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

BẢN SAO CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

Hà Nội, 2026

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Lê Văn Thìn, Trần Đình Hòa (2023), "Các phương pháp xác định nguy cơ lũ quét", Tạp chí Nông nghiệp & Phát triển nông thôn, T9, tr. 164–172.

2. Lê Văn Thìn (2023), "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, tr. 99–103.

3. Lê Văn Thìn (2024), "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, số 84, tr. 67–77.

4. Thin Van Le, Duong Cao Phan, Hoa Dinh Tran and Giap Dang Nguyen (2026), "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, doi: 10.1007/s40899-025-01313-5.

CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH NGUY CƠ LŨ QUÉT

Lê Văn Thìn

Trần Đình Hòa

CÁC PHƯƠNG PHÁP XÁC ĐỊNH NGUY CƠ LŨ QUÉT

Lê Văn Thìn[1,*], Trần Đình Hòa[2]

TÓM TẮT

Nghiên cứu này thống kê các phương pháp xác định nguy cơ lũ quét trên thế giới và ở Việt Nam, các chỉ số phân loại nguy cơ lũ quét và đánh giá mức độ tin cậy dựa trên các ấn phẩm khoa học đã được công bố đến tháng 4 năm 2023. Nguồn khai thác và đánh giá sử dụng bao gồm: (1) từ Crossref (một cơ quan đăng ký mã DOI định danh cho các ấn phẩm khoa học) với 143.500.238 bản ghi và (2) từ cơ sở dữ liệu (CSDL) công bố Khoa học và Công nghệ Việt Nam (Vista) 340.813 bản ghi.

Từ khóa: *Phương pháp, chỉ số, nguy cơ, lũ quét, GIS, học máy, crossref.*

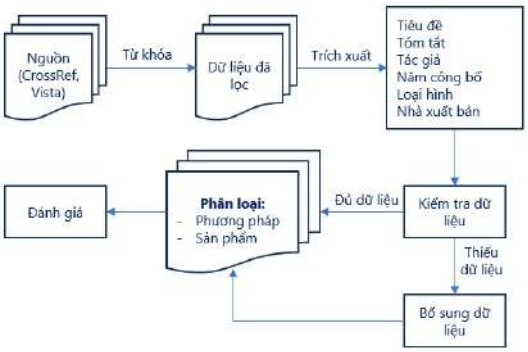
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, tác động của biến đổi khí hậu đã làm cho thời tiết càng trở nên có những diễn biến bất thường, mưa lớn trong gian đoạn ngắn và cục bộ đã gây ra những tác động rất lớn đến các loại hình thiên tai có liên quan đến nước nói chung, đặc biệt là lũ quét nói riêng. Từ năm 2022 đến nay, cả nước đã xảy ra 310 trận lũ quét ở các khu vực miền núi [1], đây là loại hình thiên tai đặc biệt nguy hiểm, gây thiệt hại lớn về người và tài sản và thường xuất hiện ở các khu vực miền núi nước ta.

Để dự báo nguy cơ về lũ quét, đã có nhiều nghiên cứu trong nước và trên thế giới đạt được những thành tựu đáng kể. Nghiên cứu này tổng hợp các phương pháp được sử dụng để xác định nguy cơ lũ quét, các sản phẩm hình thành từ kết quả nghiên cứu về lũ quét và mức độ tin cậy của chúng. Số liệu được thu thập tới tháng 4 năm 2023.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để đánh giá được các nghiên cứu, phương pháp phân tích thống kê được áp dụng để phân loại và tổng hợp dữ liệu. Quy trình thực hiện nghiên cứu như hình 1.



Hình 1. Quy trình nghiên cứu, đánh giá các nghiên cứu về lũ quét.

2.1. Nguồn dữ liệu

Nguồn dữ liệu trong nghiên cứu được lấy trực tiếp từ hai nguồn: Crossref [2] và Vista (hệ thống thông tin khoa học và công nghệ) [3].

2.2. Từ khóa và dữ liệu

Do dữ liệu về các ấn phẩm bao trùm mọi lĩnh vực, các dữ liệu thu thập được cần được lọc ra các nghiên cứu về lũ quét. Trong CSDL Crossref, các từ khóa bao gồm: flash flood, flash-flood. Toàn bộ các ấn phẩm mà tiêu đề (title) hoặc tóm tắt (abstract) có chứa từ khóa này được liệt kê và thu thập thành CSDL của nghiên cứu.

Tương tự như vậy với CSDL của Vista, các nghiên cứu có tiêu đề hoặc tóm tắt có chứa từ khóa "lũ quét" được liệt kê và đưa vào trong CSDL của nghiên cứu.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Dựa trên các nghiên cứu đã thu thập, việc đánh giá các phương pháp xác định lũ quét bao

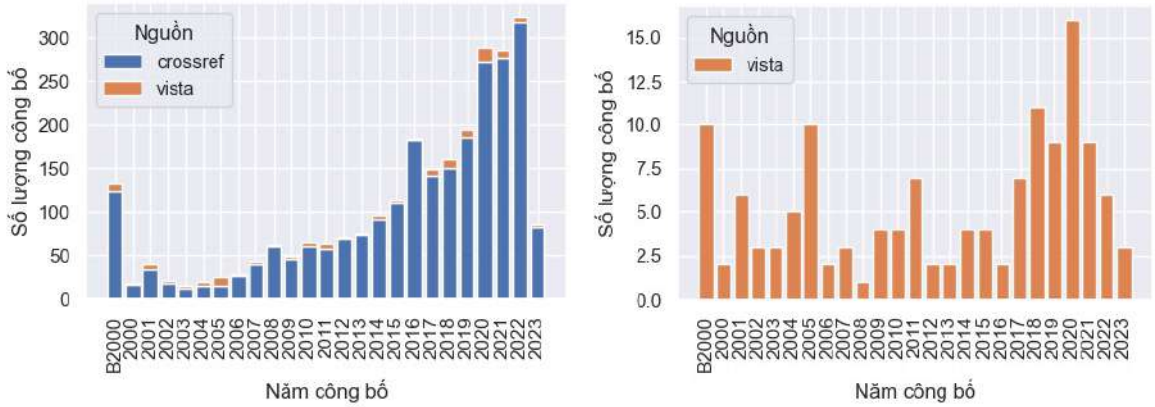
[1] Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển
[2] Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam
[*] Email: levanthin@gmail.com

gồm: Các chỉ số về lũ quét, các phương pháp, công cụ sử dụng để xác định nguy cơ lũ quét. Mỗi chỉ số lại sử dụng một phương pháp cụ thể như: phương pháp GIS, phương pháp thủy văn, phương pháp học máy hay phương pháp kết hợp… để tính toán, xác định lũ quét theo không gian và thời gian.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

