các tham số trận lũ và xây dựng bản đồ nguy cơ. Các tham số trận lũ được xác định bao gồm: (1) độ sâu mực nước; (2) bề rộng mực nước; (3) vận tốc dòng chảy; (4) tổng công suất dòng chảy; (5) công suất đơn vị dòng chảy. Kết quả cuối cùng là phân cấp nguy cơ lũ quét dựa trên bảng phân cấp với các tham số bao gồm công suất đơn vị dòng chảy và vận tốc dòng chảy.



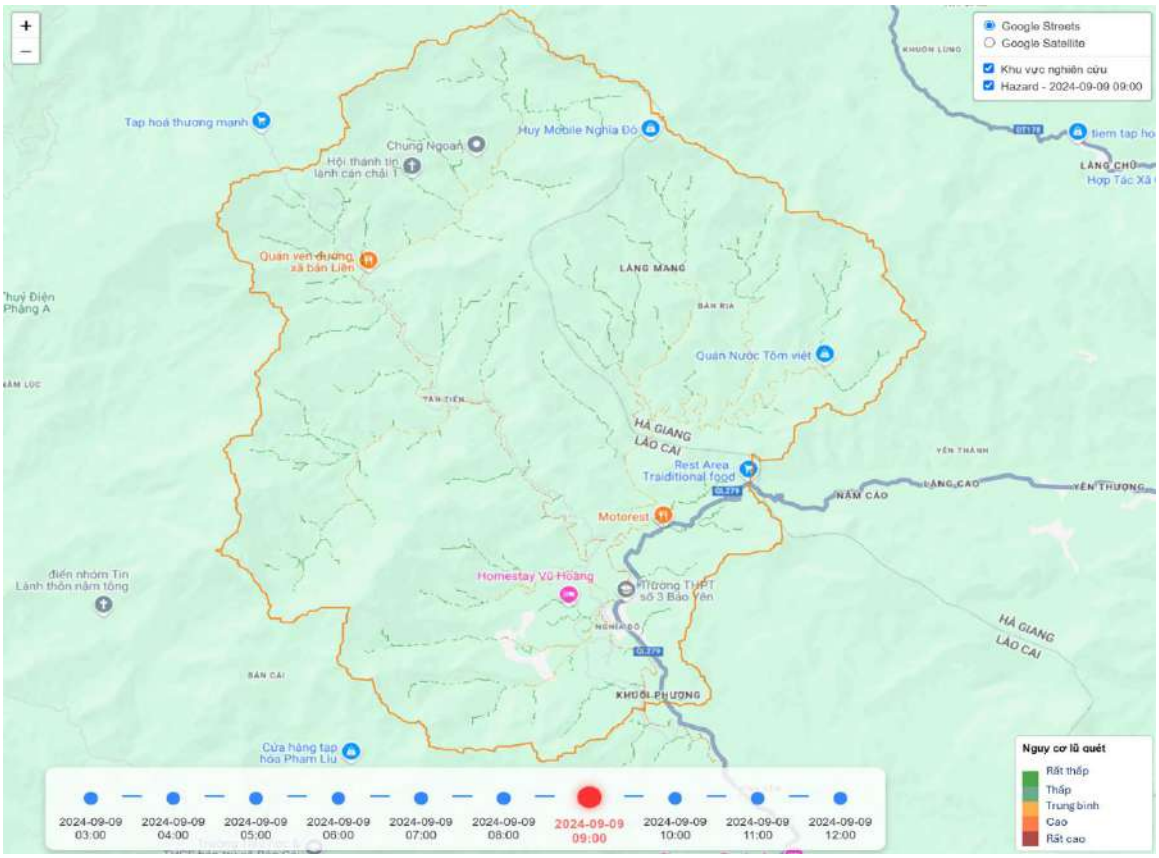
Hình 3 - 28. Trình tự mô phỏng nguy cơ lũ quét theo thời gian (mỗi giờ)

3.5.2. Lưu trữ kết quả

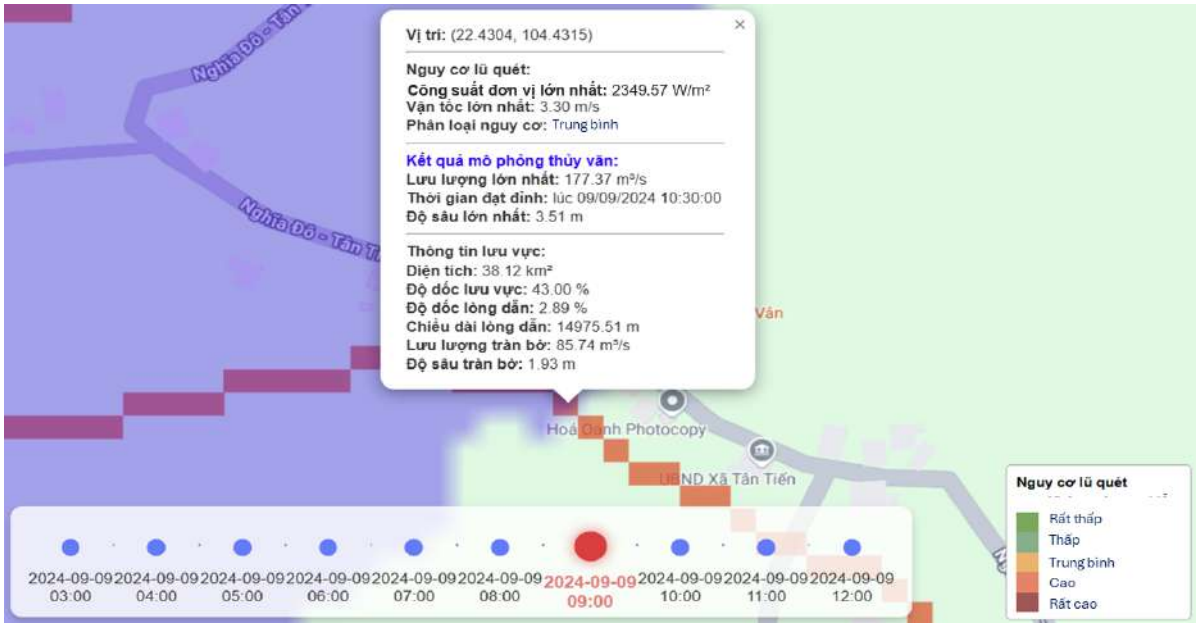
Toàn bộ các kết quả sau đây được lưu trữ:

- Lưu lượng: chuỗi lưu lượng tính toán theo thời gian.
- Lượng mưa: chuỗi lượng mưa tính toán theo thời gian.
- Các rasters kết quả: bao gồm raster: (1) lưu lượng đỉnh lũ; (2) mực nước; (3) vận tốc; (4) thời gian đạt đỉnh; (5) nguy cơ lũ quét đã được phân cấp.

3.5.3. Hiển thị kết quả



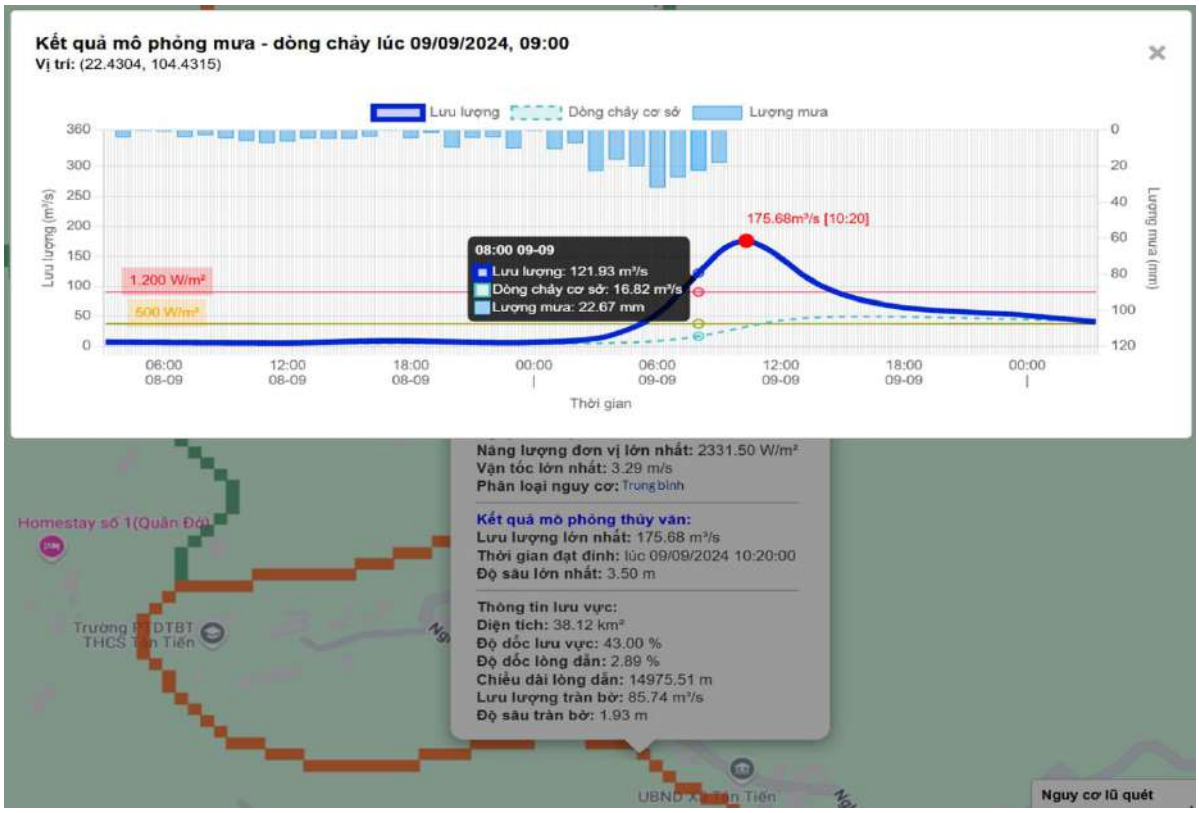
Hình 3 - 29. Giao diện hiển thị kết quả theo từng giờ



Hình 3 - 30. Hiển thị trực quan nguy cơ lũ quét tại một vị trí gần UBND xã Tân Tiến

Khi click vào một vị trí, một bảng hiển thị sẽ hiện ra và mô tả đầy đủ thông tin về kết quả tính toán. Thời điểm tính toán được hiển thị nổi bật ở thanh timeline phía dưới. Thời gian đạt đỉnh dự kiến được hiển thị ở kết quả mô phỏng thủy văn. Các thông tin cơ bản của lưu vực được thể hiện rõ ràng để có thể nắm bắt được các tham số cơ bản của

vị trí đang xét.



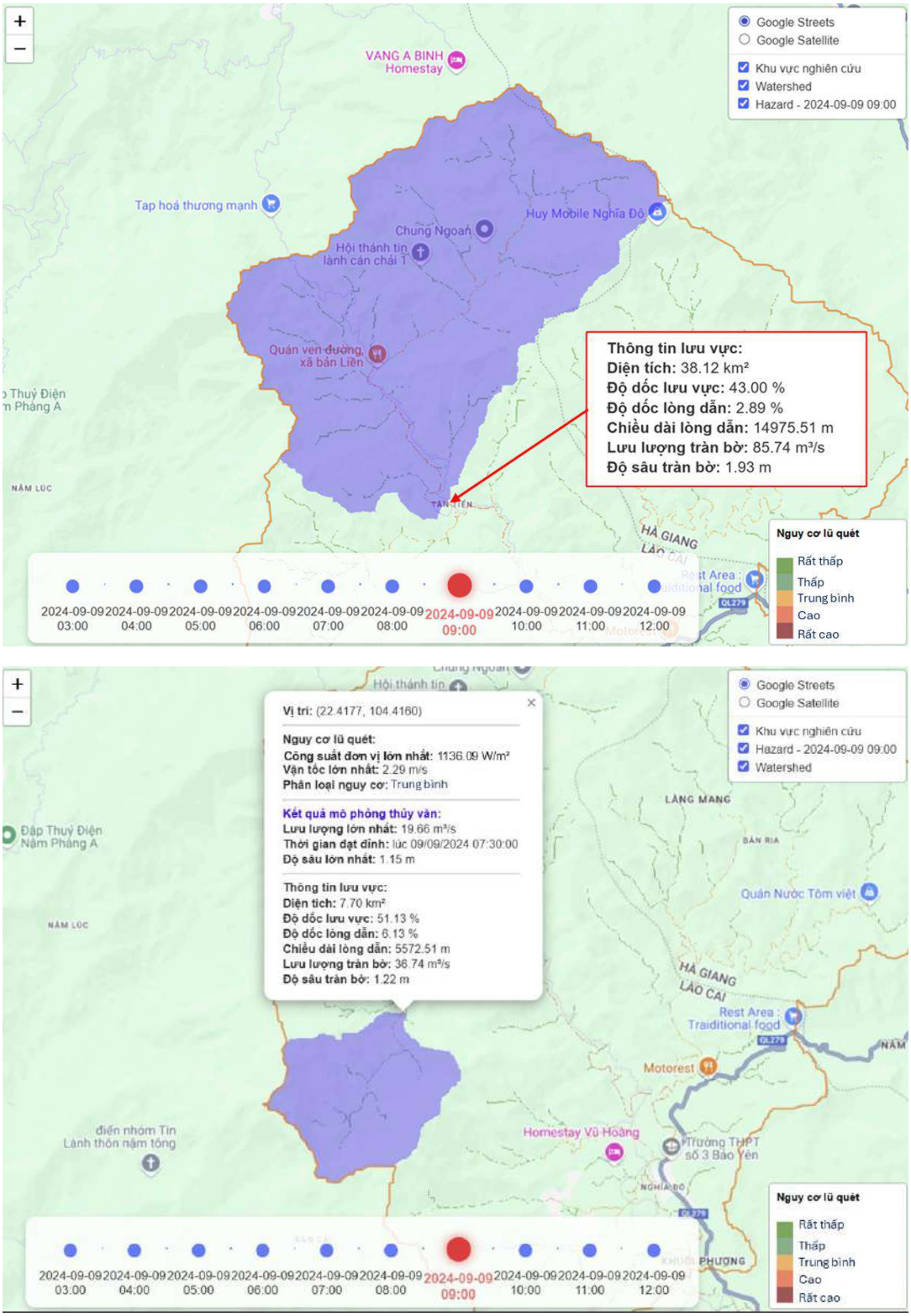
Hình 3 - 31. Thông tin chi tiết được hiển thị khi nhấn vào

Như tại điểm đang được hiển thị tại gần UBND xã Tân Tiến, diện tích lưu vực là 38,12km². Điểm này là cửa ra của một lưu vực thượng nguồn có diện tích tương ứng. Độ dốc bình quân của lưu vực này là 43% và tại vị trí đang xét có độ dốc lòng dẫn là 2,89%. Chiều dài lòng dẫn xa nhất đến điểm đường phân thủy của lưu vực là ≈15km. Dựa trên các công thức khái quát, lưu lượng tràn bờ xác định là 85,74 m³/s và có độ sâu tương ứng là 1,93m.

Thời điểm tính toán là lúc 09:00 ngày 09/09/2024, kết quả dự báo vị trí này sẽ đạt lưu lượng ≈ 175 m³/s ở độ sâu mực nước tương ứng 3,5m vào thời điểm 10:20 (sau thời gian tính toán nguy cơ 1 giờ 20 phút). Mức lưu lượng này vượt khoảng gấp 2 lần lưu lượng tràn bờ và đang được phân cấp nguy cơ lũ quét trung bình dựa trên tham số công suất đơn vị và vận tốc lớn nhất dự kiến. Công suất đơn vị của điểm lớn nhất đạt ≈ 2.350 W/m² và vận tốc lớn nhất ≈ 3,3m.

Để có thêm thông tin chi tiết về kết quả tính toán, người dùng có thể click vào "Kết quả mô phỏng thủy văn" để có các thông tin chi tiết theo thời gian.

Các tham số tính toán bao gồm lượng mưa, đường quá trình lũ dự kiến được hiển thị một cách chi tiết theo từng thời điểm. Người dùng hoàn toàn có thể nắm bắt được các thông tin cần thiết nhằm hiểu rõ hơn về trận lũ tại từng vị trí. Bên cạnh đó, mỗi vị trí click vào cũng hiển thị luôn lưu vực tương ứng với vị trí đó là cửa ra.



Hình 3 - 32. Lưu vực tương ứng mà điểm cửa ra được click trên bản đồ theo nguyên tắc "lưu vực ô lưới" được thể hiện

Mọi vị trí có lưu lượng lớn nhất lớn hơn 0,1m³/s đều được lưu trữ. Do có đến hàng triệu điểm, mỗi điểm lại lưu trữ những giá trị về chuỗi mưa, tham số lưu vực, kết quả mô phỏng lưu lượng, vận tốc, mực nước, việc lựa chọn các điểm lưu trữ để tối ưu hóa về hiệu năng cũng được xem xét (chỉ cần bộ lọc nhỏ ≥ 0,1m³/s, có thể giảm số điểm lưu

trữ lên tới hơn 90% số lượng điểm). Hiện nay, hệ thống đang tiếp tục được nghiên cứu để có thể mô phỏng trên diện rộng, tổng thời gian toàn bộ quá trình mô phỏng cho khu vực nghiên cứu tính từ khi bắt đầu ghi nhận lượng mưa đến khi đưa ra bản đồ nguy cơ lũ quét diễn ra trong khoảng 3 phút.