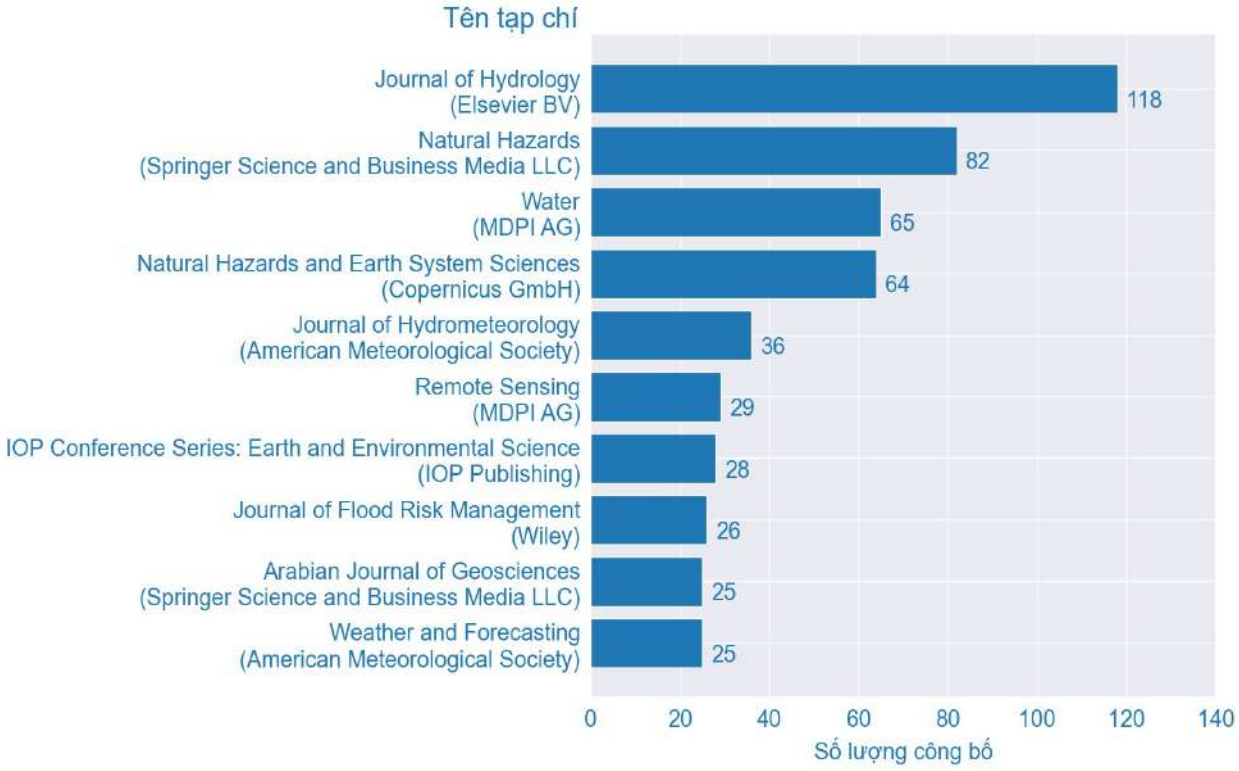
3.1. Xu hướng công bố

Kết quả lọc với từ khóa "flash flood", "flash-flood" ở nguồn dữ liệu Crossref thu được tổng số nghiên cứu là 2.471 nghiên cứu có liên quan tới lũ quét. Nghiên cứu sớm nhất bắt đầu từ năm 1943 [4]. Kết quả lọc với từ khóa "lũ quét" ở nguồn dữ liệu Vista thu được tổng số 135 nghiên cứu. Nghiên cứu sớm nhất được đăng tải bắt đầu từ năm 1994 [5].



Hình 2. Tổng hợp số lượng công bố liên quan đến lũ quét trên thế giới (bên trái) và trong nước (bên phải)

Do các công bố trước năm 2000 khá hạn chế về số lượng, nghiên cứu đã gộp toàn bộ số lượng các nghiên cứu trước năm 2000 để mô tả trực quan hơn và gán nhãn B2000. Kết quả về số lượng các công bố hàng năm được thể hiện ở hình 2.



Hình 3. Danh sách 10 tạp chí phổ biến trên thế giới có công bố liên quan đến lũ quét

Kết quả về số lượng cho thấy, ngày càng có nhiều các nghiên cứu về lũ quét được tiến hành theo thời gian. Số liệu năm 2023 mới chỉ được cập nhật đến tháng 4 nên không mang tính đại diện cho năm 2023. Không như xu hướng của thế giới, các nghiên cứu về lũ quét của Việt Nam phát triển theo từng giai đoạn. Số lượng công bố của Việt Nam theo Vista cao nhất là năm 2020 với 16 bài, giai đoạn từ năm 2018 - 2023 có số bài đăng trên 9 bài/năm.

Trong các nhà xuất bản, Copernicus GMBH và Elsevier BV là 2 nhà xuất bản phổ biến nhất (với tổng số 345 và 328 công bố liên quan đến lũ quét cho các tạp chí trực thuộc). Ngoài ra, Springer cũng là 1 trong các nhà xuất bản lớn với 245 công bố. Các tạp chí phổ biến bao gồm Tạp chí Thủy văn (Journal of Hydrology), Tạp chí Thiên tai (Natural Hazards) và Nước (Water).



Hình 4. Danh sách 10 các tạp chí phổ biến trong nước có liên quan đến lũ quét

Trong nước, các bài công bố về lũ quét cũng xuất hiện nhiều ở các tạp chí kỹ thuật. Các tạp chí bao gồm: Tạp chí Tài nguyên và Môi trường, Tạp chí Khí tượng Thủy văn và Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi.

3.2. Phương pháp xác định lũ quét

Cho đến nay, có nhiều phương pháp để xác định lũ quét mà cụ thể là dự báo hay cảnh báo lũ quét. Quá trình rà soát các nghiên cứu cho thấy, có 4 cách tiếp cận bao gồm: (1) đánh giá tính nhạy cảm với lũ quét; (2) đánh giá lũ quét dựa trên lượng mưa; (3) đánh giá lũ quét dựa trên các yếu tố thủy văn; (4) đánh giá lũ quét dựa trên các yếu tố thủy lực.

3.2.1. Đánh giá tính nhạy cảm với lũ quét

Đây là một cách tiếp cận tương đối đơn giản để phân tích các khu vực thường xuyên xảy ra lũ quét dựa trên nhiều yếu tố như độ dốc, lượng mưa bình quân năm hay các đặc điểm cụ thể về địa hình. Do đơn giản nên hầu hết các nghiên cứu này chỉ xác định khu vực có tính nhạy cảm cao về lũ quét mà chưa thể xác định được nguy cơ xảy ra lũ quét (điều kiện cụ thể để xảy ra lũ quét). Các nghiên cứu này thường sử dụng phương pháp phổ biến như các phương pháp chồng chập nhân tố (AHP) [6], tỷ lệ tần suất (FR) [7], trọng số dẫn chứng (WOE) [8]… hay các mô hình học máy: hồi quy tuyến tính, hồi quy logistic, mô hình máy hỗ trợ vectơ (SVM), mô hình cây quyết định [9]…

Sản phẩm các nghiên cứu này là bản đồ các khu vực dễ bị ảnh hưởng bởi lũ quét, mặc dù không thể dự báo được khi nào xảy ra lũ quét hay lũ quét sẽ xảy ra trong điều kiện nào, nhưng kết quả này lại giúp các nhà quản lý trong công tác quy hoạch sử dụng đất và quy hoạch tái định cư.

3.2.2. Đánh giá lũ quét dựa trên lượng mưa

Mưa là một trong những yếu tố chính trong việc hình thành lũ quét, do vậy, nhiều nghiên cứu đã cố gắng xây dựng ngưỡng mưa sinh lũ quét phục vụ công tác dự báo, cảnh báo nguy cơ lũ quét. Thông thường, ngưỡng mưa này dựa vào lượng mưa lịch sử của trận lũ quét đã từng xảy ra trong quá khứ. Các phương pháp phổ biến bao gồm: Phương pháp đường tới hạn (CL) [10],

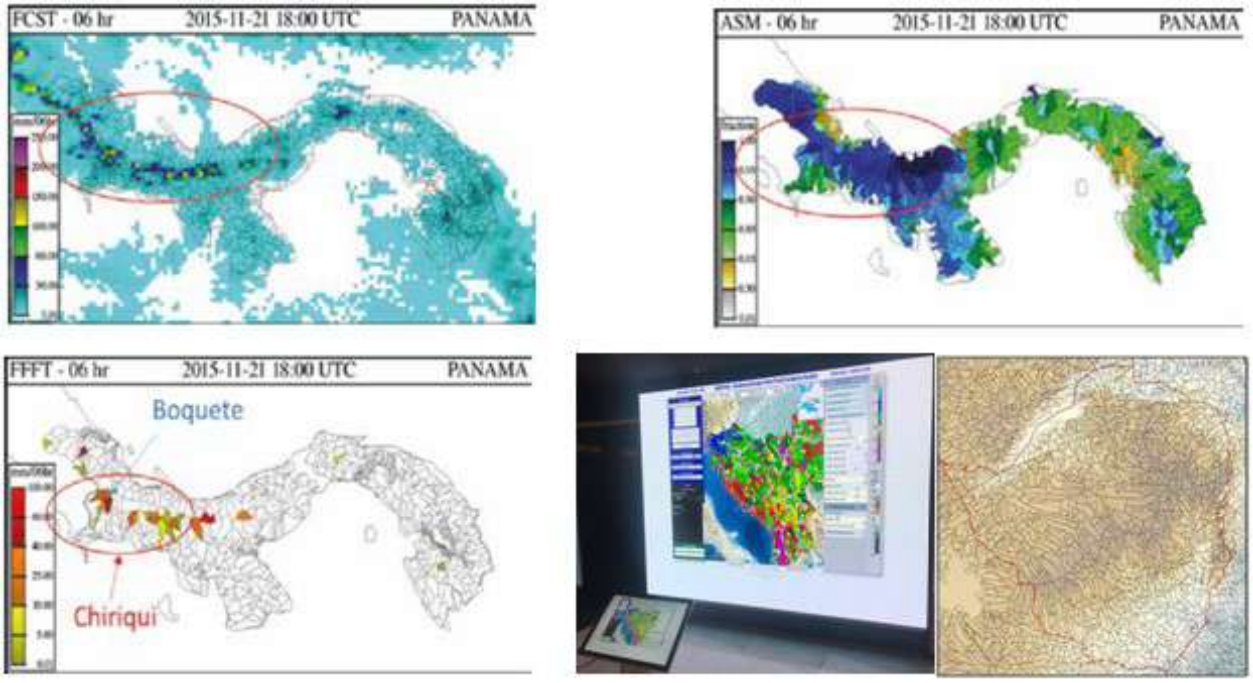
đường quan hệ cường độ mưa - thời gian mưa - tần suất (IDF) [11], hay phương pháp tần suất.

Do sử dụng lượng mưa để xây dựng ngưỡng sinh lũ quét, kết quả của nghiên cứu này có thể sử dụng trực tiếp lượng mưa thực đo hoặc lượng mưa dự báo từ các nguồn dự báo để có thể xác định nguy cơ xảy ra lũ quét phục vụ bài toán dự báo, cảnh báo lũ quét. Mặc dù vậy, các lượng mưa tính toán chỉ đại diện cho một khu vực cụ thể trong phạm vi tính toán (thậm chí khu vực xung quanh một trạm quan trắc mưa cụ thể), phương pháp này có thể sinh ra cảnh báo không chính xác nếu áp dụng thực tế đo: (1) lượng mưa lớn tại một trạm có thể không đủ khả năng sinh ra lũ quét trên lưu vực; (2) số liệu dự báo mưa thiếu chính xác (mặc dù đã có sự gia tăng đáng kể độ tin cậy từ dữ liệu Radar thời tiết).

3.2.3. Đánh giá lũ quét dựa trên các yếu tố thủy văn

Do những nhược điểm của việc sử dụng lượng mưa để cảnh báo nguy cơ lũ quét, nhiều nghiên cứu đã đưa phương pháp thủy văn vào để tính toán sự tương tác của mưa đến bề mặt lưu vực nhằm đưa ra các chỉ số cần thiết phục vụ cảnh báo thay vì sử dụng lượng mưa trực tiếp. Một chỉ số vô cùng nổi tiếng là chỉ số chỉ dẫn lũ quét Flash Flood Guidance (FFG).