3.6. Đánh giá kết quả áp dụng thử nghiệm

Áp dụng cho lưu vực sông Nghĩa Đô là bước kiểm chứng ban đầu của quy trình đề xuất trên một lưu vực thực, nhằm xem xét mức độ phù hợp của ba luận điểm mà luận án đặt ra: ngưỡng phân cấp theo công suất và vận tốc dòng chảy, nguyên tắc "lưu vực ô lưới" kết hợp mô hình thủy văn tập trung, và bộ tham số hình thái khái quát hóa cho khu vực miền núi phía Bắc. Do mới thực hiện trên một lưu vực với một số trận lũ, các nhận định dưới đây mang tính bước đầu và cần tiếp tục được kiểm chứng trên nhiều lưu vực khác. Trong phạm vi đó, luận án sẽ thảo luận kết quả thử nghiệm trong tương quan với một số nghiên cứu liên quan, đồng thời nhìn nhận cả những kết quả đạt được lẫn các hạn chế bộc lộ qua quá trình áp dụng.

3.6.1. So sánh với một số nghiên cứu liên quan

Mô hình mưa – dòng chảy xây dựng cho lưu vực có cửa ra tại trạm thủy văn Vĩnh Yên đạt hệ số NASH 0,95 ở giai đoạn hiệu chỉnh và 0,81 ở giai đoạn kiểm định. So với các thang đánh giá chất lượng mô phỏng thủy văn thường được tham khảo (NASH lớn hơn 0,75 được xem là tốt), kết quả này là khả quan đối với những trận lũ đưa vào hiệu chỉnh và kiểm định, điều này cũng thể hiện rằng dữ liệu quan trắc mưa gần đây đã có đủ độ tin cậy về số liệu để có thể mô phỏng được tương quan chặt chẽ mưa – dòng chảy. Tuy vậy, kết quả tốt trên một số trận lũ chưa bảo đảm độ chính xác cho mọi dạng trận lũ; cần thêm số liệu kiểm chứng để củng cố nhận định này.

Đặt kết quả Nghĩa Đô bên cạnh một số nghiên cứu cảnh báo lũ quét gần đây trên cùng địa bàn giúp nhận diện rõ hơn vị trí của cách tiếp cận trong luận án. Trịnh Thu Phương (2021) [131] đã thử nghiệm hướng tiếp cận theo hệ thống FFGS cho lưu vực Ngòi Thia, sử dụng ngưỡng mưa sinh dòng chảy tràn bờ cho từng tiểu lưu vực; cách làm này có ưu điểm gắn trực tiếp với mưa dự báo và một hệ thống vận hành đã được kiểm nghiệm. Luận án đi theo một hướng khác: thay vì dừng ở ngưỡng tràn bờ, kết quả được phân cấp theo công suất đơn vị và vận tốc tại từng điểm, nhằm phân biệt giữa ngập lụt và lũ quét trên cùng một đoạn suối. So với bản đồ nhạy cảm tĩnh cho lưu vực sông Năng của Lê Như Ngà (2017) [19], kết quả Nghĩa Đô thể hiện thêm diễn biến theo thời gian: một chuỗi bản đồ nguy cơ theo từng giờ thay cho một bản đồ phân vùng. So với hướng phát hiện vùng lũ từ ảnh viễn thám Sentinel-1 của Ngô Thị Phương Thảo và cộng sự (2024) [132], vốn chỉ ghi nhận vùng lũ sau sự kiện, phương pháp của luận án ước tính nguy cơ trước khi đỉnh lũ xuất hiện. Mỗi hướng tiếp cận phục vụ một mục đích riêng và

có giới hạn riêng; điểm bổ sung của luận án nằm ở độ phân giải không gian, thời gian và cơ sở phân cấp theo đặc trưng dòng chảy.

Một quan sát đáng lưu ý là sự gần nhau về kết quả giữa các nghiên cứu độc lập. Trong số các công thức lưu lượng tràn bờ được rà soát (Bảng 3 - 9), công thức $Q = 12{,}45A^{0{,}53}$ do Nguyễn Thế Toàn (2023) [109] xây dựng cho lưu vực Nậm Ly – Nà Nhùng cho giá trị tại Vĩnh Yên (167,96 m³/s) khá gần với lưu lượng tràn bờ xác định theo tần suất 50% từ chuỗi 64 năm số liệu (174,0 m³/s) và với hình dạng mặt cắt thực đo. Việc hai nghiên cứu trên hai lưu vực khác nhau cho kết quả tương đồng là một dấu hiệu tích cực về tính nhất quán của quan hệ hình thái – thủy lực trong vùng, dù mới dựa trên một điểm so sánh và chưa thể coi là bằng chứng đầy đủ.

Các phương pháp chỉ số nội tại điểm (FFPI, FR) hay phân tích đa tiêu chí (MCA) cho độ phân giải đến từng pixel, nhưng giá trị tại mỗi pixel được suy từ các thuộc tính tại chỗ (độ dốc, thảm phủ, mật độ sông…) hơn là từ phản ứng thủy văn của lưu vực thượng nguồn. Các phương pháp thủy văn theo tiểu lưu vực (như FFGS) mô tả tốt bản chất vật lý của dòng chảy nhưng đưa ra một giá trị nguy cơ bình quân cho cả tiểu lưu vực. Luận án cố gắng kết hợp hai khía cạnh này bằng cách xem mỗi điểm là cửa ra của một lưu vực thượng nguồn riêng, để vừa giữ độ chi tiết theo điểm, vừa dựa trên phản ứng thủy văn của lưu vực. Kết quả Nghĩa Đô minh họa cho ý tưởng này: trong phạm vi một tiểu lưu vực vốn được hệ thống cảnh báo theo tiểu lưu vực xem là một đơn vị bình quân, quy trình đề xuất phân biệt được nhánh suối Nậm Bắt và đoạn suối chính Nghĩa Đô có nguy cơ cao, trong khi phần lớn các nhánh thượng nguồn ở mức rất thấp đến thấp.

3.6.2. Mức độ phù hợp của bộ tham số đặc trưng tại lưu vực thử nghiệm

Một nguyên tắc được khẳng định qua thử nghiệm là ưu tiên số liệu thực đo khi có sẵn. Áp dụng cho Nghĩa Đô tương ứng với tình huống có số liệu mặt cắt trong ba tình huống tính toán thủy văn thường gặp (có số liệu, có lưu vực tương tự, không có số liệu): mặc dù luận án đã khái quát hóa được bộ tham số hình thái đặc trưng cho khu vực miền núi phía Bắc (r = 2; k = 8,5), các tính toán cho lưu vực sông Nghĩa Đô vẫn sử dụng giá trị đo đạc tại chỗ từ mặt cắt trạm thủy văn Vĩnh Yên (r = 2,5; k = 8,72), không dùng giá trị đặc trưng. Bộ tham số đặc trưng chỉ đóng vai trò thay thế cho những khu vực không có số liệu mặt cắt. Việc giá trị đo tại Vĩnh Yên gần với giá trị đặc trưng toàn vùng (r trung bình 2,68 – trung vị 2,0; k trung vị 8,5) là một dấu hiệu cho thấy bộ tham số khái quát hóa ở mức hợp lý để dùng khi không có lựa chọn tốt hơn, song không thay thế cho số liệu thực. Trên thực tế, một mặt cắt riêng lẻ không đủ để kết luận về tính đại diện trên toàn miền núi phía Bắc; số lượng 132 mặt cắt vẫn còn hạn chế so với quy mô khu vực, và việc bổ sung mẫu cho từng tiểu vùng là cần thiết để các tham số r, k đạt độ tin cậy cao hơn.

Lựa chọn trung vị thay cho trung bình đối với tỷ số k cũng phù hợp với đặc điểm số liệu. Phân bố của k trải rộng từ 1,8 đến 53,55 và lệch phải rõ rệt do một số đoạn lòng dẫn mở rộng, bồi tụ; trong trường hợp này, trung bình (11,3) bị kéo lệch bởi các điểm ngoại vi, còn trung vị (8,5) là số đo đại diện ổn định hơn cho lòng dẫn co hẹp điển hình ở miền núi. Giá trị k = 8,72 tại Vĩnh Yên gần với trung vị hơn so với trung bình, nhất quán với lựa chọn này, do đó, kết quả tính toán cũng có phần phù hợp hơn so với các lựa chọn khác.

Phép quy đổi mặt cắt theo r, k còn được kiểm chứng trực tiếp tại Vĩnh Yên. Ở mực nước tràn bờ, diện tích mặt cắt ướt và vận tốc trung bình tái lập từ bộ tham số (r = 2,5; k = 8,72) gần như trùng với giá trị tính trực tiếp từ mặt cắt khảo sát (diện tích khoảng 74,5 m^2 và vận tốc khoảng 2,3 m/s ứng với lưu lượng tràn bờ 174 m^3/s). Sự trùng khớp này cho thấy việc thay mặt cắt thực bằng mặt cắt chuẩn hóa hai tham số không gây sai lệch đáng kể ở dải dòng chảy gần tràn bờ. Độ tin cậy của phép quy đổi giảm ở hai dải mực nước. Ở dải mực nước rất thấp, các mấp mô nhỏ của đáy lòng dẫn quyết định hình dạng mặt cắt ướt, một hệ số hình dạng duy nhất không mô tả hết; tuy nhiên dải này nằm dưới ngưỡng tối thiểu ($h \geq 0,5$ m) nên ít ảnh hưởng đến kết quả phân cấp. Ở dải cao hơn mực nước tràn bờ, do không có số liệu chi tiết, mặt cắt được mở rộng tuyến tính.

Hệ số nhám cũng tuân theo cùng nguyên tắc đó. Các trận lũ quét điển hình ở khu vực miền núi phía Bắc – như Nậm Păm hay Hồ Bốn – xảy ra trên các lưu vực đầu nguồn nhỏ, hầu như không có trạm quan trắc thủy văn; do đó, khi khôi phục và phân loại các trận lũ này (Chương 2), buộc phải sử dụng một giá trị nhám đại diện (n = 0,04) để ước tính các tham số dòng chảy. Ngược lại, tại lưu vực sông Nghĩa Đô có trạm thủy văn Vĩnh Yên với mặt cắt đo đạc và chuỗi lưu lượng dài hạn, cho phép suy ngược (hiệu chỉnh) hệ số nhám riêng cho khu vực này ($n \approx 0,095$). Như vậy, hai giá trị thuộc về hai bối cảnh số liệu khác nhau và đều nhất quán với nguyên tắc ưu tiên số liệu thực đo: nơi có số liệu thì áp dụng tính toán dựa trên số liệu thực, nơi không có số liệu thì dùng giá trị đại diện.

Ngay cả giá trị hiệu chỉnh tại Vĩnh Yên cũng cần được nhìn nhận thận trọng. Hệ số nhám ở đây không được đo trực tiếp mà suy ngược từ công thức Manning, trong đó độ dốc lòng dẫn là một đầu vào quan trọng. Độ dốc lòng dẫn sử dụng trong luận án (1,57% tại đoạn Vĩnh Yên) lại được trích xuất từ mô hình số độ cao thông qua thuật toán hướng dòng chảy, nên bản thân nó mang sai số do độ phân giải địa hình và đặc điểm của thuật toán. Vì giá trị n suy ngược tỷ lệ với căn bậc hai của độ dốc, một phần độ lớn của $n \approx 0,095$ có thể bắt nguồn từ sai số ước tính độ dốc, không hoàn toàn phản ánh độ nhám thực của lòng dẫn. Để tách bạch hai ảnh hưởng này, cần có số liệu đo đạc thực tế về độ dốc lòng dẫn tại các mặt cắt tương ứng – nội dung mà luận án chưa thực hiện và nên được bổ sung khi áp dụng trong thực tế. Hai giá trị độ dốc và độ nhám có tương quan chặt chẽ với nhau trong công thức thủy lực và có thể được tạo thành bởi vô số cặp

nghiệm, do đó, bất kỳ giá trị quan trắc nào về địa hình đều có ý nghĩa rất quan trọng trong việc giảm thiểu sai số.

Việc lựa chọn giá trị nhám tác động trực tiếp đến kết quả phân cấp: ở cùng lưu lượng, nhám lớn hơn cho vận tốc nhỏ hơn (và gián tiếp làm giảm công suất đơn vị). Do đó, giá trị đại diện n = 0,04 dùng cho vùng không có số liệu thiên về ước tính vận tốc – công suất cao hơn, tức nghiêng về phía cảnh báo an toàn, trong khi giá trị hiệu chỉnh n ≈ 0,095 cho kết quả gần thực đo hơn tại Vĩnh Yên. Vì vậy, khi mở rộng phạm vi áp dụng, việc hiệu chỉnh hệ số nhám và độ dốc lòng dẫn theo số liệu đo đạc của từng tiểu vùng, cùng với đánh giá độ nhạy của phân cấp theo giá trị nhám, là cần thiết để kiểm soát độ bất định.

3.6.3. Tính độc lập của công suất và vận tốc; phân định "lũ quét" với "lũ nhanh"

Công suất đơn vị (ω) và vận tốc (v) có liên hệ với nhau nhưng không hoàn toàn quy về nhau; kết quả phân bố không gian tại Nghĩa Đô cung cấp một số bằng chứng cho nhận định này. Tại các điểm có vận tốc xấp xỉ nhau – đầu nhánh Nậm Bắt (v = 3,26 m/s) và đầu nhánh Nậm Lằng (v = 3,15 m/s) – công suất đơn vị lại khác nhau (khoảng 2.300 so với 2.100 W/m²) do khác biệt về lưu lượng, độ sâu và độ dốc lòng dẫn. Ở chiều ngược lại, các nhánh thượng nguồn tuy có độ dốc lòng dẫn lớn nhưng vì mực nước chỉ dưới 0,5 m nên vận tốc không vượt 2,0 m/s và công suất đơn vị phổ biến dưới 500 W/m². Nếu ω chỉ là hàm đơn trị của v thì các điểm tính toán sẽ tập trung quanh một đường chéo của bảng phân cấp (Bảng 2 - 5); kết quả tại Nghĩa Đô cho thấy các điểm phân bố vào nhiều ô khác nhau, phù hợp với quan điểm rằng hai đại lượng bổ sung thông tin cho nhau.

Kết quả Nghĩa Đô cũng giúp làm rõ thêm ranh giới giữa "lũ quét" và "lũ nhanh". Trận lũ ngày 09/09/2024 gây thiệt hại đáng kể (khoảng 4 tỷ đồng, vỡ thân đập Bản Rịa) và được phân cấp ở mức "Cao", chưa đến mức "Rất cao", do vận tốc lớn nhất khoảng 4,0 m/s và công suất đơn vị cực đại gần 3.900 W/m². Mức phân cấp này nhất quán với diễn biến thực tế: trận lũ gây hư hỏng hạ tầng nhưng không gây thiệt hại về người, khác với các trận được xếp "Rất cao" như Nậm Păm 2021 hay Hồ Bốn 2023 (vận tốc trên 7 m/s, công suất trên 7.000 W/m², có thiệt hại về người). Ở mức thấp hơn, các trận như Bản Lầu hay Lương Sơn – tuy được truyền thông gọi là lũ quét nhưng công suất chỉ 222 ÷ 324 W/m² – được xếp "Thấp", phù hợp với tính chất ngập lũ của chúng. Như vậy, trên các trường hợp đã xét, thang công suất – vận tốc sắp xếp các trận lũ theo thứ bậc tương đối nhất quán với mức độ thiệt hại; trận 09/09/2024 nằm ở vị trí trung gian phù hợp với đặc điểm của nó. Ngưỡng vận tốc tối thiểu v ≥ 2,0 m/s đóng vai trò sàng lọc tại Nghĩa Đô, loại bớt các ô lưới thượng nguồn dốc nhưng nông vốn có thể trở thành cảnh báo khống nếu chỉ dựa vào công suất hoặc độ dốc. Những nhận định này dựa trên một số trận lũ cụ thể và cần được kiểm chứng thêm để củng cố.

3.6.4. Thời gian cảnh báo và quan hệ đánh đổi với độ tin cậy

Chuỗi mô phỏng theo từng thời điểm tại trạm Vĩnh Yên (mục 3.4.3) cho thấy một quan hệ đánh đổi có ý nghĩa thực tiễn. Khi lượng mưa thực đo tích lũy tăng dần, lưu lượng đỉnh dự báo tăng từ 127,51 m^3/s (lúc 01:00) lên 681,11 m^3/s (lúc 15:00), tiệm cận giá trị thực đo 709 m^3/s; đồng thời, thời gian cảnh báo trước thu hẹp từ khoảng 250 phút xuống 30 phút và chuyển âm sau khi đỉnh lũ đã qua. Trong trận lũ này, lượt tính lúc 06:00 (khi lượng mưa giờ bình quân lưu vực đạt cực đại 33,24 mm) cân bằng tốt nhất giữa hai đại lượng đó: mô hình dự báo lưu lượng 428,49 m^3/s, thời gian cảnh báo trước khoảng 4 giờ 10 phút tại Vĩnh Yên. Diễn biến này minh họa cụ thể, cho một lưu vực thực, mâu thuẫn giữa độ tin cậy (mưa diễn ra càng nhiều thì ước tính lưu lượng càng sát thực) và thời gian cảnh báo (mưa diễn ra càng nhiều thì thời gian còn lại càng ngắn).