FFG là một sản phẩm chủ chốt trong việc xác định khả năng xảy ra lũ quét của hệ thống chỉ dẫn lũ quét Flash Flood Guidance System (FFGS). FFG được hiểu là lượng mưa thực tế (tổng lượng mưa) trong một khoảng thời gian nhất định (như 1, 3 hoặc 6 giờ) vừa đủ để gây ra dòng chảy tràn bờ ($Q_{bankfull}$) tại vị trí tính toán nguy cơ lũ quét [12]. Chỉ số FFG là một chỉ số động, thay đổi dựa trên khả năng trữ nước của lưu vực và được cập nhật 6 giờ/lần, sau mỗi lần cập nhật, các giá trị dự báo đưa ra các thông tin cho 1, 3, 6 giờ tiếp theo. Nếu lượng mưa dự báo vượt lượng mưa FFG tương ứng thì có khả năng xảy ra lũ quét tại vị trí cửa ra của lưu vực. Chỉ số FFG càng thấp thì khả năng xảy ra lũ quét càng cao.



Hình 5. Sản phẩm của hệ thống FFGS

Để tính được FFG, cần xác định lưu lượng tràn bờ tại mỗi vị trí tính toán. Lưu lượng tràn bờ được tính bằng phương pháp thuỷ lực với một mặt cắt đã biết. Hiện nay, trên thế giới đã có hơn 50 quốc gia sử dụng hệ thống FFGS cho cảnh báo nguy cơ lũ quét.

Trong hệ thống FFGS, chỉ số nguy cơ lũ quét dự báo (FFFT) được tính toán bằng hiệu số của lượng mưa dự báo (FMAP) và lượng mưa cần thiết để sinh lũ tràn bờ (FFG). Ngoài chỉ số FFFT, việc sử dụng dòng chảy bề mặt (runoff) cũng được sử dụng để đánh giá nguy cơ lũ quét [13], đây chính

là lượng mưa sinh ra dòng chảy bề mặt sau khi đã xét tới lượng nước hấp thụ vào bề mặt lưu vực.

3.2.4. Đánh giá lũ quét dựa trên các yếu tố thủy lực

Ngưỡng sinh dòng chảy được sử dụng để đánh giá dòng chảy trên sông khi vượt qua ngưỡng cần cảnh báo. Đây là kết quả của việc sử dụng mô hình thủy lực để tính toán các yếu tố về mực nước, vận tốc… từ mưa và các mô hình thủy văn. Các kết quả tính toán sẽ được so sánh trực tiếp với giá trị ngưỡng dòng chảy. Ngưỡng dòng chảy có thể là mực nước lớn nhất đã xảy ra tương ứng với trận lũ quét trong quá khứ, cũng có thể là một giá trị tương ứng với tần suất khi có quan trắc trong nhiều năm về mực nước (phương pháp thống kê).

Trong hệ thống FFGS, việc xác định lưu lượng tràn bờ được sử dụng bằng phương pháp thủy lực mặt cắt, từ đó đưa ra ngưỡng tràn bờ tại các vị trí cửa ra của lưu vực tính toán. Một số các nghiên cứu khác có thể sử dụng ngưỡng tràn bờ bằng công thức kinh nghiệm [14].

3.3. Chỉ số phân loại nguy cơ lũ quét

Có rất nhiều chỉ số phân loại nguy cơ lũ quét được các nhà khoa học xây dựng nhằm tìm ra ngưỡng sinh lũ quét. Nghiên cứu này liệt kê một số các chỉ số phổ biến đang được sử dụng trong nước và trên thế giới.

3.3.1. Chỉ số chỉ số lũ quét tiềm tàng FFPI

Chỉ số FFPI được gọi là chỉ số lũ quét tiềm tàng, chỉ số này sử dụng phương pháp chồng chập nhân tố để xác định tính nhạy cảm của lũ quét cho các khu vực cụ thể.

$$FFPI = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i FFPI_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$$

Trong đó: $FFPI_i$: Chỉ số nguy cơ lũ quét đối với yếu tố thứ i; w_i: Hệ số tương ứng với chỉ số nguy cơ lũ quét của yếu tố thứ i.

Chỉ số FFPI cho các yếu tố bao gồm: loại đất, sử dụng đất, độ dốc và mật độ rừng. Các chỉ số FFPI cho mỗi yếu tố được phân chia thành 10 lớp bằng phương pháp GIS và được đặt các giá trị từ 1 - 10 tương ứng với xu hướng gia tăng nguy cơ lũ quét của từng yếu tố. Các yếu tố càng bất lợi, giá trị càng lớn (độ dốc càng lớn thì chỉ số càng cao).

Giá trị trọng số (w) cho mỗi yếu tố ở đây chưa được xác định một cách cụ thể mà sẽ được hiệu chỉnh tuỳ thuộc vào khu vực nghiên cứu, tuy nhiên, trong các công bố trước đó của Gregory Smith (2021) [15] đã lấy giá trị cho toàn bộ các yếu tố là 1 và 1,5 cho riêng yếu tố về độ dốc. Đây là 1 phương pháp xác định được cho là đơn giản và có tính ứng dụng rất cao. Ở Việt Nam, có rất nhiều nhà nghiên cứu đã sử dụng chỉ số này để xây dựng bản đồ nhạy cảm với lũ quét [16], [17].

3.3.2. Chỉ số FFFT

Chỉ số FFFT là một trong những chỉ số đang được sử dụng để cảnh báo nguy cơ lũ quét phổ biến nhất cùng hệ thống FFGS và đã có mặt ở hơn 50 quốc gia.