So với hệ thống FFGS với thời gian cảnh báo 6 ÷ 72 giờ, có thể thấy hai cách tiếp cận vận hành trên hai loại đầu vào khác nhau. FFGS đạt thời gian dài nhờ sử dụng mưa dự báo; trong phần thử nghiệm này, luận án chủ ý chỉ dùng mưa thực đo, nên thời gian cảnh báo bị giới hạn bởi độ trễ tập trung dòng chảy của lưu vực (với Nghĩa Đô, thời gian tập trung dòng chảy khoảng 3,7 giờ và thời gian đạt đỉnh khoảng 3,9 giờ). Trong trận lũ này, với mưa thực đo, thời gian cảnh báo đạt được ở thời điểm thuận lợi nhất là khoảng 4 giờ, kèm theo ưu điểm hạn chế cảnh báo khống do mọi cảnh báo đều gắn với lượng mưa đã thực sự xảy ra. Vì quy trình tính toán không phụ thuộc vào nguồn mưa, việc bổ sung mưa dự báo hạn cực ngắn có thể kéo dài thời gian cảnh báo mà không phải thay đổi cấu trúc mô hình; tuy nhiên, hiệu quả thực tế còn tùy thuộc vào độ tin cậy của mưa dự báo.

3.6.5. Khả năng tương thích với khung pháp lý và định hướng ứng dụng

Kết quả thử nghiệm cho thấy đầu ra của phương pháp có thể phục vụ hai mục đích. Bản đồ thể hiện nguy cơ lớn nhất tại từng điểm (Hình 3 - 19) phù hợp cho công tác phân vùng, quy hoạch và bố trí dân cư; chuỗi bản đồ nguy cơ theo từng giờ (mục 3.4.3) phục vụ cảnh báo và vận hành ứng phó. Cùng một quy trình tính toán cho ra cả hai loại sản phẩm, nên đầu ra của luận án vừa có thể làm cơ sở cho bản đồ phân vùng, vừa hỗ trợ cảnh báo sớm.

Để nâng cao khả năng ứng dụng vào thực tiễn quản lý, kết quả phân cấp cần được đặt trong tương quan với khung pháp lý hiện hành về cấp độ rủi ro thiên tai (Quyết định số 18/2021/QĐ-TTg) và dự thảo quy định cấp độ nguy cơ lũ quét, sạt lở đất của Bộ Nông nghiệp và Môi trường. Hai hệ phân cấp dựa trên cơ sở khác nhau: khung pháp lý xác định cấp độ rủi ro chủ yếu theo độ lớn lượng mưa và phạm vi hành chính chịu ảnh hưởng, còn thang phân cấp trong luận án dựa trên đặc trưng dòng chảy (công suất và vận tốc) ở độ phân giải điểm. Vì vậy, để đầu ra tương thích với hệ thống quản lý nhà nước, cần thiết lập một bảng tương ứng giữa năm cấp nguy cơ công suất – vận tốc và

các cấp độ rủi ro thiên tai theo quy định, kèm theo bước tổng hợp kết quả dạng điểm về đơn vị hành chính.

3.6.6. Tổng hợp đóng góp và hạn chế bộc lộ qua thử nghiệm

Trong phạm vi lưu vực thử nghiệm, kết quả áp dụng cho thấy một số điểm tích cực. Thang phân cấp theo công suất và vận tốc phản ánh phù hợp tính chất của trận lũ 09/09/2024 và sắp xếp trận lũ này tương đối hợp lý so với một số trận lũ quét lịch sử trong khu vực. Quy trình "lưu vực ô lưới" kết hợp mô hình thủy văn tập trung tạo ra bản đồ nguy cơ dạng điểm cho một lưu vực rộng khoảng 135 km² với hệ số NASH kiểm định 0,81 và tổng thời gian tính toán khoảng 3 phút. Khả năng mở rộng ra quy mô lớn hơn cần được đánh giá thêm. Các tham số đo đạc tại Nghĩa Đô cũng nằm trong vùng giá trị khái quát hóa cho khu vực miền núi phía Bắc, góp thêm một bằng chứng cho tính hợp lý của bộ tham số.

Bên cạnh đó, thử nghiệm làm rõ một số hạn chế. Trước hết, do bản chất của mô hình thủy văn tập trung, kết quả mô phỏng không tái hiện được đỉnh lũ thứ cấp và còn sai khác so với thực đo – nguyên nhân đã được phân tích khi so sánh kết quả mô phỏng với số liệu quan trắc tại Vĩnh Yên (mục 3.4.1). Tiếp đến, độ tin cậy của phương pháp dựa trên mưa bị giới hạn bởi khả năng nắm bắt mưa cục bộ của mạng lưới quan trắc; các bất thường ở trận 22/10/2018 và 01/05/2019, khi lượng mưa ghi nhận không tương xứng với quy mô lũ, cho thấy giới hạn này tồn tại ngay cả khi mật độ trạm đã được cải thiện. Cuối cùng, công suất đơn vị tại Nghĩa Đô được tính với khối lượng riêng của nước trong (ρ = 1.000 kg/m³), nên các giá trị công suất và mức nguy cơ tương ứng nên được hiểu là cận dưới, bởi dòng lũ quét trên thực tế thường cuốn theo bùn đá có khối lượng riêng lớn hơn. Công thức công suất trong luận án cho phép điều chỉnh tham số ρ, do đó việc đưa khối lượng riêng của hỗn hợp bùn đá vào tính toán là một hướng có thể thực hiện để phản ánh đầy đủ hơn mức độ nguy hiểm của những trận lũ giàu trầm tích, và là một nội dung nên được tiếp tục trong các nghiên cứu sau.

3.7. Tiểu kết chương 3

Nội dung chương 3 tập trung vào việc áp dụng quy trình xác định nguy cơ lũ quét cho lưu vực sông Nghĩa Đô, trong đó mô phỏng lại trận lũ 9/2024 trên lưu vực với dữ liệu kiểm chứng tại trạm thủy văn Vĩnh Yên. Bằng việc sử dụng dữ liệu thực đo trong quá khứ tại trạm thủy văn Vĩnh Yên, hệ số tổn thất ban đầu của lưu vực (có cửa ra là trạm thủy văn Vĩnh Yên) được xác định là λ = 0,1 trên cơ sở đánh giá 16 trận lũ trong những năm gần đây. Bên cạnh đó, đường lũ đơn vị không thứ nguyên cho lưu vực cũng được tính toán dựa trên trận lũ ngày 21/8/2022. Hai tham số này (hệ số tổn thất ban đầu và đường lũ đơn vị không thứ nguyên) sẽ được sử dụng chung cho toàn bộ các lưu vực khác trong phạm vi nghiên cứu. Các tham số thủy văn khác là các tham số riêng của từng lưu vực.

Trên cơ sở phân tích GIS, mỗi điểm thuộc khu vực nghiên cứu có các giá trị riêng về độ dốc, chỉ số CN…, thuật toán hướng dòng chảy đã được sử dụng để xác định mỗi lưu vực thượng nguồn, từ đó tổng hợp thành bản đồ đại diện lưu vực. Khi đó ứng với mỗi vị trí, các giá trị này đại diện giá trị bình quân của toàn bộ ô lưới thượng nguồn dựa trên nguyên tắc lưu vực ô lưới. Các bản đồ không gian này có ý nghĩa quan trọng, làm thông số đầu vào cho mô hình mô phỏng mưa – dòng chảy tại mọi vị trí.

Kết quả xây dựng mô hình mô phỏng mưa – dòng chảy cho lưu vực có cửa ra tại trạm thủy văn Vĩnh Yên cho hệ số NASH giai đoạn hiệu chỉnh và kiểm định lần lượt là 0,95 và 0,81. Một số trận lũ khác cũng được đánh giá cho thấy sự phù hợp của mô hình mưa dòng chảy đã xây dựng, làm cơ sở tính toán nguy cơ lũ quét trên lưu vực.

Dựa trên số liệu mặt cắt tại trạm thủy văn Vĩnh Yên, các tham số đặc trưng hình thái mặt cắt r = 2,5 và k = 8,72 đã được xác định (số liệu thực tế). Các tham số này được sử dụng chung cho toàn bộ mặt cắt bất kỳ thuộc khu vực nghiên cứu phục vụ tính toán mực nước, bề rộng dòng chảy và vận tốc dòng chảy tại mọi vị trí.

Kết quả mô phỏng nguy cơ lũ quét cho khu vực nghiên cứu ở trận lũ ngày 09/09/2024 (sau bão Yagi) cho thấy nguy cơ lũ quét cao đã xuất hiện trên sông Nghĩa Đô. Mọi vị trí đều được mô phỏng đường quá trình lũ và tính toán nguy cơ lũ quét theo thời gian. Thời gian cảnh báo sớm đạt trung bình từ 40 phút đến vài giờ, tùy thuộc vào độ trễ của dòng chảy lũ thuộc lưu vực tính toán. Các lưu vực có thời gian cảnh báo nhỏ hơn 30 phút thường chỉ xuất hiện nguy cơ lũ quét thấp và rất thấp. Nếu được kết hợp với lượng mưa dự báo có độ tin cậy cao có thể nâng thời gian cảnh báo lên đáng kể.

Luận án cũng đã xây dựng được công cụ mô phỏng nguy cơ lũ quét bằng việc tích hợp thuật toán tính toán mưa – dòng chảy đã xây dựng vào công cụ, bên cạnh đó, việc hiển thị trực quan theo các tiểu lưu vực khi click vào một vị trí giúp làm rõ hơn nguyên tắc lưu vực ô lưới, nguyên tắc luận án dùng để xác định nguy cơ lũ quét tại mọi vị trí dựa vào kết quả tính toán thủy văn. Kết quả áp dụng thử nghiệm cũng đã được thảo luận và so sánh với một số nghiên cứu liên quan, làm rõ những đóng góp và hạn chế của phương pháp.

KẾT LUẬN, KIẾN NGHỊ

Những kết quả đạt được

Luận án đã đạt được các kết quả chính sau:

Về mục tiêu thứ nhất (phân cấp nguy cơ và xây dựng bộ công cụ):

(1) Xác lập được ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét cho khu vực miền núi phía Bắc dựa trên công suất đơn vị dòng chảy và vận tốc, gồm 5 cấp theo công suất đơn vị (< 200; 200–500; 500–1.200; 1.200–2.000; ≥ 2.000 W/m²) kết hợp điều kiện tối thiểu v ≥ 2,0 m/s và h ≥ 0,5 m; ngưỡng đã được kiểm chứng với 9 trận lũ quét thực tế. Phương pháp phản ánh đúng bản chất nguy hiểm của dòng chảy và giải thích được vì sao lũ quét không hình thành trên đỉnh núi hay trên các sông lớn.

(2) Xây dựng được quy trình và bộ công cụ xác định nguy cơ lũ quét đến độ phân giải điểm theo nguyên tắc "lưu vực ô lưới", với tổng thời gian tính khoảng 3 phút cho lưu vực rộng ~135 km².

(3) Khái quát hóa được hình thái mặt cắt sông suối nhỏ miền núi phía Bắc bằng hai chỉ số đặc trưng r = 2,0 và k = 8,5 (trung vị của 132 mặt cắt trên 8 hệ thống sông suối), cho phép ước tính các tham số thủy lực (vận tốc, mực nước, bề rộng) trong điều kiện thiếu số liệu.

Về mục tiêu thứ hai (áp dụng cho lưu vực điển hình):

(4) Áp dụng thành công cho lưu vực sông Nghĩa Đô: hiệu chỉnh hệ số tổn thất ban đầu λ = 0,1 (từ 16 trận lũ) và tham số mặt cắt tại chỗ r = 2,5; k = 8,72; mô hình mưa – dòng chảy đạt hệ số NASH 0,95 (hiệu chỉnh) và 0,81 (kiểm định); mô phỏng trận lũ 09/09/2024 cho đỉnh lũ ~681 m³/s, phân cấp nguy cơ "Cao" trên suối chính Nghĩa Đô, thời gian cảnh báo sớm đạt tới ~4 giờ tại trạm thủy văn Vĩnh Yên.

Các kết quả trên đã trả lời đầy đủ ba câu hỏi nghiên cứu và chứng minh ba luận điểm bảo vệ của luận án: (i) công suất đơn vị và vận tốc là cơ sở vật lý để phân cấp nguy cơ lũ quét; (ii) nguyên tắc "lưu vực ô lưới" cho phép xác định nguy cơ đến độ phân giải điểm với tốc độ đáp ứng vận hành; (iii) hình thái mặt cắt khái quát hóa bằng r, k cho phép áp dụng cho lưu vực thiếu số liệu.

Những đóng góp mới

- Đề xuất ngưỡng phân cấp nguy cơ lũ quét dựa trên công suất đơn vị dòng chảy và vận tốc – lần đầu được xây dựng cho khu vực miền núi phía Bắc, phản ánh bản chất vật lý sức tàn phá của dòng chảy, phân biệt được lũ quét với lũ thường.
- Đề xuất nguyên tắc "lưu vực ô lưới": sử dụng mô hình thủy văn tập trung để tạo ra kết quả dạng phân bố đến độ phân giải điểm theo không gian và thời gian. Nguyên tắc này kết hợp được độ chi tiết theo điểm của các phương pháp chỉ số (FFPI, FR, MCA) với bản chất vật lý của phản ứng thủy văn lưu vực, đồng thời

chi tiết hơn các hệ thống cảnh báo theo tiểu lưu vực (FFG/FFGS) vốn chỉ cho một giá trị nguy cơ bình quân.

- Khái quát hóa hình thái mặt cắt bằng hai chỉ số r và k, cho phép ước tính các tham số thủy lực và áp dụng phương pháp cho các lưu vực vừa và nhỏ thiếu số liệu khảo sát.

Tồn tại và kiến nghị

Sử dụng dữ liệu mưa thực đo khi áp dụng cho lưu vực sông Nghĩa Đô để xác định nguy cơ lũ quét gây ra thời đoạn cảnh báo quá ngắn và chưa phù hợp với khả năng ứng phó trong phòng, chống thiên tai. Bên cạnh đó, bước thời gian trong tính toán nguy cơ lũ quét chưa hoàn toàn phù hợp đối với các lưu vực rất nhỏ. Khi đó, bước thời gian ghi nhận dữ liệu quan trắc mưa lớn hơn độ trễ của lưu vực, điều này dẫn đến việc không đáp ứng được thời gian cảnh báo một cách phù hợp hoặc quá gần với thời điểm xảy ra lũ quét. Để khắc phục điều này, bước thời gian quan trắc cần liên tục (ví dụ như đo 10 phút/lần) để mang lại kết quả tốt nhất. Trong điều kiện hiện nay, các trạm quan trắc mưa phổ biến trên toàn quốc cung cấp dữ liệu đo mưa theo giờ, điều này có nghĩa phương pháp đã đề xuất phù hợp với các lưu vực có độ trễ lớn hơn 1 giờ nhằm đáp ứng được nhu cầu cảnh báo. Trong tương lai với dữ liệu quan trắc chi tiết hơn, phương pháp này sẽ đạt hiệu quả tốt hơn.

Trong tính toán áp dụng cho sông Nghĩa Đô, giả thiết được đặt ra là mưa sẽ không xảy ra sau thời điểm tính toán, điều này có thể dẫn đến những sai số tạm thời nếu giả thiết này không đúng. Để hạn chế điều này, lượng mưa dự báo hạn cực ngắn (từ 1÷6 giờ) có thể được sử dụng để kết hợp với lượng mưa thực đo nhằm xác định nguy cơ lũ quét và tăng thời gian cảnh báo. Hiện nay, các hệ thống radar thời tiết có thể cung cấp các thông số mỗi 10 phút, do vậy trên cơ sở đó có thể kết hợp dữ liệu từ radar thời tiết và quan trắc mưa tại các trạm để lập mô hình dự báo hạn cực ngắn phục vụ cảnh báo sớm nguy cơ lũ quét một cách hiệu quả. Tuy nhiên, đến nay dự báo mưa hạn cực ngắn với độ chính xác cao vẫn là bài toán khó. Luận án không đánh giá độ chính xác, độ tin cậy của lượng mưa dự báo, nên không đưa mưa dự báo vào tính toán. Công cụ đã có sẵn đầu vào cho lượng mưa dự báo; khi có nguồn mưa dự báo đủ tin cậy, có thể đưa ngay vào mô phỏng mà không phải thay đổi khung tính toán.

Các tham số thực nghiệm như chỉ số CN, độ nhám, số liệu mặt cắt… là các dữ liệu rất tốn kém để đạt được độ chính xác trong ước tính các tham số thủy văn thủy lực. Mỗi khu vực sẽ có những đặc trưng riêng, do vậy để xác định nguy cơ lũ quét cho một khu vực cụ thể, cần có những khảo sát, đánh giá cụ thể cho từng khu vực nhằm tăng cường độ tin cậy của mô hình thủy văn được xây dựng.

Chỉ số hình thái mặt cắt r và k là các chỉ số có ý nghĩa quan trọng trong việc ước tính các tham số thủy lực trong điều kiện thiếu số liệu hoặc trong các bài toán không mô phỏng thủy lực. Luận án đã sử dụng 132 mặt cắt rải rác trên toàn vùng miền núi phía Bắc để khái quát hóa tham số, tuy nhiên con số này vẫn quá khiêm tốn so với toàn bộ khu vực. Do đó, cần có sự đầu tư và chiến lược xác định chỉ số r và k cho từng khu vực,

tiểu khu vực dựa trên sự tương đồng về điều kiện thủy văn và địa hình để các chỉ số này có độ tin cậy tốt hơn.

Phương pháp SCS-CN là một phương pháp mô phỏng mưa – dòng chảy, có phạm vi áp dụng cho các lưu vực có diện tích nhỏ hơn 250km², do đó theo nguyên tắc lưu vực ô lưới, các điểm nằm trên sông lớn (mà có diện tích lưu vực thượng nguồn lớn hơn 250km²) không là đối tượng trong mô phỏng thủy văn của phương pháp này. Để có kết quả cho các điểm trên, cần chuyển về mô phỏng thủy lực nhằm đảm bảo độ tin cậy.

Nguyên tắc lưu vực ô lưới không diễn toán dòng chảy giữa các điểm, nên chưa mô tả quá trình truyền lũ và bùn cát, vật liệu bị cuốn từ thượng nguồn về hạ lưu; kiến nghị dùng kết quả cùng bản đồ nhạy cảm sạt lở, lũ bùn đá để đánh giá tác động của vật liệu bị cuốn từ thượng nguồn.

Công suất dòng chảy trong luận án hiện được tính với khối lượng riêng của nước trong ($\rho = 1.000$ kg/m³), do đó các giá trị công suất và mức nguy cơ tương ứng nên được hiểu là cận dưới; trên thực tế, dòng lũ quét cuốn theo nhiều bùn đá có khối lượng riêng lớn hơn nên công suất dòng chảy thực tế sẽ cao hơn. Việc đưa khối lượng riêng của hỗn hợp bùn đá vào tính toán là một nội dung cần tiếp tục nghiên cứu.

Vận tốc dòng chảy trong luận án tính theo công thức Manning, với giả thiết bán kính thủy lực xấp xỉ độ sâu trung bình của dòng chảy. Công thức Manning áp dụng cho dòng chảy đều, còn giả thiết bán kính thủy lực xấp xỉ độ sâu chỉ chặt chẽ khi bề rộng lòng dẫn lớn hơn nhiều lần độ sâu [161], thường gặp ở sông đồng bằng. Ở suối miền núi khi có lũ quét, lòng dẫn hẹp và dốc, dòng chảy biến đổi nhanh và có thể mang nhiều bùn đá, nên vận tốc và công suất đơn vị dòng chảy tính theo hai giả thiết này có sai số; mức sai số chưa được đánh giá trong phạm vi luận án.

Bản đồ nguy cơ lũ quét trong luận án thể hiện cấp cường độ của dòng chảy lũ ứng với từng trận mưa thực đo hoặc dự báo. Để có bản đồ nguy cơ theo xác suất xuất hiện, cần chạy cùng chuỗi tính với mưa thiết kế ứng với các tần suất khác nhau và đối chiếu với tần suất các trận lũ quét đã xảy ra; đây là hướng phát triển tiếp theo của luận án.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo

Cần triển khai nghiên cứu xác định chỉ số hình thái mặt cắt cho từng khu vực, tiểu khu vực trên phạm vi toàn quốc để ước tính các tham số tính toán nguy cơ lũ quét tin cậy hơn, hướng tới bài toán xác định nguy cơ lũ quét trên diện rộng.

Cần triển khai nghiên cứu đánh giá độ tin cậy của các dữ liệu mưa dự báo, đề xuất khuyến nghị lựa chọn lượng mưa dự báo thời đoạn cực ngắn (dưới 6 giờ) phục vụ tính toán nguy cơ lũ quét cho các lưu vực vừa và nhỏ trên phạm vi toàn quốc nhằm hạn chế các cảnh báo khống.

Cần triển khai nghiên cứu tích hợp khối lượng riêng của hỗn hợp bùn đá vào tính công suất dòng chảy để phản ánh đầy đủ hơn mức nguy hiểm của lũ quét giàu trầm tích.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Lê Văn Thìn và Trần Đình Hòa, "Các phương pháp xác định nguy cơ lũ quét," *Tạp chí Nông nghiệp & Phát triển nông thôn*, vol. T9, p. 164÷172, 2023. Địa chỉ: https://vawr.org.vn/Upload/BaibaoKH/ths-le-van-thin-tcnnptnt2023-166-174.pdf.

2. Lê Văn Thìn, "Phân tích một số đặc điểm hình thành lũ quét tại xã Chà tở, huyện Nậm Pồ, tỉnh Điện Biên tháng 7/2023," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, p. 99÷103, 2023. Địa chỉ: https://vawr.org.vn/Upload/BaibaoKH/le-van-thin_ptntd-2023.pdf.

3. Lê Văn Thìn, "Nghiên cứu phương pháp hiệu chỉnh hệ số tổn thất ban đầu và xây dựng đường quá trình lũ đơn vị trong tính toán thủy văn cho lưu vực suối Bắc Cuông, tỉnh Lào Cai," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, vol. 84, p. 67÷77, 2024. Địa chỉ: https://vawr.org.vn/Upload/BaibaoKH/le-van-thin-84-2024.pdf.

4. Thin Van Le, Duong Cao Phan, Hoa Dinh Tran, Giap Dang Nguyen, "Characterizing cross-sectional shape indices for hydraulic estimation in small mountainous streams: a case study in Northern Vietnam," *Sustainable Water Resources Management*, vol. 12, no. 1, Art. no. 3, 2026, doi: 10.1007/s40899-025-01313-5.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Trần Thanh, "Hiện trường tan hoang khu vực lũ quét làm 10 người chết và mất tích ở Sa Pa," Báo điện tử Dân Trí, 13/09/2023. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://dantri.com.vn/xa-hoi/hien-truong-tan-hoang-khu-vuc-lu-quet-lam-10-nguoi-chet-va-mat-tich-o-sa-pa-20230913140950803.htm.

[2] Thanh Tiến and Hải Đăng, "Lũ quét lịch sử ở Mù Cang Chải: Nhìn thẳng nguyên nhân từ chính con người," Báo điện tử Nông nghiệp Việt Nam, 18/9/2023. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://nongnghiep.vn/lu-quet-lich-su-o-mu-cang-chai-nhin-thang-nguyen-nhan-tu-chinh-con-nguoi-d360230.html. [Truy cập 20/9/2023].

[3] Tạp chí KTTV tổng hợp, "Thiên tai năm 2022 gây thiệt hại gần 19.500 tỷ đồng," Tổng cục Khí tượng Thủy văn, 19/4/2023. [Trực tuyến]. Địa chỉ: http://vnmha.gov.vn/kttv-voi-san-xuat-va-doi-song-106/thien-tai-nam-2022-gay-thiet-hai-gan-19-500-ty-dong-14462.html. [Truy cập 26/5/2023].

[4] Magilligan, F.J., Buraas, E.M. and Renshaw, C.E., "The efficacy of stream power and flow duration on geomorphic responses to catastrophic flooding," *Geomorphology,* vol. 228, p. 175÷188, 2015. DOI:10.1016/j.geomorph.2014.08.016.

[5] Marchi, Lorenzo, Cavalli, Marco, Amponsah, William, Borga, Marco and Crema, Stefano, "Upper limits of flash flood stream power in Europe," *Geomorphology,* vol. 272, no. 0169-555X, p. 68–77, 2016. DOI:10.1016/j.geomorph.2015.11.005.

[6] Magilligan, Francis J., "Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods," *Geomorphology,* vol. 5, no. 3-5, pp. 373-390, 1992. DOI:10.1016/0169-555x(92)90014-f.

[7] Costa, John E., "Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States," *Journal of Hydrology,* vol. 93, no. 3-4, pp. 313-338, 1987. DOI:10.1016/0022-1694(87)90102-8.

[8] Marco Borga, Markus Stoffel, Lorenzo Marchi, Francesco Marra and Matthias Jakob, "Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows," *Journal of Hydrology,* vol. 518, pp. 194-205, 2014. DOI:10.1016/j.jhydrol.2014.05.022.

[9] ACTIF (2004), "Some research needs for river flood forecasting in FP6," in *Framework Programme (FP6) Integrated Project on flood and drought*

forecasting under within the priority of global change and ecosystems, Bologna, 2004. Địa chỉ: https://web.archive.org/web/20050519010725/actif-ec.net/documents/ACTIFResearchNeedsfor%20FP6V1.4.pdf.

[10] Social Aspects and Stakeholder Involvement in Integrated Flood Management, Geneva, Switzerland: Associated Programme on Flood Management, 2006. Địa chỉ: floodmanagement.info/publications/policy/ifm_social_aspects/Social_Aspects_and_Stakeholder_Involvement_in_IFM_En.pdf.

[11] NOAA, "Flash Flood Early Warning System Reference Guide," University Corporation forAtmospheric Research, Denver, CO, USA, 2010. Địa chỉ: http://web.archive.org/web/20130726062043/http://www.meted.ucar.edu/communities/hazwarnsys/ffewsrg/FF_EWS.Chap.2.pdf.

[12] WMO, "Guide to hydrological practices Volume II management of water resources and application of hydrological practices," WMO-No. 168, Geneva 2, Switzerland, 2009. Địa chỉ: https://www.hydrology.nl/images/docs/hwrp/WMO_Guide_168_Vol_II_en.pdf.

[13] Cao Đăng Dư and Lê Bắc Huỳnh, Lũ quét: Nguyên nhân và biện pháp phòng tránh - Tập 1, Hà Nội: Nhà xuất bản Nông nghiệp, 2000. Địa chỉ: https://imh.ac.vn/lu-quetnguyen-nhan-va-bien-phap-phong-tranh/.

[14] Lã Thanh Hà and Ngô Trọng Thuận, Những điều cần biết về lũ quét, Hà Nội: Nhà xuất bản Bản đồ, 2009.

[15] Kenvin Sene, Flash Flood, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, 2013. Địa chỉ: https://prffwc.synthasite.com/resources/Kevin%20Sene%20auth.%20Flash%20Floods%20%20Forecasting%20and%20Warning%20p.21-23.pdf.

[16] Lã Thanh Hà, "Điều tra, khảo sát phân vùng và cảnh báo khả năng xuất hiện lũ quét ở vùng núi Việt Nam - Giai đoạn 1," Bộ Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội, 2009.

[17] Ngô Đình Tuấn, "Lũ quét và phòng tránh lũ quét," Hội bảo vệ thiên nhiên và môi trường Việt Nam, 23/03/2023. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.vacne.org.vn/lu-quet-va-phong-tranh-lu-quet/221230.html. [Truy cập 16/05/2023].

[18] Trần Văn Tư, "Lũ quét ở Việt Nam: Hiện trạng và thành tựu 20 năm nghiên cứu," *TTHNKH Kỷ niệm 35 năm Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam 1975-2010 (Tiểu ban CKHTĐ),* pp. 193-203, 2010.

[19] Lê Như Ngà, "Luận án: Xây dựng mô hình tích hợp viễn thám và GIS xác định nguy cơ tai biến lũ quét lưu vực sông Năng, tỉnh Bắc Kạn," Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Hà Nội, 2017.

[20] *Quyết định số 46/2014/QĐ-TTg ngày 15/08/2014 của Thủ tướng Chính phủ Quy định về dự báo, cảnh báo và truyền tin thiên tai,* 2014. Địa chỉ: https://datafiles.chinhphu.vn/cpp/files/vbpq/2014/08/46-2014.signed_01.pdf.

[21] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), "Hazard," 2017. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.undrr.org/terminology/hazard. [Truy cập 27/10/2026].

[22] Bộ Nông nghiệp và Môi trường, "Thông tư số 97/2025/TT-BNNMT ngày 31/12/2025 quy định kỹ thuật điều tra, thành lập bản đồ hiện trạng, bản đồ phân vùng nguy cơ, phân vùng rủi ro do sạt lở đất, lũ quét tỷ lệ 1:10.000 và 1:2.000," Bộ Nông nghiệp và Môi trường, Hà Nội, 2025. Địa chỉ: https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=216614.

[23] United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), "Disaster risk," 2017. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk. [Truy cập 27/10/2026].

[24] Javier Hervas and Peter Bobrowsky, "Mapping: Inventories, Susceptibility, Hazard and Risk," in *Landslides - Disaster Risk Reduction*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2009, pp. 321-349.DOI:10.1007/978-3-540-69970-5_19.

[25] Sh. A. Abu El-Magd, "Flash Flood Hazard Mapping Using {GIS} and Bivariate Statistical Method at Wadi Bada'a, Gulf of Suez, Egypt," *Journal of Geoscience and Environment Protection,* vol. 07, no. 08, pp. 372-385, 2019. DOI:10.4236/gep.2019.78025.

[26] Vũ Bá Thao and Nguyễn Trung Kiên, "Phương pháp xác định khu vực rủi ro lũ bùn đá dựa vào bản đồ địa hình," *Tạp chí Khí tượng thủy văn,* vol. 5, pp. 37-46, 2020. DOI:10.36335/VNJHM.2020(713).37-46.

[27] R.A.Bagnold, "An Approach to the Sediment Transport Problem From General Physics," *Geological Survey Professional Paper,* vol. 422, no. I, 1966. Địa chỉ: https://pubs.usgs.gov/pp/0422i/report.pdf.

[28] Petit, F., Gob, F., Houbrechts, G. and Assani, A.A., "Critical specific stream power in gravel-bed rivers," *Geomorphology,* vol. 69, no. 1-4, pp. 92-101, 2005. DOI:10.1016/j.geomorph.2004.12.004.

[29] Rosbjerg, Dan and Rodda, John, "IAHS: a brief history of hydrology," *History of Geo- and Space Sciences,* vol. 10, no. 1, pp. 109-118, 2019. Địa chỉ: https://hgss.copernicus.org/articles/10/109/2019/hgss-10-109-2019.pdf.

[30] Achille Grimaldi, La Cassa Sacra, ovvero La soppressione delle manimorte in Calabria nel secolo 18. per Achille Grimaldi, Stamperia dell' Iride, 1863. Địa chỉ: https://books.google.com.vn/books?id=aZMUtEkF5ZIC&printsec=frontcover&hl=vi#v=onepage&q&f=false.

[31] Bush, Bernard S. and Barrick, M. J., "Emergency Experiences During Flash Floods," *Journal AWWA,* vol. 35, no. 1, pp. 81-87, 1943. DOI:10.1002/j.1551-8833.1943.tb19824.x.

[32] Seaman, E. A., "Notes on the Effect of Flash Flood on Stream Fish in West Virginia," *Copeia,* vol. 1950, no. 4, p. 320, 1950. DOI:10.2307/1437921.

[33] Katzer, T.L., Glancy, Patrick A. and Harmsen, Lynn, A brief hydrologic appraisal of the July 3-4, 1975, flash flood in Las Vegas Valley, Nevada, 1976. DOI:10.3133/ofr76100.

[34] Hales, John E., "The Kansas City Flash Flood of 12 September 1977," *Bulletin of the American Meteorological Society,* vol. 59, no. 6, p. 706–710, 1978. DOI:10.1175/1520-0477-59.6.706.

[35] American Meteorological Society, "Flash Floods—A National Problem," *Bulletin of the American Meteorological Society,* vol. 59, no. 5, p. 585–586, 1978. Địa chỉ: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/59/5/1520-0477-59_5_585.pdf.

[36] NOAA, National Weather Service forecasting handbook (No. 1 - 1979), University of Michigan Library (January 1, 1979), 1979. Địa chỉ:

https://books.google.com.vn/books?id=8jRRAAAAMAAJ&printsec=frontcover&hl=vi#v=onepage&q&f=false.

[37] Mogil, H. Michael, Monro, John C. and Groper, Herbert S., "NWS's Flash Flood Warning and Disaster Preparedness Programs," *Bulletin of the American Meteorological Society,* vol. 59, no. 6, pp. 690-699, 1978. DOI:10.1175/1520-0477(1978)059<0690:nffwad>2.0.co;2.

[38] Sweeney, Timothy L., "Modernized Areal Flash Flood Guidance," NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO 44, 1992. Địa chỉ: blob:https://repository.library.noaa.gov/b5d30498-51f8-4107-a32d-d4115491aea8.

[39] William W. Emmett, "The Channels and Waters of the Upper Salmon River Area, Idaho," United States Government Printing Office, Washington, 1975.DOI:10.3133/pp870a.

[40] Joseph Levy, Jr., "Flash Flood Guidance Improvement Team - Final Report: February 6, 2023 National Weather Service," River Forecast Center Development Management Team, [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.weather.gov/media/owp/oh/rfcdev/docs/ffgitreport.pdf. [Truy cập 06/11/2023].

[41] Georgakakos, Konstantine P., "A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting: 1. Formulation," *Water Resources Research,* vol. 22, no. 13, p. 2083–2095, 1986. DOI:10.1029/WR022i013p02096.

[42] Carpenter, T.M., Sperfslage, J.A., Georgakakos, K.P., Sweeney, T. and Fread, D.L., "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems," *Journal of Hydrology,* vol. 224, no. 1-2, p. 21–44, 1999. DOI:10.1016/S0022-1694(99)00115-8.

[43] Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W., Applied Hydrology, New York: Tata McGraw-Hill Education, 1988. Địa chỉ: https://wecivilengineers.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/10/applied-hydrology-ven-te-chow.pdf.

[44] Georgakakos, Konstantine P, Modrick, Theresa M., Shamir, Eylon and et al., "The Flash Flood Guidance System Implementation Worldwide: A Successful Multidecadal Research-to-Operations Effort," *Bulletin of the American*

Meteorological Society, vol. 103, no. 3, pp. 665-679, 2022. DOI:10.1175/BAMS-D-20-0241.1.

[45] A. Bournas and E. Baltas, "Investigation of the gridded flash flood Guidance in a Peri-Urban basin in greater Athens area, Greece," *Journal of Hydrology,* vol. 610, p. 127820, jul/2022. DOI:10.1016/j.jhydrol.2022.127820.