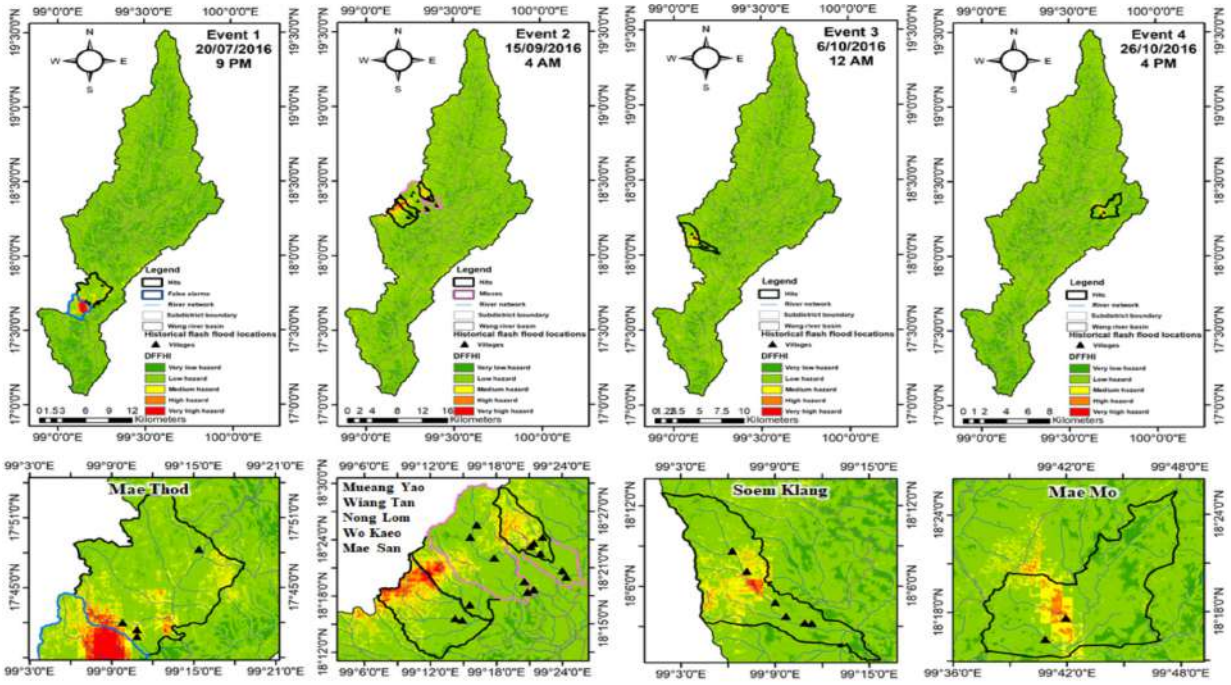
FFFT = FMAP – FFG

Trong đó: FMAP: là lượng mưa dự báo (mm); FFG: lượng mưa cần thiết để sinh lũ tràn bờ tại thời điểm dự báo (mm)

Chỉ số FFFT được phân thành 5 cấp: rất thấp (≤10 mm); thấp (≤30 mm); trung bình (≤50 mm); cao (≤100 mm) và rất cao (>100 mm) [18]. Như vậy, mỗi thời điểm dự báo, hệ thống sẽ xác định lượng mưa cần thiết để sinh lũ tràn bờ (tương ứng với dòng chảy hiện tại) và lượng mưa dự báo để xác định FFFT. Chỉ số này hiện nay mới chỉ áp dụng trong phạm vi hệ thống FFGS mà chưa có nhiều nghiên cứu áp dụng bên ngoài FFGS.

3.3.3. Chỉ số DFFHI

Chỉ số DFFHI (Dynamic Flash Flood Hazard Index) là chỉ số nguy cơ lũ quét động [19] , áp dụng cho lưu vực sông Wang ở Thái Lan. Phương pháp này nhằm tính toán chỉ số DFFHI dựa trên chỉ số lũ quét tiềm tàng FFPI, chỉ số mưa RI (Rainfall Index) và chỉ số độ ẩm của đất SWI (Soil Water Index)



Hình 6. Chỉ số DFFHI cho lưu vực sông Wang ở Thái Lan

Theo đó, DFFHI được xác định bằng công thức sau:

$$DFFHI = (0.50 \times FFPI) + (0.45 \times RI) + (0.05 \times SWI)$$

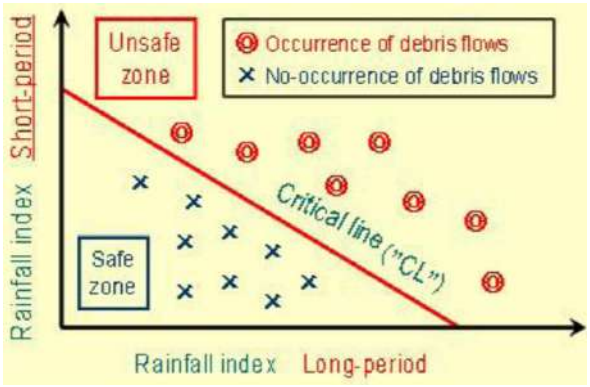
Việc xác định FFPI hoàn toàn tương tự như đã trình bày ở trên bằng phương pháp GIS, tuy nhiên có 8 yếu tố được tính toán tương ứng với các trọng số hiệu chỉnh bao gồm: Sử dụng đất (0,15); nhóm đất (0,15); chỉ số thực vật (0,1); độ dốc (0,25); độ cong hướng dòng (0,05); độ cong địa hình (0,05); tích luỹ dòng chảy (0,1) và khoảng cách đến sông suối (0,15). Chỉ số mưa RI được xác định bằng công thức sau:

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

Trong đó, R_{-3day}, R_{-2day}, R_{-1day} là lượng mưa ngày thứ 3, thứ 2 và ngày thứ nhất trong quá khứ tính theo mm, I là cường độ mưa giờ tại thời điểm tính toán (mm/giờ). Chỉ số SWI được lấy từ bản đồ vệ tinh độ phân giải 0,1 độ từ Copernicus Global Land Service mỗi ngày. Chỉ số DFFHI được tính toán cho lưu vực sông Wang ở Thái Land thể hiện ở hình 6.

3.3.4. Đường tới hạn CL

Trên cơ sở nghiên cứu sự xuất hiện của lũ quét từ Nhật Bản và các nước nhiệt đới khu vực Đông Nam Á, sự xuất hiện lũ quét được xét phụ thuộc vào quan hệ tổng lượng mưa tích lũy các thời đoạn và cường độ mưa lớn nhất xuất hiện trong thời đoạn đó tại một khu vực có điều kiện mặt đệm đã biết. Như vậy, việc xuất hiện một trận mưa gây lũ quét được xác định qua số liệu quan trắc mưa và sự xuất hiện lũ quét tại mỗi trạm đo mưa [20].



Hình 7. Phương pháp đường tới hạn CL

Phương pháp này được sử dụng để cảnh báo sự xuất hiện của lũ quét sử dụng các chỉ số mưa (cường độ và tổng lượng mưa) rút ra từ số liệu về cường độ mưa và tổng lượng mưa thu thập được từ các trận lũ quét, sạt lở đất đã xảy ra trong khu vực nghiên cứu. Do đó, ngưỡng mưa gây lũ quét được nhìn nhận là ngưỡng động phụ thuộc vào mối quan hệ giữa lượng mưa lũy tích từ khi mưa và

cường độ mưa tại thời điểm phát sinh lũ quét.

3.3.5. Chỉ số mô-đun đỉnh lũ

Chỉ số mô-đun đỉnh lũ là một chỉ số nhằm xác định một trận lũ là lũ quét hay lũ thường. Eric Gaume và cs (2009) [21] sau khi đánh giá đặc trưng của các trận lũ quét xảy ra ở châu Âu, đã tìm ra mô-đun đỉnh lũ của các trận lũ quét từ 0,5 - 40 $m^3/(s.km^2)$.