[46] Dieu Tien Bui, Paraskevas Tsangaratos, Phuong-Thao Thi Ngo, Tien Dat Pham and Binh Thai Pham, "Flash flood susceptibility modeling using an optimized fuzzy rule based feature selection technique and tree based ensemble methods," *Science of The Total Environment,* vol. 668, p. 1038÷1054, 2019. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.02.422.

[47] Maria Kaiser, Stephan Günnemann and Markus Disse, "Regional-scale prediction of pluvial and flash flood susceptible areas using tree-based classifiers," *Journal of Hydrology,* vol. 612, p. 128088, 2022. DOI:10.1016/j.jhydrol.2022.128088.

[48] Binh Thai Pham, Mohammadtaghi Avand, Saeid Janizadeh, Tran Van Phong, Nadhir Al-Ansari, Lanh Si Ho, Sumit Das, Hiep Van Le, Ata Amini, Saeid Khosrobeigi Bozchaloei, Faeze Jafari and Indra Prakash, "GIS Based Hybrid Computational Approaches for Flash Flood Susceptibility Assessment," *Water,* vol. 12, no. 3, p. 683, 2020. DOI:10.3390/w12030683.

[49] Ismail Elkhrachy, "Flash Flood Hazard Mapping Using Satellite Images and GIS Tools: A case study of Najran City, Kingdom of Saudi Arabia (KSA)," *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science,* vol. 18, no. 2, pp. 261-278, 2015. DOI:10.1016/j.ejrs.2015.06.007.

[50] Kairong Lin, Haiyan Chen, Chong-Yu Xu and et al., "Assessment of flash flood risk based on improved analytic hierarchy process method and integrated maximum likelihood clustering algorithm," *Journal of Hydrology,* vol. 584, p. 124696, 2020. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124696.

[51] Aqil Tariq, Jianguo Yan, Bushra Ghaffar, Shujing Qin , B. G. Mousa, Alireza Sharifi, Md. Enamul Huq and Muhammad Aslam, "Flash Flood Susceptibility Assessment and Zonation by Integrating Analytic Hierarchy Process and Frequency Ratio Model with Diverse Spatial Data," *Water,* vol. 14, no. 19, p. 3069, 2022. DOI:10.3390/w14193069.

[52] Romulus Costache, "Flash-flood Potential Index mapping using weights of evidence, decision Trees models and their novel hybrid integration," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,* vol. 33, no. 7, pp. 1375-1402, 2019. DOI:10.1007/s00477-019-01689-9.

[53] K. Khosravi, B. T. Pham, K. Chapi, A. Shirzadi, H. Shahabi, I. Revhaug, I. Prakash and D. Tien Bui, "A comparative assessment of decision trees algorithms for flash flood susceptibility modeling at Haraz watershed, northern Iran," *Science of The Total Environment,* vol. 627, pp. 744-755, jun/2018. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.01.266.

[54] MLIT, Manual for the method of setting mass-movement disasters warning criterion based on rainfall indices, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT) , 2005.

[55] Tổng cục Phòng, chống thiên tai, Lịch sử đê điều Việt Nam, Hà Nội: Nhà Xuất bản Khoa học Hà Nội, 2021.

[56] Trần Đức Hải, "Một vài nhận xét về dòng chảy từ sườn dốc," Cục Dự báo KTTV, Hà Nội, 1985. Địa chỉ: http://tapchikttv.vn/data/article/2411/3.pdf.

[57] Khiết Hưng, "Lũ quét, chủ động sẽ giảm thiệt hại," Báo Tuổi trẻ online, 11/8/2008. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://tuoitre.vn/lu-quet-chu-dong-se-giam-thiet-hai-273086.htm. [Truy cập 15/4/2023].

[58] Đoàn Quyết Trung, "Nhận xét bước đầu về lũ quét," *Hội nghị khoa học Viện Khí tượng Thủy văn,* pp. 27-32, 1992. Địa chỉ: tapchikttv.vn/data/article/2910/4.pdf.

[59] Vusta, "Những nghiên cứu về lũ quét," Liên hiệp các hội khoa học và kỹ thuật Việt Nam, 12/10/2005. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://vusta.vn/nhung-nghien-cuu-ve-lu-quet-p85812.html. [Truy cập 15/10/2023].

[60] Lê Bắc Huỳnh, "Về Nghiên cứu lũ quét," *Tạp chí Khí tượng Thủy văn,* pp. 21-27, 1992. Địa chỉ: http://tapchikttv.vn/data/article/2935/5.pdf.

[61] Trung tâm KTTV quốc gia, "Lũ quét," Trung tâm Khí tượng Thủy văn Quốc gia, 2013. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://web.archive.org/web/20130819052230/http://www.thoitietnguyhiem.net/ttnh/ttnh.aspx?page=14.

[62] Phạm Hiếu, "Nguy cơ lũ quét, sạt lở đất rất cao do mưa lớn ở Bắc Bộ," Báo điện tử Nông nghiệp Việt Nam, 17/8/2020. [Trực tuyến]. Địa chỉ:

https://nongnghiep.vn/nguy-co-lu-quet-sat-lo-dat-rat-cao-do-mua-lon-o-bac-bo-d271251.html. [Truy cập 18/4/2023].

[63] *Công văn số 329/PCLBW ngày 12/11/2004 của Ban Chỉ đạo Phòng chống lụt bão Trung ương,* 2004.

[64] Lã Thanh Hà, "Nghiên cứu xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ lũ quét phục vụ công tác phòng tránh lũ quét cho tỉnh Yên Bái," *Tạp chí Khí tượng Thủy văn,* vol. 578, no. 2, pp. 11-15, 2009. Địa chỉ: http://tapchikttv.vn/data/article/362/B%C3%A0i%203.pdf.

[65] Ngô Đình Tuấn, Hoàng Thanh Tùng and Nguyễn Xuân Phùng, "Xây dựng bản đồ khả năng lũ quét cho lưu vực sông Ba và sông Kone," *Tạp chí khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường,* vol. 14, 2006. Địa chỉ: https://vjol.info.vn/index.php/DHTL/article/view/26663/22816.

[66] Phạm Thị Hương Lan and Vũ Minh Cát, "Một số kết quả nghiên cứu xây dựng bản đồ tiềm năng lũ quét phục vụ công tác cảnh báo lũ quét vùng núi đồng bắc Việt Nam," *Tạp chí Khí tượng Thủy văn,* vol. 556, no. 2, pp. 11-16, 2008. Địa chỉ: http://tapchikttv.vn/data/article/1401/thang%202%202008_02.pdf.

[67] Hoàng Anh Huy, Hoàng Văn Đại and Văn Thị Hằng, "Xây dựng quy trình cảnh báo lũ quét bằng phương pháp ngưỡng mưa cảnh báo lũ quét FFG và đường tới hạn CL, thí điểm cho thượng nguồn sông Cả," *Tạp chí Khí tượng Thủy văn,* vol. 694, pp. 16-27, 2018. Địa chỉ: tapchikttv.vn/data/article/62/HoangAnhHuy.pdf.

[68] Clements, Bruce W. and Casani, Julie Ann P., "Floods," in *Disasters and Public Health*, Elsevier, 2016, p. 267–289. Địa chỉ: https://pdf.sciencedirectassets.com/314488/3-s2.0-C20140013226/3-s2.0-B9780128019801000118/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEHEaCXVzLWVhc3QtMSJHMEUCIQDIwCo2mGSsTCYk3LnxrgBv%2FUjZSJaMRrtz2rxDyZskRgIgXRNdeQz47q5VEiwxkxYAu1InO8Jw7i5dBr0ZwtQ0RXwq.

[69] Spyrou, Nafsika Ioanna, Stanota, Eirini Spyridoula, Diakakis, Michalis and et al., "Estimation of Flow Velocity During Flash Floods with the synergy of Unmanned Aerial Systems (UAS) data and Ground Observations: The Case of 2017 Mandra Flash Flood, Greece," *Copernicus GmbH,* 2020. DOI:10.5194/egusphere-egu2020-17845.

[70] Martín-Vide, J.P., Bateman, A., Berenguer, M. and et al., "Large wood debris that clogged bridges followed by a sudden release. The 2019 flash flood in Catalonia.," *Journal of Hydrology: Regional Studies,* vol. 47, no. 2214-5818, p. 101348, 2023. DOI:10.1016/j.ejrh.2023.101348.

[71] "Floodplain Development Manual," Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources, Sydney, NSW, Australia, 2005. Địa chỉ: shellharbour.nsw.gov.au/sites/default/files/Meetings/2016-10-11-10-3-3-atachment1-FloodplainDevelopmentManualApril2005.pdf.

[72] Nguyễn Văn Lực, Nguyễn Quang Hùng, Nguyễn Đăng Giáp and Lê Văn Thìn, "Báo cáo xây dựng bộ tiêu chí và chỉ tiêu xác định mức độ nguy hiểm của các ngầm tràn," Phòng thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về động lực học sông biển, Hà Nội, 2017.

[73] Darren Lumbroso and Eric Gaume, "Reducing the uncertainty in indirect estimates of extreme flash flood discharges," *Journal of Hydrology,* Vols. 414-415, pp. 16-30, 2012. DOI:10.1016/j.jhydrol.2011.08.048.

[74] Dougherty, Erin and Rasmussen, Kristen L., "Variations in Flash Flood–Producing Storm Characteristics Associated with Changes in Vertical Velocity in a Future Climate in the Mississippi River Basin," *Journal of Hydrometeorology,* vol. 22, no. 3, pp. 671-687, 2021. DOI:10.1175/jhm-d-20-0254.1.

[75] David Moran, "How Do Mountains Affect Precipitation?," DTN, [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.dtn.com/how-do-mountains-affect-precipitation/. [Truy cập 11/11/2023].

[76] ARM, "Education News on Rainfall in Mountainous Areas," [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.arm.gov/resources/outreach/lessonplans/11jannewsletter.pdf. [Truy cập 11/11/2023].

[77] USDA Natural Resources Conservation Service (NRCS), National Engineering Handbook: Part 630 - Hydrology, USDA Soil Conservation Service (SCS), 2010. Địa chỉ: https://irrigationtoolbox.com/NEH/Part630_Hydrology/NEH630-ch15draft.pdf.

[78] Li, Changzhi, Zhang, Miao, Li, Qing and He, Bingshun, "How to avoid heavy life losses in Liulin-like flash flood events," *Proceedings of IAHS,* vol. 386, p. 313÷319, 2024. DOI:10.5194/piahs-386-313-2024.

[79] Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., Sidle, R. C. and Bergerud, W. A., "Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics," *Landslides,* vol. 1, no. 1, pp. 61-66, 2004. DOI:10.1007/s10346-003-0002-0. Địa chỉ: https://doi.org/10.1007/s10346-003-0002-0.

[80] Liu, Bing, Xie, Gang, Zhang, Xiaoming, Zhao, Yang, Yin, Xiaolin and Cheng, Chen, "Vegetation root system, soil erosion and ecohydrology system: A review," in *Proceedings of the 2015 International Forum on Energy, Environment Science and Materials*, 2015. DOI:10.2991/ifeesm-15.2015.52.

[81] Thomas L Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures," *Journal of Mathematical Psychology,* vol. 15, no. 3, pp. 234-281, 1977. DOI:10.1016/0022-2496(77)90033-5.

[82] Mohammed Sadek and Xuxiang Li, "Low-Cost Solution for Assessment of Urban Flash Flood Impacts Using Sentinel-2 Satellite Images and Fuzzy Analytic Hierarchy Process: A Case Study of Ras Ghareb City, Egypt," *Advances in Civil Engineering,* vol. 2019, pp. 1-15, 2019. DOI:10.1155/2019/2561215.

[83] S. Talha, M. Maanan, H. Atika and H. Rhinane, "Prediction of flash flood susceptibility using Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) algorithms and gis: A study case of Guelmim region in southwestern of Morocco," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* Vols. XLII-4/W19, pp. 407-414, 2019. DOI:10.5194/isprs-archives-xlii-4-w19-407-2019.

[84] Nguyễn Trọng Yêm and nnk, "Phần 2: Nghiên cứu đánh giá trượt lở, lũ quét, 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, Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội, 2006.

[85] Nguyễn Ngọc Thạch and nnk, "Tăng cường năng lực nghiên cứu, đào tạo về viễn thám và Hệ thông tin địa lý trong việc nghiên cứu, quản lý tai biến lũ lụt, lũ quét và trượt lở đất, nghiên cứu điển hình tại Vĩnh Phúc và Bắc Kạn," Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, Hà Nội, 2005.

[86] Chen Cao, Peihua Xu, Yihong Wang and et al., "Flash Flood Hazard Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio and Statistical Index Methods in

Coalmine Subsidence Areas," *Sustainability,* vol. 8, no. 9, p. 948, 2016. DOI:10.3390/su8090948.

[87] Romulus Costache and Liliana Zaharia, "Flash-flood potential assessment and mapping by integrating the weights-of-evidence and frequency ratio statistical methods in GIS environment - case study: Basca Chiojdului River catchment (Romania)," *Journal of Earth System Science,* vol. 126, no. 4, pp. 1-19, 2017. DOI:10.1007/s12040-017-0828-9.

[88] A Saleh, N Sabtu and M R Bunmi, "Flash Flood Susceptibility Mapping in Sungai Pinang catchment using Weight of Evidence," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* vol. 1091, no. 1, p. 012017, 2022. DOI:10.1088/1755-1315/1091/1/012017.

[89] Sherif Ahmed Abu El-Magd and Ali Maged and Hassan I. Farhat, "Hybrid-based Bayesian algorithm and hydrologic indices for flash flood vulnerability assessment in coastal regions: machine learning, risk prediction, and environmental impact," *Environmental Science and Pollution Research,* vol. 29, no. 38, pp. 57345-57356, 2022. DOI:10.1007/s11356-022-19903-7.

[90] Zheng Guan, Xiaoxiang Zhang, Yongqiang Yin and et al., "Estimating Flash Flood Susceptibility with Tree-Based Ensemble Machine Learning Approaches," *SSRN Electronic Journal,* 2022. DOI:10.2139/ssrn.4292607.

[91] Manish Singh Rana and Chandan Mahanta, "Spatial prediction of flash flood susceptible areas using novel ensemble of bivariate statistics and machine learning techniques for ungauged region," *Natural Hazards,* vol. 115, no. 1, pp. 947-969, 2022. DOI:10.1007/s11069-022-05580-9.

[92] Shahin Khosh Bin Ghomash, Daniel Bachmann, Daniel Caviedes-Voulli`eme and Christoph Hinz, "Impact of Rainfall Movement on Flash Flood Response: A Synthetic Study of a Semi-Arid Mountainous Catchment," *Water,* vol. 14, no. 12, p. 1844, 2022. DOI:10.3390/w14121844.

[93] Lorenzo Alfieri, Marc Berenguer, Valentin Knechtl and et al., "Flash Flood Forecasting Based on Rainfall Thresholds," in *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*, Berlin, Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 1-38.DOI:10.1007/978-3-642-40457-3_49-1.

[94] L. Alfieri, D. Velasco and J. Thielen, "Flash flood detection through a multi-stage probabilistic warning system for heavy precipitation events," *Advances in Geosciences,* vol. 29, pp. 69-75, 2011. DOI:10.5194/adgeo-29-69-2011.

[95] L. Alfieri, F. Pappenberger and F. Wetterhall, "The extreme runoff index for flood early warning in Europe," *Natural Hazards and Earth System Sciences,* vol. 14, no. 6, pp. 1505-1515, jun/2014. DOI:10.5194/nhess-14-1505-2014.

[96] Nel Caine, "The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows," *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography,* vol. 62, no. 1/2, p. 23, 1980. DOI:10.2307/520449.

[97] Fausto Guzzetti, Silvia Peruccacci, Mauro Rossi and Colin P. Stark, "The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update," *Landslides,* vol. 5, no. 1, pp. 3-17, 2007. DOI:10.1007/s10346-007-0112-1.

[98] Nejc Bezak, Mojca vSraj and Matjavz Mikovs, "Copula-based IDF curves and empirical rainfall thresholds for flash floods and rainfall-induced landslides," *Journal of Hydrology,* vol. 541, pp. 272--284, 2016. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.02.058.

[99] T. Turkington, J. Ettema, C. J. van Westen and K. Breinl, "Empirical atmospheric thresholds for debris flows and flash floods in the southern French Alps," *Natural Hazards and Earth System Sciences,* vol. 14, no. 6, pp. 1517-1530, 2014. DOI:10.5194/nhess-14-1517-2014.

[100] Geraldo Moura Ramos Filho, Victor Hugo Rabelo Coelho, Emerson da Silva Freitas and et al., "An improved rainfall-threshold approach for robust prediction and warning of flood and flash flood hazards," *Natural Hazards,* vol. 105, no. 3, pp. 2409-2429, 2020. DOI:10.1007/s11069-020-04405-x.

[101] Xiaoyan Zhai, Liang Guo, Ronghua Liu and Yongyong Zhang, "Rainfall threshold determination for flash flood warning in mountainous catchments with consideration of antecedent soil moisture and rainfall pattern," *Natural Hazards,* vol. 94, no. 2, pp. 605-625, 2018. DOI:10.1007/s11069-018-3404-y.

[102] Wenlin Yuan, Xinyu Tu, Chengguo Su and et al., "Research on the Critical Rainfall of Flash Floods in Small Watersheds Based on the Design of Characteristic Rainfall Patterns," *Water Resources Management,* vol. 35, no. 10, pp. 3297-3319, 2021. DOI:10.1007/s11269-021-02893-5.

[103] Hà Thanh Giang, "Hệ thống đo mưa và cảnh báo lũ quét," *Automation today,* pp. 54-55, 2005.

[104] Đỗ Hoài Nam, "Nhận diện và đề xuất giải pháp cảnh báo lũ quét dựa trên chỉ số mưa tích lũy ở thượng lưu thời đoạn ngắn cho lưu vực sông Cả," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi,* vol. 40, pp. 28-33, 2017. Địa chỉ: https://vawr.org.vn/images/file/4_%20Do%20Hoai%20Nam.pdf.

[105] Mohamed Saber and Koray Yilmaz, "Evaluation and Bias Correction of Satellite-Based Rainfall Estimates for Modelling Flash Floods over the Mediterranean region: Application to Karpuz River Basin, Turkey," *Water,* vol. 10, no. 5, p. 657, 2018. DOI:10.3390/w10050657.

[106] I. K. Westerberg, J.-L. Guerrero, P. M. Younger and et al., "Calibration of hydrological models using flow-duration curves," *Hydrology and Earth System Sciences,* vol. 15, no. 7, pp. 2205-2227, 2011. DOI:10.5194/hess-15-2205-2011.

[107] F. Silvestro, N. Rebora, G. Cummings and L. Ferraris, "Experiences of dealing with flash floods using an ensemble hydrological nowcasting chain: implications of communication, accessibility and distribution of the results," *Journal of Flood Risk Management,* vol. 10, no. 4, pp. 446-462, 2015. DOI:10.1111/jfr3.12161.

[108] Lã Thanh Hà, "Phân tích nguyên nhân và mô phỏng diễn biến trận lũ quét lịch sử ngày 27/9/2005 tại lưu vực suối Phà, xã Cát Thịnh Cát huyện Văn Chấn tỉnh Yên Bái," in *Hội thảo khoa học lần thứ 10 - Viện KHKTTV&MT*, Hà Nội, 2007. Địa chỉ: http://tapchikttv.vn/data/article/1226/thang%205%202007_04.pdf.

[109] Nguyễn Thế Toàn, "Nghiên cứu phương pháp cảnh báo lũ quét cho lưu vực nhỏ miền núi và áp dụng thử nghiệm cho 2 lưu vực Nậm Ly và Nà Nhùng tỉnh Hà Giang," Trường Đại học Thủy lợi, Hà Nội, 2023. Địa chỉ: https://www.tlu.edu.vn/tin-tuc/nghien-cuu-phuong-phap-canh-bao-lu-quet-20761.

[110] Tran Kim Chau, Nguyen The Toan, Do Anh Duc and Nguyen Ha Linh, "Developing the regression equations to determine the bankfull discharge from the basin characteristics," *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics,* vol. 68, no. 2, pp. 103-117, 2021. DOI:10.2478/heem-2021-0006. Địa chỉ: https://doi.org/10.2478/heem-2021-0006.

[111] Tran Kim Chau, Nguyen Tien Thanh and Nguyen The Toan, "Primarily results of a real-time flash flood warning system in Vietnam," *Civil Engineering*

Journal, vol. 7, no. 4, pp. 747-762, 2021. DOI:10.28991/cej-2021-03091687. Địa chỉ: https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091687.

[112] Seann Reed, John Schaake and Ziya Zhang, "A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations," *Journal of Hydrology,* vol. 337, no. 3-4, pp. 402-420, 2007. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.02.015.

[113] Jonathan D Phillips, "Geomorphic impacts of flash flooding in a forested headwater basin," *Journal of Hydrology,* vol. 269, pp. 236-250, 2002. DOI:10.1016/s0022-1694(02)00280-9.

[114] Church, M. and Jakob, M., "What is a debris flood?," *Water Resources Research,* vol. 56, no. 8, p. e2020WR027144, 2020. DOI:10.1029/2020WR027144. Địa chỉ: https://doi.org/10.1029/2020WR027144.

[115] Gregory E. Smith, "Development of a flash flood potential index using physiographic data sets within a geographic information system," Department of Geography - The University of Utah, 2010. Địa chỉ: https://collections.lib.utah.edu/details?id=192329&page=7&facet_setname_s=%22ir_etd%22&facet_format_t=%22application%2Fpdf%22&sort=facet_identifier_t+asc.

[116] Gregory E. Smith, "NOAA," [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.cbrfc.noaa.gov/present/prague/10_nws_prague_flashflood.pdf. [Truy cập 25/12/2021].

[117] Gregory E. Smith, "NWS," [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.weather.gov/media/owp/oh/rfcdev/docs/cbrfc_ffg2.pdf. [Truy cập 25/12/2021].

[118] Kiều Văn Hoan, Nguyễn Hà Trang, Nguyễn Phương Thuý and Nguyễn Hữu Thanh, "Ứng dụng công nghệ GIS và viễn thám xây dựng bản đồ tiềm năng lũ quét tỉnh Sơn La," *Tạp chí Khoa học Tự nhiên - Trường đại học Sư phạm Hà Nội - HNUE,* vol. 64, no. 8, pp. 120-132, 2019. Địa chỉ: https://vjol.info.vn/index.php/DHSPHN/article/view/47265/38291.

[119] Quách Thị Chúc and Bùi Thị Thuý Đào, "Nghiên cứu phân vùng nguy cơ lũ quét khu vực huyện Quang Bình,, tỉnh Hà Giang bằng dữ liệu viễn thám và GIS trên cơ sở chỉ số FFPI," *Tạp chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường,* no. Số 38, pp.

17-29, 2021. Địa chỉ: https://tapchi.hunre.edu.vn/index.php/tapchikhtnmt/article/view/359/368.

[120] Le Xuan Cau, "Development of Map of Gridded Basin Flash Flood Potential Index: GBFFPI Map of QuangNam, QuangNgai, DaNang, Hue Provinces," *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering,* vol. 10, no. 1, pp. 66-73, 2016. Địa chỉ: waset.org/Publication/10003411.

[121] Sathit Chantip, Nat Marjang and Kobkiat Pongput, "Development of Dynamic Flash Flood Hazard Index (DFFHI) in Wang River Basin, Thailand," International Association for Hydro-Environment Engineering and Research, 2020. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.iahr.org/library/infor?pid=7663. [Truy cập 25/12/2021].

[122] Lã Thanh Hà, "Phương pháp cảnh báo lũ quét thời gian thực cho miền Trung," Người đô thị, 14/01/2021. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://nguoidothi.net.vn/phuong-phap-canh-bao-lu-quet-thoi-gian-thuc-cho-mien-trung-27133.html. [Truy cập 25/12/2021].

[123] Nam, Dong-Ho, Lee, Suk-Ho and Kim, Byung-Sik, "Development of Nomogram for Debris Flow Forecasting Based on Critical Accumulated Rainfall in South Korea," *Water,* vol. 11, no. 10, p. 2181, 2019. DOI:10.3390/w11102181.

[124] Eric Gaume, Valerie Bain, Pietro Bernardara, Olivier Newinger, Mihai Barbuc, Allen Bateman, Lotta Blaškovicˇová, Günter Blöschl, Marco Borga, Alexandru Dumitrescu, Ioannis Daliakopoulos, Joachim Garcia, Anisoara Irimescu, Silvia Kohnova, Aristeidis Koutroulis, Lorenzo Marchi, Simona Matreata, Vicente Medina, Emanuele Preciso, Daniel Sempere-Torres, Gheorghe Stancalie, Jan Szolgay, Ioannis Tsanis, David Velasco and Alberto Viglione, "A compilation of data on European flash floods," *Journal of Hydrology,* vol. 367, pp. 70-78, 2009. DOI:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028.

[125] I. Braud, P.-A. Ayral, C. Bouvier, F. Branger, G. Delrieu, J. Le Coz, G. Nord, J.-P. Vandervaere, S. Anquetin, M. Adamovic, J. Andrieu, C. Batiot, B. Boudevillain, P. Brunet, J. Carreau, A. Confoland, J.-F. Didon-Lescot, J.-M. Domergue, J. Douvinet, G. Dramais, R. Freydier, S. Gérard, J. Huza, E. Leblois, O. Le Bourgeois, R. Le Boursicaud, P. Marchand, P. Martin, L. Nottale, N. Patris, B. Renard, J.-L. Seidel, J.-D. Taupin, O. Vannier, B. Vincendon and A. Wijbrans, "Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash flood

understanding," *Hydrology and Earth System Sciences,* vol. 18, pp. 3733-3761, 2014. DOI:10.5194/hess-18-3733-2014.

[126] WMO, "Flash flood guidance (FFG)," [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://etrp.wmo.int/mod/resource/view.php?id=14342. [Truy cập 25/12/2021].

[127] Trần Tuyết Mai, Đoàn Văn Hải and Trịnh Thu Phương, "Nghiên cứu ứng dụng công cụ khai thác sản phẩm của hệ thống định hướng cảnh báo lũ quét của Uỷ hội sông Mê Công quốc tế (MRCFFGS) phục vụ xác định vùng nguy cơ lũ quét," *Tạp chí khí tượng thuỷ văn,* vol. 720, no. 12, pp. 10-22, 2020. DOI:10.36335/VNJHM.2020(720).10-22.

[128] Ban CĐQG về PCTT and UBQG ứng phó thiên tai và TKCN, "Tài liệu hội nghị toàn quốc về công tác phòng, chống thiên tai và tìm kiếm cứu nạn năm 2024," Văn phòng thường trực Ban chỉ đạo QG về PCTT, Hà Nội, 2024. Địa chỉ: https://docs.google.com/document/d/1oC4v8ipXknyFPO0lKIeXALPcNxhbKrI9/edit?tab=t.0.

[129] Trần Viết Khanh, "Báo cáo tổng hợp xây dựng các giải pháp phòng tránh giảm nhẹ thiên tai từ xói lở, lũ quét trên địa bàn tỉnh Thái Nguyên," Đại học Thái Nguyên, Thái Nguyên, 2021.

[130] Nguyễn Viết Nghĩa, "Nghiên cứu xây dựng bản đồ phân vùng và cảnh báo lũ quét độ phân giải cao cho một số tỉnh vùng Tây Bắc nhằm tăng cường khả năng ứng phó với thiên tai của cộng đồng phục vụ xây dựng nông thôn mới," Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, 2020.

[131] Trịnh Thu Phương, "Nghiên cứu cơ sở khoa học và thực tiễn cảnh báo, dự báo đa thiên tai do mưa kích hoạt. Áp dụng thử nghiệm tại lưu vực điển hình," Trung tâm dự báo Khí tượng Thủy văn quốc gia, Hà Nội, 2021.

[132] Thị Phương Thảo, Ngô, Hùng Long, Ngô, Anh Tuấn, Trần and Minh Hằng, Lê, "Sử dụng ảnh Sentinel-1A đa thời gian để phát hiện lũ quét, thử nghiệm tại tỉnh Lào Cai," *Journal of Hydro-meteorology,* vol. 8, no. 764, pp. 29-37, 2024. DOI:10.36335/vnjhm.2024(764).29-37.

[133] Lê Văn Thìn, "Nghiên cứu xây dựng công cụ đánh giá nhanh nguy cơ lũ quét khu vực miền núi phía Bắc (áp dụng cho huyện Nậm Pồ, tỉnh Điện Biên)," Phòng thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về động lực học sông biển, Hà Nội, 2023.

[134] Vũ Bá Thao and Bùi Xuân Việt, "Phân tích ngưỡng mưa phát sinh một số trận lũ quét, lũ bùn đá thuộc các tỉnh Lai Châu, Điện Biên, Yên Bái, Sơn La," *Tạp*

chí Khí tượng thủy văn, vol. 749, pp. 96-110, 2023. DOI:10.36335/VNJHM.2023(749).96-110.

[135] Minh Đức, Đào, Cao Minh, Vũ, Hải Yến, Hoàng, Quang Anh, Phạm and Kinh Bắc, Đặng, "Đánh giá nguy cơ hình thành lũ quét trên suối Nghĩa Đô, huyện Bảo Yên, tỉnh Lào Cai bằng phương pháp phân tích thống kê," *Vietnam Journal of Hydrometeorology,* vol. EME4, no. 1, pp. 341-354, 2022. DOI:10.36335/vnjhm.2022(eme4).341-354.

[136] Hawkins, Richard H., "A comparison of predicted and observed runoff curve numbers," in *Symposium Proceedings, Water Today and Tomorrow*, Arizona, 1984.

[137] Bosznay, Miklós, "Generalization of SCS Curve Number Method," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* vol. 115, no. 1, p. 139–144, 1989. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(1989)115:1(139).

[138] Joshep Alphonse Van Mullemr Jr., "Application of the green-ampt infiltration model to watersheds in Montana and Wyoming," Montata State University, Bozeman, Montana, 1989. Địa chỉ: https://scholarworks.montana.edu/server/api/core/bitstreams/5c8f43e1-0a45-4009-b07d-5c902345a827/content.

[139] Esri, "Sentinel-2 10-Meter Land Use/Land Cover," Esri, [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://livingatlas.arcgis.com/landcover/. [Truy cập 15/4/2024].

[140] JAXA, "JAXA High-Resolution Land-Use and Land-Cover Map," JAXA, [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/lulc/lulc_vnm_v2309_e.htm. [Truy cập 15/4/2024].

[141] Ven Techow, David R.Maidment and Larry W.Mays, Thủy văn ứng dụng (Bản dịch của Đỗ Hữu Thành), Hà Nội: Nhà xuất bản giáo dục, 1994.

[142] V. M. Ponce and R. H. Hawkins, "Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity?," *Journal of Hydrologic Engineering,* vol. 1, no. 1, pp. 11-19, jan/1996. DOI:10.1061/(asce)1084-0699(1996)1:1(11).

[143] Earth Data, "Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling," Food and Agriculture Organization,

11/05/2020. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1566.

[144] Richard H. McCuen, A Guide to Hydrologic Analysis Using SCS Methods, New Jersey: Prentice-Hall, 1982.

[145] Eckhardt, K., "A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods," *Journal of Hydrology,* vol. 352, no. 1-2, pp. 168-173, 2008. DOI:10.1016/j.jhydrol.2008.01.005.

[146] Xie, Jiaxin, Liu, Xiaomang, Wang, Kaiwen, Yang, Tiantian, Liang, Kang and Liu, Changming, "Evaluation of typical methods for baseflow separation in the contiguous United States," *Journal of Hydrology,* vol. 583, p. 124628, 2020. DOI:10.1016/j.jhydrol.2020.124628.

[147] Sina Khatami and Bahram Khazaei, "Benefits of GIS Application in Hydrological Modeling: A Brief Summary," *Vatten: tidskrift för vattenvård /Journal of Water Management and research,* vol. 70, no. 1, p. 41÷49, 2014. Địa chỉ: https://lucris.lub.lu.se/ws/files/3855151/4359705.pdf.

[148] Benson, M. A., "Factors influencing the occurrence of floods in a humid region of diverse terrain," U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1580-B, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1962.DOI:10.3133/wsp1580B. Địa chỉ: https://pubs.usgs.gov/wsp/1580b/report.pdf.

[149] Knighton, A. D., "Downstream variation in stream power," *Geomorphology,* vol. 29, no. 3-4, pp. 293-306, 1999. DOI:10.1016/S0169-555X(99)00015-X. Địa chỉ: https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00015-X.

[150] Parker, C., Thorne, C. R. and Clifford, N. J., "Development of ST:REAM: a reach-based stream power balance approach for predicting alluvial river channel adjustment," *Earth Surface Processes and Landforms,* vol. 40, no. 3, pp. 403-413, 2015. DOI:10.1002/esp.3641. Địa chỉ: https://doi.org/10.1002/esp.3641.

[151] Reinfelds, I., Cohen, T., Batten, P. and Brierley, G., "Assessment of downstream trends in channel gradient, total and specific stream power: a GIS approach," *Geomorphology,* vol. 60, no. 3-4, pp. 403-416, 2004. DOI:10.1016/j.geomorph.2003.10.003. Địa chỉ: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.10.003.

[152] Nitesh Godara and Oddbjørn Bruland, "CHOOSING AN APPROPRIATE HYDROLOGIC MODEL," [Trực tuyến]. Địa chỉ:

https://www.iitr.ac.in/rwc2020/pdf/papers/RWC_77_Godara_N.pdf. [Truy cập 18/03/2024].

[153] Brirhet, Hassan and Benaabidate, Lahcen, "Comparison Of Two Hydrological Models (Lumped And Distributed) Over A Pilot Area Of The Issen Watershed In The Souss Basin, Morocco," *European Scientific Journal, ESJ,* vol. 12, no. 18, p. 347, 2016. DOI:10.19044/esj.2016.v12n18p347.

[154] Nguyễn Hữu Khải and Nguyễn Thanh Sơn, Mô hình toán thủy văn, Hà Nội: NXB Đại học Quốc gia Hà Nội, 2003. Địa chỉ: https://nguyenduyliemgis.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/09/mo-hinh-toan-thuy-van-2003.pdf.

[155] Williams, Garnett P., "Paleohydrological Methods and some examples from swedish fluvial environments: I Cobble and boulder deposits," *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography,* vol. 65, no. 3-4, pp. 227-243, 1983. DOI:10.1080/04353676.1983.11880088.

[156] Vũ Bá Thao, Nguyễn Thị Thu Hương and Nguyễn Văn Hải, "Đánh giá đặc trưng hình thái lưu vực suối đến sự hình thành lũ bùn đá khu vực miền núi phía Bắc," *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi,* vol. 70, no. 1-16, 2022. Địa chỉ: https://vawr.org.vn/Upload/BaibaoKH/vu-ba-thao-70-2022.pdf.