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

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

Braud và cs (2014) [22] đã tiếp tục nghiên cứu và chỉ ra sự phân định về lũ quét với lũ thường bằng một khái niệm về lũ quét được xác định như sau: Lũ quét là một sự gia tăng về thuỷ văn trong thời gian rất ngắn (vài giờ hoặc ít hơn với lưu vực từ 1 - 100 km^2 và dưới 24 giờ đối với lưu vực có diện tích khoảng 1.000 km^2), để được coi là lũ quét, các trận lũ phải có mô-đun đỉnh lũ lớn hơn 0,5 $m^3/(s.km^2)$.

Cả hai nghiên cứu này đều đưa ra chỉ số phân định là 0,5 $m^3/(s.km^2)$, tuy nhiên các chỉ số này chưa xét đến năng lượng dòng chảy, khiến cho việc tính toán nguy cơ lũ quét tại các khu vực thượng nguồn chưa đảm bảo độ tin cậy.

3.4. Thảo luận

Theo rà soát, đánh giá các nghiên cứu, với mục tiêu đánh giá được khả năng xuất hiện lũ quét, một số nghiên cứu đã sử dụng chủ yếu 4 cách tiếp cận chính bao gồm: (1) đánh giá tính nhạy cảm với lũ quét; (2) đánh giá lũ quét dựa trên lượng mưa; (3) đánh giá lũ quét dựa trên các yếu tố thủy văn; (4) đánh giá lũ quét dựa trên các yếu tố thủy lực. Trong đó, phổ biến nhất đang được sử dụng trong các công bố khoa học là đánh giá tính nhạy cảm với lũ quét.

Việc đánh giá tính nhạy cảm với lũ quét thông thường dựa vào phương pháp chồng chập các nhân tố, các công cụ sử dụng chủ yếu bao gồm: Công cụ GIS và công cụ học máy. Trong đó, một số thuật toán phổ biến như AHP, FR, WOE… sử dụng để phân tích các trọng số, ngoài ra trong thời gian gần đây, các thuật toán học máy như hồi quy tuyến tính/logistic, cây quyết định, máy hỗ trợ vectơ… cũng dần được các nhà khoa học áp dụng. Đánh giá tính nhạy cảm của lũ quét hầu hết không mang tính ứng dụng cao, tuy nhiên, công việc này lại hỗ trợ tốt cho việc lập quy hoạch.

Lũ quét trong nghiên cứu thường có liên quan mật thiết đến lượng mưa, do vậy, sử dụng mưa và các kết quả tính toán từ mưa (thủy văn, thủy lực) là một trong các phương pháp hữu hiệu, mặc dù chứa các thuật toán phức tạp nhưng mang lại độ tin cậy cao. Ở Việt Nam, hệ thống FFGS đang được sử dụng một cách hiệu quả nhằm dự báo và cảnh báo nguy cơ lũ quét, đây là một công cụ phổ biến được các quốc gia trên thế giới sử dụng. Tuy nhiên, có một số yếu tố ảnh hưởng đến độ tin cậy của phương pháp dự báo này gồm:

Thứ nhất: Cảnh báo nguy cơ đến cấp lưu vực (mà phổ biến là ở diện tích với quy mô cấp huyện), với độ chi tiết chưa cao, điều này dẫn đến phạm vi cảnh báo rộng.

Thứ hai: Sử dụng kết quả khảo sát mặt cắt để xác định lưu lượng tràn bờ, điều này gây tốn kém và rất hạn chế áp dụng cho các khu vực thiếu số liệu.

Thứ ba: Sử dụng lượng mưa dự báo để tính toán nguy cơ, việc này dẫn đến sự phụ thuộc hoàn toàn vào kết quả tính toán mưa dự báo – một trong những vấn đề khó nhất của khí tượng - thủy văn. Mặc dù vậy, ở quy mô quốc gia chưa thể làm chi tiết được đến các lưu vực nhỏ. Các địa phương cần phối hợp nhằm triển khai mô hình một cách khoa học với độ chi tiết cao hơn trong công tác dự báo, cảnh báo nguy cơ lũ quét.

4. KẾT LUẬN

Quá trình nghiên cứu về lũ quét trên thế giới và Việt Nam bắt đầu từ rất sớm, quá trình phát triển đánh giá lũ quét từ định tính đến định lượng bằng chỉ số. Ngày nay, dưới sự phát triển của công nghệ, đặc biệt là công nghệ viễn thám GIS và học máy, các nghiên cứu về lũ quét ngày càng sử dụng nhiều dữ liệu quan sát bề mặt hơn nhằm xác định nguy cơ lũ quét một cách toàn diện hơn. Ở Việt Nam, hệ thống FFGS đã và đang là công cụ hỗ trợ

đắc lực trong công tác dự báo, cảnh báo nguy cơ lũ quét trên toàn quốc.

Kết quả nghiên cứu này có thể hữu ích đối với các nhà khoa học trong việc tìm kiếm góc nhìn tổng quan về tình hình nghiên cứu lũ quét đến thời điểm hiện nay.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Lan Anh (2023). Thiệt hại gần 25 tỷ đồng do thiên tai gây ra từ năm 2022 đến nay. *Tạp chí điện tử Kinh tế Môi trường*. https://kinhtemoitruong.vn/thiet-hai-gan-25-ty-dong-do-thien-tai-gay-ra-tu-nam-2022-den-nay-76907.html. Truy cập ngày 24/06/ 2023.

2. CrossRef, "You are Crossref," Crossref. https://www.crossref.org. Accessed May 1st, 2023.

3. Cục thông tin Khoa học và Công nghệ Quốc gia. "Cơ sở dữ liệu công bố KH&CN Việt Nam." https://sti.vista.gov.vn/Pages/danh-sach-tai-lieu-khcn-moi-nhat.aspx?Type_CSDL=TAILIEUKHCN. Truy cập ngày 01/5/2023.

4. Bernard S. Bush, M. J. Barrick (1943) "Emergency Experiences During Flash Floods". *Wiley - American Water Works Association,* vol. 35, no. 1, pp. 81 - 87.

5. Hà Văn Khối, Lê Đình Thành (1994) "Một số kết quả nghiên cứu về lũ quét tại thị xã Sơn La năm 1991". *Tạp chí Thủy lợi,* vol. 300, no. 0866 - 8736, pp. 34 - 36.