[157] Bae, Deg-Hyo, Lee, Moon-Hwan and Moon, Sung-Keun, "Development of a precipitation–area curve for warning criteria of short-duration flash flood," *Natural Hazards and Earth System Sciences,* vol. 18, no. 1, pp. 171-183, 2018. DOI:10.5194/nhess-18-171-2018.

[158] T. GOMI, R. C. SIDLE and J. S. RICHARDSON, "Understanding Processes and Downstream Linkages of Headwater Systems," *BioScience,* vol. 52, no. 10, p. 905, 2002. DOI:10.1641/0006-3568(2002)052[0905:upadlo]2.0.co;2.

[159] Allen, George H., Pavelsky, Tamlin M., Barefoot, Eric A. and et al., "Similarity of stream width distributions across headwater systems," *Nature Communications,* vol. 9, no. 1, 2018. DOI:10.1038/s41467-018-02991-w.

[160] Lawrence, Dingman, S., "Analytical derivation of at-a-station hydraulic–geometry relations," *Journal of Hydrology,* vol. 334, no. 1-2, pp. 17-27, 2007. DOI:10.1016/j.jhydrol.2006.09.021.

[161] Katopodes, Nikolaos D., "Long Waves," in *Free-Surface Flow*, Delphi, Elsevier, 2019, p. 306.DOI:10.1016/b978-0-12-815487-8.00006-8.

[162] Huang, H.Q. and Nanson, Gerald C., "Vegetation and channel variation; a case study of four small streams in southeastern Australia," *Geomorphology,* vol. 18, no. 3-4, p. 237–249, 1997. DOI:10.1016/s0169-555x(96)00028-1.

[163] Wohl, Ellen E. and Wilcox, Andrew, "Channel geometry of mountain streams in New Zealand," *Journal of Hydrology,* vol. 300, no. 1-4, p. 252–266, 2005. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.06.006.

[164] Wohl, Ellen and Merritt, David M., "Reach-scale channel geometry of mountain streams," *Geomorphology,* vol. 93, no. 3-4, p. 168–185, 2008. DOI:10.1016/j.geomorph.2007.02.014.

[165] Williams, Garnett P., "Bank-full discharge of rivers," *Water Resources Research,* vol. 14, no. 6, p. 1141–1154, 1978. DOI:10.1029/WR014i006p01141.

[166] Trần Mạnh Trường, "Báo cáo tổng hợp: Nghiên cứu các giải pháp ứng phó với một số thiên tai chính gây mất ổn định tự nhiên khu vực hồ Ba Bể phục vụ phát triển kinh tế xã hội của địa phương," Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, Hà Nội, 2023.

[167] Robert L. Tortorelli and DeRoy L. Bergman, "Techniques for estimating flood peak discharges for unregulated streams and streams regulated by small flood water retarding structures in Oklahoma," Water-Resources Investigations Report 84-4358, Oklahoma, 1985.DOI:10.3133/wri844358.

[168] H. C. Riggs and Reston Va., "A simplified slope-area method for estimating flood discharges in natural channels," *Journal Research U.S. Geology Survey,* vol. 4, no. 3, pp. 285-291, 1976. Địa chỉ: pubs.usgs.gov/journal/1976/vol4issue3/report.pdf.

[169] NIXON, M, "A STUDY OF THE BANK-FULL DISCHARGES OF RIVERS IN ENGLAND AND WALES.," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers,* vol. 12, no. 2, p. 157–174, 1959. DOI:10.1680/iicep.1959.12123.

[170] Viện Khoa học Thủy văn và Biến đổi khí hậu, "Điều tra, khảo sát, xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ lũ quét khu vực miền trung, tây nguyên và xây dựng hệ thống thí điểm phục vụ cảnh báo cho các địa phương có nguy cơ cao xảy ra lũ

quét phục vụ công tác quy hoạch, chỉ đạo điều hành phòng tránh thiên ta," Viện Khoa học Thủy văn và Biến đổi khí hậu, Hà Nội, 2018.

[171] Quốc Hồng, "Lào Cai thiệt hại hơn 4 tỷ đồng do mưa lớn," Báo Nhân dân điện tử, [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://nhandan.vn/lao-cai-thiet-hai-hon-4-ty-dong-do-mua-lon-post690483.html. [Truy cập 26/02/2023].

[172] An Kiên, "Lào Cai mưa lớn diện rộng, lũ quét tàn phá Bảo Yên," Báo điện tử VOV, [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://vov.vn/xa-hoi/tin-24h/lao-cai-mua-lon-dien-rong-lu-quet-tan-pha-bao-yen-post950263.vov. [Truy cập 12/04/2023].

[173] UBND tỉnh Lào Cai, "Báo cáo đánh giá tình hình thực hiện Chương trình mục tiêu quốc gia ứng phó với biến đổi khí hậu giai đoạn 2010-2015," UBND tỉnh Lào Cai, Lào Cai, 2015. Địa chỉ: http://csdl.dcc.gov.vn/upload/csdl/982948621_Lao-Cai_Bao-Cao-NTP-2010-2015.pdf.

[174] UBND huyện Quang Bình, "Xã Bản Rịa thiệt hại nặng do mưa lũ," UBND huyện Quang Bình, [Trực tuyến]. Địa chỉ: quangbinh.hagiang.gov.vn/chi-tiet-tin-tuc/-/news/44749/xã-bản-rịa-thiệt-hại-nặng-do-mưa-lũ.html. [Truy cập 06/06/2024].

[175] Báo TNMT, "Thông tin sơ bộ về tình hình mưa, lũ quét tại Lào Cai và Hà Giang," BÁO ĐIỆN TỬ TÀI NGUYÊN VÀ MÔI TRƯỜNG, [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://baotainguyenmoitruong.vn/thong-tin-so-bo-ve-tinh-hinh-mua-lu-quet-tai-lao-cai-va-ha-giang-241727.html. [Truy cập 18/12/2023].

[176] Quốc Hồng, "Lũ quét đầu mùa làm ách tắc giao thông ở Lào Cai," Báo Nhân Dân, [Trực tuyến]. Địa chỉ: nhandan.vn/lu-quet-dau-mua-lam-ach-tac-giao-thong-o-lao-cai-post357312.html. [Truy cập 06/06/2024].

[177] Hải Dương, "Lào Cai: Lũ quét và sét đánh gây nhiều thiệt hại," Tạp chí điện tử Môi trường và Cuộc sống, [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://moitruong.net.vn/lao-cai-lu-quet-va-set-danh-gay-nhieu-thiet-hai-40177.html. [Truy cập 06/06/2024].

[178] UBND tỉnh Lào Cai, "Tình hình thiệt hại do ảnh hưởng của cơn bão số 3 và hoàn lưu bão trên địa bàn tỉnh Lào Cai; công tác chỉ đạo, thực hiện việc cứu nạn, khôi phục, phục hồi sản xuất, kinh doanh," UBND tỉnh Lào Cai, Lào Cai, 2024. Địa chỉ: https://storage-vnportal.vnpt.vn/lci-ubnd-responsive/4365/2024/436BC2024.pdf.

[179] Phạm Vũ Sơn and Lê Nam, "Phổ biến rộng rãi phần mềm cảnh báo sớm thiên tai," Báo Lào Cai điện tử, 06/07/2023. [Trực tuyến]. Địa chỉ:

https://baolaocai.vn/pho-bien-rong-rai-phan-mem-canh-bao-som-thien-tai-post370415.html. [Truy cập 19/04/2024].

[180] ORNL DAAC, "Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling," 11/05/2020. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1566. [Truy cập 19/04/2023].

[181] ALOS, "High-Resolution Land-Use and Land-Cover Map of Vietnam for 2020 (Released in September 2023 / Version 23.09)," 16/02/2024. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/lulc/lulc_vnm_v2309_e.htm. [Truy cập 19/04/2024].

[182] Cayson, F. C., Patiño, C. L. and Flores, M. J. L., "RUNOFF ESTIMATION USING SCS RUNOFF CURVE NUMBER METHOD IN CEBU ISLAND," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,* Vols. XLII-4/W19, no. 2194-9034, p. 109–115, 2019. DOI:10.5194/isprs-archives-xlii-4-w19-109-2019.

[183] Im, Sangjun, Park, Seungwoo and Jang, Taeil, "Application of SCS curve number method for irrigated paddy field," *KSCE Journal of Civil Engineering,* vol. 11, no. 1, p. 51–56, 2007. DOI:10.1007/bf02823372.

[184] HEC, "Creating a Curve Number Grid and Computing Subbasin Average Curve Number Values," Hydrologic Engineering Center, 22/05/2023. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsguides/gis-tutorials-and-guides/creating-a-curve-number-grid-and-computing-subbasin-average-curve-number-values. [Truy cập 19/04/2024].

[185] NRCS, "Part 630 Hydrology," in *Chapter 9. Hydrologic Soil-Cover Complexes*, Natural Resources Conservation Service, 2004, pp. 9-3. Địa chỉ: https://irrigationtoolbox.com/NEH/Part630_Hydrology/H_210_630_09.pdf.

[186] Navideh Noori, Latif Kalin, Puneet Srivastava and Charlene Lebleu, "Effects of Initial Abstraction Ratio in SCS-CN Method on Modeling the Impacts of Urbanization on Peak Flows," in *World Environmental and Water Resources Congress 2012*, American Society of Civil Engineers, 2012. DOI:10.1061/9780784412312.03.

[187] Nam Dũng, "Lào Cai công bố tình huống khẩn cấp về thiên tai trên toàn tỉnh," Báo Thanh Tra, 9/9/2024. [Trực tuyến]. Địa chỉ: https://thanhtra.com.vn/xa-

hoi/doi-song/lao-cai-cong-bo-tinh-huong-khan-cap-ve-thien-tai-tren-toan-tinh-230926.html. [Truy cập 25/2/2025].

[188] Okhravi, Saeid, Alemi, Mahdi, Afzalimehr, Hossein, Schügerl, Radoslav and Velísková, Yvetta, "Flow resistance at lowland and mountainous rivers," *Journal of Hydrology and Hydromechanics,* vol. 71, no. 4, pp. 464-474, 2023. DOI:10.2478/johh-2023-0023.

[189] Takata, Hiroshi, Obata, Shogo, Sato, Tatsuro and Shimatani, Yukihiro, "Back-Calculation of Manning's Roughness Coefficient by 2D Flow Simulation and Influence of In-Channel Physical Parameters in a Mountain River, Japan," *Water,* vol. 16, no. 2, p. 320, 2024. DOI:10.3390/w16020320.

[190] Lecce, Scott A., "Nonlinear downstream changes in stream power on Wisconsin's Blue River," *Annals of the Association of American Geographers,* vol. 87, no. 3, pp. 471-486, 1997. DOI:10.1111/1467-8306.00064. Địa chỉ: https://doi.org/10.1111/1467-8306.00064.

PHỤ LỤC

Phụ lục I. Thuật toán xác định lưu vực tương ứng với điểm cửa ra

Code 1. Tạo lớp phủ các điểm thuộc lưu vực dựa trên vị trí

```python
import numpy as np
def watershed_by_index(x:int, y:int, flow_direction:np.ndarray):
    """
    Xác định lưu vực dựa trên lưới hướng dòng chảy và điểm đầu ra.
    Hàm này triển khai thuật toán xác định lưu vực sử dụng dữ liệu hướng dòng chảy.
    Nó hoạt động bằng cách truy vết các ô mà dòng chảy đổ vào điểm bắt đầu (x,y).
    Tham số:
    -----------
    x : int - Tọa độ X (cột) của điểm đầu ra lưu vực
    y : int - Tọa độ Y (hàng) của điểm đầu ra lưu vực
    flow_direction : numpy.ndarray - Mảng 2D chứa mã hướng dòng chảy theo mô hình D8
    Trả về:
    --------
    numpy.ndarray - Mảng Boolean trong đó giá trị True đại diện cho các ô thuộc lưu vực
    """
    # Lấy kích thước của lưới hướng dòng chảy
    rows = flow_direction.shape[0]
    cols = flow_direction.shape[1]
    # Khởi tạo mặt nạ lưu vực với các giá trị 0 (0 = không thuộc lưu vực, 1 = thuộc lưu vực)
    watershed_mask = np.zeros((rows, cols), dtype=np.uint8)
    # Khởi tạo ngăn xếp cho tìm kiếm theo chiều sâu, bắt đầu từ điểm đầu ra (x,y)
    stack = [(x, y)]
    # Mảng hướng định nghĩa 8 ô lân cận (mô hình dòng chảy D8)
    # Các mảng này đại diện cho vị trí tương đối:
    # Đông Bắc, Đông, Đông Nam, Nam, Tây Nam, Tây, Tây Bắc, Bắc
    col_dir = np.array([1, 1, 1, 0, -1, -1, -1, 0], dtype=flow_direction.dtype)
    row_dir = np.array([-1, 0, 1, 1, 1, 0, -1, -1], dtype=flow_direction.dtype)
    # Mã hướng dòng chảy tương ứng với mỗi hướng trong 8 hướng
    # Các giá trị này đại diện cho hướng TỪ đó nước chảy VÀO ô hiện tại
    # 16=Bắc, 32=Đông Bắc, 64=Đông, 128=Đông Nam, 1=Nam, 2=Tây Nam, 4=Tây, 8=Tây Bắc
    # (lũy thừa của 2)
    fdir = np.array([16, 32, 64, 128, 1, 2, 4, 8], dtype=flow_direction.dtype)
    # Vòng lặp chính - tiếp tục cho đến khi ngăn xếp trống
    while stack:
        # Lấy ô tiếp theo để xử lý
        cx, cy = stack.pop()
        # Kiểm tra nếu ô hiện tại nằm trong phạm vi lưới và chưa thuộc lưu vực
        if 0 <= cx < cols and 0 <= cy < rows and not watershed_mask[cy, cx]:
            # Đánh dấu ô này là thuộc lưu vực
            watershed_mask[cy, cx] = 1
            # Lưu vị trí hiện tại để tính toán lân cận
            cy0, cx0 = cy, cx
            # Kiểm tra tất cả 8 ô lân cận
            for i in range(8):
                # Lấy độ lệch hướng và mã hướng dòng chảy cho ô lân cận này
                c, r, f = col_dir[i], row_dir[i], fdir[i]
                # Tính toán tọa độ lân cận
                cx = cx0 + c
                cy = cy0 + r
                # Kiểm tra nếu ô lân cận nằm trong phạm vi và chưa được xử lý
                if 0 <= cx < cols and 0 <= cy < rows and not watershed_mask[cy, cx]:
                    # Lấy giá trị hướng dòng chảy của ô lân cận
                    fv = flow_direction[cy, cx]
                    # Nếu ô lân cận chảy về phía ô hiện tại,
                    # thêm nó vào ngăn xếp để xử lý
                    if fv == f:
                        stack.append((cx, cy))
    # Trả về mặt nạ lưu vực dưới dạng mảng boolean
    return watershed_mask.astype(bool)
```

Code 2. Xác định vị trí (index) của điểm trên bản đồ từ tọa độ

```python
def xy_to_rowcol(x:float, y:float, profile:dict):
    """
    Chuyển đổi tọa độ x, y trong thế giới thực sang chỉ số hàng, cột trong ảnh raster.
    Tham số:
    -----------
    x : float
        Tọa độ X trong hệ tọa độ không gian của ảnh raster
    y : float
        Tọa độ Y trong hệ tọa độ không gian của ảnh raster
    profile : dict
        Thông tin profile của rasterio chứa transform và các metadata khác
    Trả về:
    --------
    tuple
        Chỉ số (hàng, cột) tương ứng với tọa độ đầu vào
    Ghi chú:
    ------
    Hàm này sử dụng phép biến đổi affine từ profile rasterio để chuyển đổi
    tọa độ thế giới thực thành chỉ số pixel. Giá trị hàng và cột được trả về
    dưới dạng số nguyên đại diện cho vị trí pixel trong ảnh raster.
    Nếu tọa độ nằm ngoài phạm vi ảnh raster, hàm vẫn sẽ trả về chỉ số,
    nhưng chúng có thể là số âm hoặc vượt quá kích thước ảnh raster.
    """
    # Trích xuất phép biến đổi transform từ profile
    transform = profile['transform']
    # Sử dụng transform để chuyển đổi tọa độ sang chỉ số pixel
    # ~transform là phép biến đổi nghịch đảo
    col, row = ~transform * (x, y)
    # Trả về dưới dạng số nguyên
    return int(row), int(col)
```

Code 3. Xác định lưu vực từ tọa độ

```python
import numpy as np
def watershed_by_coords(x:float, y:float, flow_direction_file:str, output_watershed:str):
    """
    Xác định lưu vực dựa trên tọa độ trong thế giới thực.
    Tham số:
    -----------
    x : float - Tọa độ X trong hệ tọa độ không gian của ảnh raster
    y : float - Tọa độ Y trong hệ tọa độ không gian của ảnh raster
    flow_direction_file : str - Đường dẫn đến tệp hướng dòng chảy
    output_watershed : str - Đường dẫn để lưu kết quả lưu vực
    Trả về:
    --------
    numpy.ndarray - Các điểm thuộc lưu vực
    """
    # Mở tệp hướng dòng chảy và đọc dữ liệu
    with rasterio.open(flow_direction_file, 'r') as f:
        flow_direction = f.read(1)
        profile = f.profile
    # Chuyển đổi tọa độ thế giới thực sang chỉ số hàng, cột
    row, col = xy_to_rowcol(x=x, y=y, profile=profile)
    # Tính toán lưu vực sử dụng chỉ số pixel
    watershed_mask = watershed_by_index(x=col, y=row, flow_direction=flow_direction)
    # Lưu kết quả lưu vực vào tệp đầu ra
    with rasterio.open(output_watershed, 'w', **profile) as f:
        f.write(watershed_mask, 1)
    # Trả về các điểm thuộc lưu vực
    return watershed_mask
```

Phụ lục II. Dữ liệu lưu lượng lớn nhất qua các năm tại trạm thủy văn Vĩnh Yên

Năm	Giá trị	Đơn vị	Thời điểm
1960	116	m³/s	14/ IX
1961	318	m³/s	3/VI
1962	199	m³/s	10/VII
1963	150	m³/s	16/VII
1964	212	m³/s	21/ X
1965	122	m³/s	9/VI
1966	191	m³/s	30/VIII
1967	155	m³/s	19/VIII
1968	174	m³/s	11/VIII
1969	222	m³/s	17/VII
1970	173	m³/s	11/ IX
1971	197	m³/s	17/VIII
1972	310	m³/s	24/ IX
1973	277	m³/s	10/ IX
1974	128	m³/s	8/VIII
1975	216	m³/s	14/ X
1976	245	m³/s	28/VII
1977	152	m³/s	7/ X
1978	227	m³/s	4/ X
1979	286	m³/s	6/VI
1980	174	m³/s	24/VII
1981	108	m³/s	29/VII
1982	118	m³/s	21/VIII
1983	131	m³/s	15/VII
1984	270	m³/s	25/V
1985	113	m³/s	14/VII
1986	167	m³/s	24/VII
1987	82,3	m³/s	4/VII
1988	50,6	m³/s	15/VIII
1989	99	m³/s	11/VII
1990	159	m³/s	30/V
1991	153	m³/s	12/VIII

Năm	Giá trị	Đơn vị	Thời điểm
1992	207	m³/s	24/VII
1993	81,4	m³/s	15/ IX
1994	133	m³/s	14/VII
1995	230	m³/s	4/VII
1996	205	m³/s	20/VIII
1997	374	m³/s	13/VII
1998	93,6	m³/s	9/VIII
1999	139	m³/s	16/VIII
2000	240	m³/s	16/VIII
2001	169	m³/s	21/VI
2002	172	m³/s	24/V
2003	176	m³/s	9/VIII
2004	178	m³/s	7/VIII
2005	148	m³/s	17/VI
2006	174	m³/s	18/VII
2007	172	m³/s	6/VII
2008	299	m³/s	9/VIII
2009	209	m³/s	30/VIII
2010	415	m³/s	6/ IX
2011	287	m³/s	11/VII
2012	224	m³/s	24/VII
2013	227	m³/s	20/VII
2014	227	m³/s	29/ IX
2015	113	m³/s	26/ IX
2016	162	m³/s	10/VI
2017	273	m³/s	2/ X
2018	721	m³/s	22/ X
2019	221	m³/s	27/VIII
2020	269	m³/s	14/VI
2021	217	m³/s	17/IV
2022	128	m³/s	2/ X
2023	125	m³/s	23/ IX

Phụ lục III. Danh sách các điểm lũ quét giai đoạn 2010÷2023

Hệ tọa độ: EPSG:32648 - WGS 84 / UTM zone 48N

ID	Tên vị trí	x	y	Thời gian xảy ra lũ quét	Diện tích lưu vực (km²)	Độ dốc lưu vực (%)	Chiều dài dòng chảy (m)	Tỉnh	Huyện	Xã
0	Seo Lử Thận	437,116	2,508,253	27/04/2010	2.72	64.41	3,659.48	Pà Vầy Sủ	Xín Mần	Hà Giang
1	Thôn Cửa Cải	375,556	2,493,856	2/8/2010	20.00	49.96	7,759.55	Mường Vi	Bát Xát	Lào Cai
2	Thôn Pù Mắt	584,866	2,472,285	31/07/2010	11.27	42.26	7,482.64	Chu Hương	Ba Bể	Bắc Kạn
3	Tân Phượng	461,177	2,462,235	22/07/2010	7.01	43.42	4,223.45	Tân Phượng	Lục Yên	Yên Bái
4	Dương Quỳ	412,184	2,439,645	5/5/2011	24.08	48.38	12,852.49	Dương Quỳ	Văn Bàn	Lào Cai
5	Cam Đường	399,400	2,477,927	12/5/2011	91.19	46.80	20,912.41	Cam Đường	Lào Cai	Lào Cai
6	Sua Lông	415,214	2,395,691	23/06/2011	60.08	33.48	17,435.42	Nậm Khắt	Mù Căng Chải	Yên Bái
7	Làng Vạch	399,408	2,477,919	8/9/2011	91.19	46.80	20,912.41	Cam Đường	Lào Cai	Lào Cai
8	Lũng Mười	593,500	2,501,007	23/05/2012	13.08	52.49	6,325.58	Quang Thành	Nguyên Bình	Cao Bằng
9	Thôn Nà Phia	533,025	2,515,514	22/06/2012	42.03	52.00	15,375.87	Yên Phú	Bắc Mê	Hà Giang
10	Yên Cường	538,185	2,513,771	22/06/2012	78.45	43.44	18,679.62	Yên Cường	Bắc Mê	Hà Giang
11	Mường Bú	396,095	2,368,791	25/07/2012	55.78	36.57	19,706.01	Mường Bú	Mường La	Sơn La
12	Nà Cang 2	282,798	2,424,542	30/07/2012	103.81	36.91	25,032.55	Chà Nưa	Nậm Pồ	Điện Biên
13	Nậm Nhù	435,944	2,481,045	31/08/2012	9.66	51.73	4,636.17	Nậm Lúc	Bắc Hà	Lào Cai
14	Thôn Trang	493,243	2,506,004	9/7/2013	58.43	38.60	17,259.84	Việt Lâm	Vị Xuyên	Hà Giang
15	Thôn Can Hồ A	376,100	2,479,174	4/9/2013	17.12	52.57	6,492.27	Bản Khoang	Sa Pa	Lào Cai
16	Cầu Nậm Pon	310,483	2,465,290	5/6/2014	7.71	55.54	8,742.64	Sà Dề Phìn	Sìn Hồ	Lai Châu
17	Tiên Nguyên	467,522	2,489,069	21/07/2014	19.83	45.49	6,214.11	Tiên Nguyên	Quang Bình	Hà Giang
18	Bản Thác Tình	357,028	2,471,597	12/8/2014	5.76	59.60	4,578.31	Tam Đường	Tam Đường	Lai Châu
19	Suối Nậm Pá	395,972	2,461,969	24/06/2015	5.77	40.34	6,165.29	Thanh Phú	Sa Pa	Lào Cai
20	Tông Lệnh	371,924	2,369,504	24/06/2015	44.57	43.79	14,838.00	Tòng Lệnh	Thuận Châu	Sơn La
21	Chiềng Pấc	372,286	2,367,074	20/08/2015	32.02	44.30	11,589.11	Chiềng Pấc	Thuận Châu	Sơn La
22	Khối Tân Tiến	337,035	2,388,525	1/8/2015	167.00	42.75	38,836.36	Tuần Giáo	Tuần Giáo	Điện Biên
23	Minh Tiến	500,745	2,533,636	7/9/2015	8.12	47.94	6,222.27	Thuận Hòa	Vị Xuyên	Hà Giang
24	Cốc San	391,540	2,481,973	5/8/2016	112.86	43.29	22,531.89	Cốc San	Bát Xát	Lào Cai
25	Mà Sà Phìn	414,375	2,426,234	19/08/2016	17.00	50.59	8,152.94	Nậm Xây	Văn Bàn	Lào Cai

ID	Tên vị trí	x	y	Thời gian xảy ra lũ quét	Diện tích lưu vực (km^2)	Độ dốc lưu vực (%)	Chiều dài dòng chảy (m)	Tỉnh	Huyện	Xã
26	Bình Phú	544,066	2,453,681	15/05/2017	158.76	47.59	25,568.65	Bình Phú	Chiêm Hóa	Tuyên Quang
27	Yên Lập	540,046	2,458,337	15/05/2017	26.82	47.57	8,693.30	Yên Lập	Chiêm Hóa	Tuyên Quang
28	Trường THCS Võ Thị Sáu	405,765	2,416,453	3/8/2017	4.19	53.93	4,394.04	Mù Căng Chải	Mù Căng Chải	Yên Bái
29	Cầu Nậm Păm	399,018	2,380,662	2/8/2017	71.03	57.49	19,138.15	Ít Ong	Mường La	Sơn La
30	Nậm Păm	403,464	2,385,075	25/08/2017	37.56	60.81	10,557.56	Nậm Păm	Mường La	Sơn La
31	Thôn Dền Thàng	387,856	2,456,743	12/8/2017	11.78	45.24	5,690.44	Tả Van	Sa Pa	Lào Cai
32	Xóm Nhạp	497,776	2,315,383	10/10/2017	4.69	50.40	5,177.42	Đồng Ruộng	Đà Bắc	Hòa Bình
33	Thôn Tham Còn	494,656	2,514,375	23/06/2018	5.83	37.65	4,800.73	Cao Bồ	Vị Xuyên	Hà Giang
34	Bản Hồ	393,439	2,462,438	24/06/2018	168.25	50.94	30,598.73	Bản Hồ	Sa Pa	Lào Cai
35	Hua Bum	291,195	2,478,044	24/06/2018	50.59	50.52	12,901.83	Hua Bun	Nậm Nhùn	Lai Châu
36	Nậm Sì Lường	278,631	2,487,255	24/06/2018	31.73	52.31	12,195.14	Pa Vệ Sử	Mường Tè	Lai Châu
37	Bản Chu Va 2	365,174	2,472,434	25/06/2018	76.30	63.24	13,940.65	Sơn Bình	Tam Đường	Lai Châu
38	Tân Việt	549,075	2,531,323	3/6/2018	8.36	53.63	5,984.41	Tân Việt	Bảo Lâm	Cao Bằng
39	Nậm Há 1	343,800	2,454,278	24/06/2018	19.19	56.53	9,624.18	Noong Hẻo	Sìn Hồ	Lai Châu
40	Bản Tủ	446,236	2,398,507	19/07/2018	41.31	44.53	16,754.99	Sơn Lương	Văn Chấn	Yên Bái
41	Nậm Mười	446,445	2,402,894	19/08/2018	6.21	39.04	4,705.58	Nậm Mười	Văn Chấn	Yên Bái
42	Bản Huổi Hài	413,815	2,357,129	30/08/2018	27.60	34.83	13,252.78	Chiềng Chăn	Mai Sơn	Sơn La
43	Trường Tiểu học Tà Hộc	419,563	2,350,105	16/08/2018	74.39	42.85	18,490.21	Tà Hộc	Mai Sơn	Sơn La
44	Bản Muống	475,484	2,304,856	19/07/2018	11.73	31.50	10,196.68	Phiêng Luông	Mộc Châu	Sơn La
45	cầu Nậm Pay	332,880	2,406,067	28/08/2018	164.03	45.82	27,327.84	Nà Tòng	Tuần Giáo	Điện Biên
46	Nậm Păm	403,456	2,385,075	28/08/2018	37.56	60.81	10,557.56	Nậm Păm	Mường La	Sơn La
47	Trung học Cơ sở Bản Rịa	447,623	2,481,871	22/10/2018	12.14	44.86	7,090.14	Bản Rịa	Quang Bình	Hà Giang
48	Thôn Nà Khương	444,177	2,477,472	22/10/2018	64.13	46.29	18,665.42	Nghĩa Đô	Bảo Yên	Lào Cai
49	cầu treo thôn Bản Hồ	393,439	2,462,444	24/06/2019	168.25	50.94	30,598.73	Bản Hồ	Sa Pa	Lào Cai
50	Bản Mong	443,355	2,337,315	2/3/2020	11.36	63.39	5,771.03	Song Pe	Bắc Yên	Sơn La
51	Là Sáng	518,115	2,527,693	20/07/2020	43.83	53.35	10,920.58	Minh Sơn	Bắc Mê	Hà Giang

ID	Tên vị trí	x	y	Thời gian xảy ra lũ quét	Diện tích lưu vực (km²)	Độ dốc lưu vực (%)	Chiều dài dòng chảy (m)	Tỉnh	Huyện	Xã
52	Bản Co Muồng (nay sáp nhập thành bản Tân Tiến, xã Tạ Khoa, huyện Bắc Yên)	447,346	2,329,230	6/8/2020	32.16	43.19	12,525.50	Chiềng Sại	Bắc Yên	Sơn La
53	Lâm Thượng	467,656	2,455,214	13/09/2020	36.34	44.21	12,969.84	Lâm Thượng	Lục Yên	Yên Bái
54	Nặm Păm	403,450	2,385,081	25/08/2021	37.56	60.81	10,557.56	Nậm Păm	Mường La	Sơn La
55	Thôn Na Pao	404,533	2,495,506	24/03/2022	32.58	40.31	14,667.41	Bản Lầu	Mường Khương	Lào Cai
56	Thôn Lũng Cút	663,677	2,397,134	10/5/2022	14.18	39.77	13,492.27	Đồng Mỏ	Chi Lăng	Lạng Sơn
57	Thôn Kim Vân	602,897	2,461,575	11/5/2022	28.37	40.20	8,530.87	Kim Hỷ	Na Rì	Bắc Kạn
58	Thị trấn Lăng Can	522,127	2,482,919	29/06/2022	90.41	46.67	25,786.82	Lăng Can	Lâm Bình	Tuyên Quang
59	Lương Sơn	449,653	2,456,432	14/06/2022	30.91	35.64	12,135.50	Phố Ràng	Bảo Yên	Lào Cai
60	Khu 1, thị trấn Pác Mjầu	550,582	2,524,663	5/7/2022	60.37	48.98	13,104.03	Pác Miầu	Bảo Lâm	Cao Bằng
61	Nặm Păm	397,633	2,378,113	16/09/2022	118.20	50.07	22,616.74	Ít Ong	Mường La	Sơn La
62	Thôn Nặm Am	484,395	2,507,410	8/7/2013	43.80	44.84	12,223.01	Thượng Sơn	Vị Xuyên	Hà Giang
63	Bản Hát	434,535	2,377,058	11/10/2017	86.25	58.72	16,119.84	Hát Lìu	Trạm Tấu	Yên Bái
64	Bản Thón	445,308	2,379,704	11/10/2017	249.96	56.94	33,750.34	Phúc Sơn	Văn Chấn	Yên Bái
65	Chà Nưa	281,501	2,427,614	28/08/2018	132.78	38.62	31,168.21	Chà Nưa	Nậm Pồ	Điện Biên
66	Yên Hòa	503,670	2,306,714	10/10/2018	5.96	27.35	6,738.67	Yên Hòa	Đà Bắc	Hòa Bình
67	Bản Nậm Nhừ 1	257,479	2,422,323	17/08/2020	16.54	39.45	7,630.51	Nà Khoa	Nậm Pồ	Điện Biên
68	Mỹ Phương	585,675	2,469,705	30/07/2010	23.81	46.11	9,808.45	Mỹ Phương	Ba Bể	Bắc Kạn
69	bản Cà Là Pá	233,956	2,472,013	25/06/2018	23.52	38.36	10,288.81	Chung Chải	Mường Nhé	Điện Biên
70	Cầu dân sinh (Nam Quang)	550,365	2,526,481	2/6/2018	36.60	57.38	14,705.58	Nam Quang	Bảo Lâm	Cao Bằng
71	Bản Cáp Na	414,149	2,347,953	28/08/2018	12.63	33.65	5,635.58	Nà Pó	Mai Sơn	Sơn La
72	Trường học Nà Ớt	395,151	2,327,854	28/08/2018	59.33	46.00	16,328.96	Nà Ớt	Mai Sơn	Sơn La
73	Phổng Lăng	362,086	2,374,031	23/08/2018	37.46	36.55	16,132.63	Phổng Lăng	Thuận Châu	Sơn La
74	Thôn Nậm Ngần	397,396	2,458,093	24/08/2018	8.86	61.39	4,483.16	Nậm Sài	Sa Pa	Lào Cai

ID	Tên vị trí	x	y	Thời gian xảy ra lũ quét	Diện tích lưu vực (km^2)	Độ dốc lưu vực (%)	Chiều dài dòng chảy (m)	Tỉnh	Huyện	Xã
75	Bản Mý Háng	411,261	2,411,458	20/07/2019	126.18	40.84	21,086.38	La Pán Tẩn	Mù Căng Chải	Yên Bái
76	Trạm Y tế xã Hồ Bốn	389,025	2,418,823	6/8/2023	30.44	52.98	10,445.73	Lao Chải	Mù Căng Chải	Yên Bái
77	thôn Nậm Than, xã Liên Minh	399,478	2,458,248	12/9/2023	15.63	49.71	8,761.46	Nậm Cang	Sa Pa	Lào Cai
78	suối Sùng Vui (Suối Chải)	381,885	2,483,284	12/9/2023	3.48	53.11	5,748.31	Phìn Ngan	Bát Xát	Lào Cai
79	Nậm Păm	398,055	2,379,136	25/08/2021	116.03	50.41	21,313.07	Ít Ong	Mường La	Sơn La
80	Chà Tở	279,583	2,431,456	15/07/2023	31.43	41.51	13,227.93	Chà Cang	Nậm Pồ	Điện Biên
81	thôn Minh Hạ 1	402,223	2,434,185	17/04/2021	10.86	57.18	6,823.52	Minh Lương	Văn Bàn	Lào Cai
82	phường Pú Trạng	448,545	2,389,515	11/10/2017	123.92	51.68	33,569.09	Pú Trạng	Nghĩa Lộ	Yên Bái