6. Dương Thị Lợi, Đặng Phương Lan (2021) "Ứng dụng mô hình đa chỉ tiêu nhằm đánh giá nguy cơ lũ quét trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu. Trường hợp nghiên cứu cụ thể: miền núi Tây Bắc - Việt Nam". *Tạp chí Khí tượng Thủy văn,* vol. 721, no. 1, pp. 31 - 45, doi:10.36335/VNJHM.2021(721).31 - 45.

7. Aqil Tariq, Jianguo Yan, Bushra Ghaffar, Shujing Qin , B. G. Mousa, Alireza Sharifi, Md. Enamul Huq, Muhammad Aslam (2022). "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.

8. Romulus Costache (2019). "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, pp. 1375 - 1402.

9. Ngô Thị Phương Thảo, Ngô Hùng Long, Nguyễn Quang Khánh, Bùi Thanh Tịnh, Trần Văn Phong, Nhữ Việt Hà, Nguyễn Thị Hải Yến (2020). "Ứng dụng phương pháp Random Forest dự báo vị trí có nguy cơ xảy ra lũ quét cho khu vực tỉnh Lào Cai". *Tạp chí khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất,* vol. 61, no. 5, pp. 30 - 42.

10. Hoàng Anh Huy, Hoàng Văn Đại, Văn Thị Hằng (2018). "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. 10, pp. 16 - 27.

11. Nejc Bezak, Mojca vSraj, Matjavz Mikovs (2016). "Copula-based IDF curves and empirical rainfall thresholds for flash floods and rainfall-induced landslides". *Journal of Hydrology,* vol. 541, pp. 272 - 284. DOI: 10.1016/ j.jhydrol. 2016.02.058.

12. WMO, "Flash flood guidance (FFG)," https://etrp.wmo.int/mod/resource/view.php?id=14342. Accessed December 25th, 2021.

13. Lê Văn Thìn, Đào Anh Tuấn, Nguyễn Đăng Giáp (2021). "Nghiên cứu tính toán nguy cơ lũ quét trên lưu vực Trạm Tấu - tỉnh Yên Bái". *Khoa học và Công nghệ Thủy lợi,* vol. 67.

14. Jonathan D Phillips (2002). "Geomorphic impacts of flash flooding in a forested headwater basin". *Journal of Hydrology,* vol. 269, pp. 236 - 250, doi:10.1016/s0022-1694(02)00280-9.

15. Gregory E. Smith, "NWS" https://www.weather.gov/media/owp/oh/rfcdev/docs/cbrfc_ffg2.pdf. Accessed December 25th, 2021.

16. Kiều Văn Hoan, Nguyễn Hà Trang, Nguyễn Phương Thúy, Nguyễn Hữu Thanh (2019). "Ứng dụng công nghệ GIS và Viễn thám xây dựng bản đồ tiềm năng lũ quét tỉnh Sơn La".

Tạp chí Khoa học, vol. 64, pp. 120 - 132, doi:10.18173/2354-1067.2019-0053.

17. Quách Thị Chúc, Bùi Thị Thúy Đào (2021). "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,* vol. 38, pp. 17 - 29.

18. Trần Tuyết Mai, Đoàn Văn Hải, Trịnh Thu Phương (2020). "Nghiên cứu ứng dụng công cụ khai thác sản phẩm của hệ thống định hướng cảnh báo lũ quét của Ủy hội sông Mê Công quốc tế (MRCFFGS) phục vụ xác định vùng nguy cơ lũ quét". *Tạp chí Khí tượng Thủy văn,* vol. 720, pp. 10 - 22, doi:10.36335/VNJHM.2020(720).

19. Sathit Chantip, Nat Marjang, Kobkiat Pongput (2020). "Development of Dynamic Flash Flood Hazard Index (DFFHI) in Wang River Basin, Thailand" International Association for Hydro-Environment Engineering and Research. https://www.iahr.org/library/infor?pid=7663. Accessed December 25th, 2021.

20. Lã Thanh Hà (2021). "Phương pháp cảnh báo lũ quét thời gian thực cho miền Trung". Người đô thị. https://nguoidothi.net.vn/phuong-phap-canh-bao-lu-quet-thoi-gian-thuc-cho-mien-trung-27133.html. Accessed December 25th, 2021.

21. 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, Alberto Viglione (2009). "A compilation of data on European flash floods" *Journal of Hydrology,* vol. 367, no. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028, 2009, pp. 70 - 78.

22. 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, A. Wijbrans (2014). "Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash flood understanding". *Hydrology and Earth System Sciences,* vol. 18, no. doi:10.5194/hess-18-3733-2014, pp. 3733 - 3761.

METHODS TO DETERMINE THE FLASH FLOOD HAZARD

Le Van Thin[1], Tran Dinh Hoa[2]

[1] Key Laboratory of River and Coastal Engineering

[2] Vietnam Academy for Water Resources

Summary

This study presents the methods of determining flash flood hazard in the world and Vietnam, the flash flood indexs and their reliability base on articles published until April 2023. Exploitation and usage assessment sources include: (1) from Crossref (a DOI registration agency that provides Digital Object Identifiers (DOIs) for scholarly content) with 143,500,238 records and (2) from Vietnam S&T publication database (Vista) with 340,813 records.

Keywords: *Methods, index, hazard, flash flood, GIS, machine learning, crossref.*

Người phản biện: PGS.TS. Hoàng Việt Hùng

Ngày nhận bài: 18/7/2023

Ngày thông qua phản biện: 18/8/2023

Ngày duyệt đăng: 25/8/2023

PHÂN TÍCH MỘT SỐ ĐẶC ĐIỂM HÌNH THÀNH LŨ QUÉT TẠI XÃ CHÀ TỞ, HUYỆN NẬM PỒ, TỈNH ĐIỆN BIÊN THÁNG 7/2023

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

Lê Văn Thìn
Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển

Tóm tắt: *Nghiên cứu này trình bày một số đặc điểm hình thành lũ quét tại lưu vực suối Nậm Hằng, thuộc xã Chà Tở, huyện Nậm Pồ, tỉnh Điện Biên, nơi xảy ra trận lũ quét ngày 15/7/2023. Kết quả phân tích cho thấy, trận lũ quét đã xảy ra với quy mô lớn, gây thiệt hại đến sản xuất nông nghiệp. Chỉ số mô đun đỉnh lũ đạt gần 2m³/(s.km²) và lưu lượng đỉnh lũ vượt lưu lượng tràn bờ theo tính toán.*
Từ khóa: *Thủy văn, đỉnh lũ, lưu lượng tràn bờ, lượng mưa, lũ quét.*

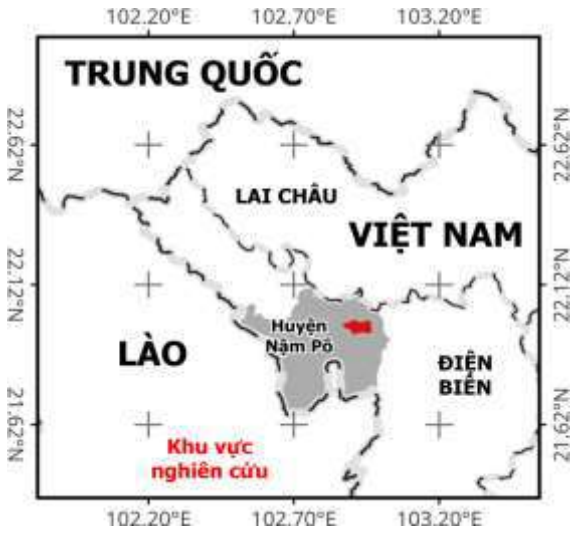
Summary: *This study presents some characteristics of the formation in the Nam Hang stream watershed, in Cha To commune, Nam Po district, Dien Bien province, where the flash flood occurred on July 15, 2023. Analysis results show that the flash flood occurred on a large scale, causing damage to agricultural production. The peak-discharge module index reached nearly 2m³/(s.km²) and the peak discharge exceeded the calculated bankfull discharge.*
Keywords: *Hydrology, peak-discharge, bankfull discharge, rainfall, flash floods.*

1. GIỚI THIỆU

Điện Biên là một tỉnh miền núi Tây Bắc – địa phương duy nhất có đường biên giới giáp với hai quốc gia Lào và Trung Quốc với sự phân bố địa hình phức tạp, chủ yếu là đồi núi dốc, hiểm trở và chia cắt mạnh, được cấu tạo bởi những dãy núi chạy dài theo hướng Tây Bắc – Đông Nam [1]. Huyện Nậm Pồ là một địa phương chịu nhiều tác động bởi loại hình thiên tai lũ quét, trong 10 năm trở lại đây, có nhiều trận lũ quét lớn đã xảy ra trên địa bàn huyện, gây thiệt hại nghiêm trọng về người và tài sản [2].

Rạng sáng ngày 15/7/2023 vừa qua, trên con suối Nậm Hằng chảy qua địa bàn xã Chà Tở, huyện Nậm Pồ, tỉnh Điện Biên cũng đã xảy ra một trận lũ quét.

Trận lũ này cuốn trôi 2 cây cầu dân sinh, phá hủy hơn 20 ao nuôi trồng thủy sản và 6 hecta đất trồng lúa. Nghiên cứu này phân tích các đặc điểm mưa và địa không gian của lưu vực xảy ra trận lũ quét để hiểu sâu hơn về quá trình hình thành.



Hình 1: Khu vực nghiên cứu

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phương pháp thực địa: Nhóm nghiên cứu đã có chuyến công tác thực địa tại huyện Nậm Pồ, tỉnh Điện Biên vào tháng 7/2023.

Phương pháp viễn thám: Nghiên cứu sử dụng một số ảnh viễn thám bao gồm: DEM (bản đồ địa hình), WorldCover (bản đồ sử dụng đất), Soil Texture Class (bản đồ cấu trúc lớp đất), Soil Taxonomy Great Groups (bản đồ nhóm đất),

Ngày nhận bài: 22/8/2023
Ngày thông qua phản biện: 29/9/2023
Ngày duyệt đăng: 01/11/2023

Phương pháp GIS: Nghiên cứu sử dụng phương pháp GIS trong việc xác định hướng dòng chảy, tập trung dòng chảy, xác định lưu vực.

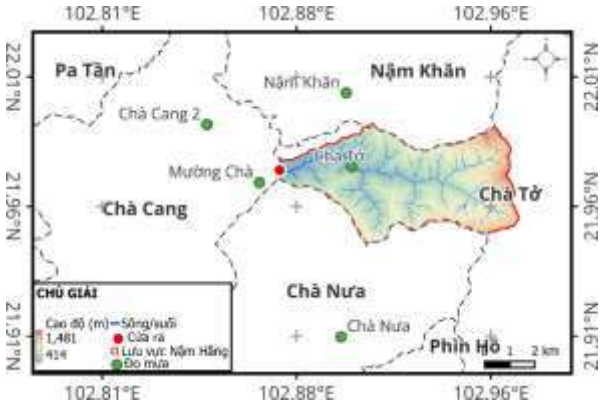
Phương pháp phân tích, thống kê: Nghiên cứu sử dụng phương pháp phân tích thống kê để xác định các đặc trưng theo lưu vực.



Hình 2: Quy trình nghiên cứu, đánh giá đặc điểm hình thành lũ quét

3. KẾT QUẢ, THẢO LUẬN

3.1. Kết quả thu thập vị trí, thời gian xảy ra lũ quét



Hình 3: Lưu vực suối Nậm Hằng và khu vực xảy ra lũ

Lưu vực suối Nậm Hằng chảy qua địa bàn xã Chà Tở có diện tích khoảng 30km² nằm lọt hoàn toàn trong xã Chà Tở, điểm cửa ra có tọa độ (21.9738467°, 102.8734094°) theo hệ tọa độ WGS 84 (EPSG:4326). Thời gian xảy ra lũ quét vào rạng sáng ngày 15/7/2023 quét qua trung tâm xã Chà Tở (gần phía cửa ra của lưu vực).



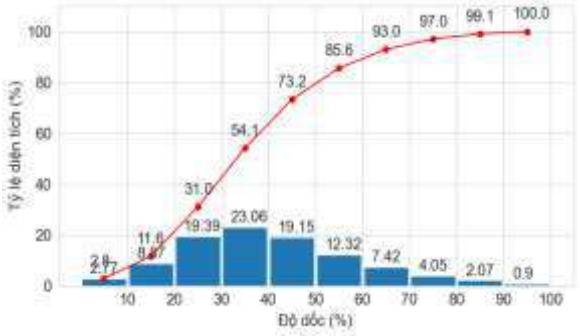
Hình 4: Vị trí xảy ra lũ quét

Bề rộng của lòng dẫn tại vị trí xảy ra lũ quét khoảng gần 25m (đoạn qua các ao cá – tràn bờ), bề rộng lòng suối là khoảng 8m, mực nước vượt bờ tràn vào các ao cá khoảng 20-30cm và có chiều sâu bình quân ở lòng suối khoảng 2,0m

3.2. Các yếu tố địa không gian

(1) Độ dốc lưu vực

Địa hình đồi núi là một trong các yếu tố chính gây ra hiện tượng lũ quét mà nhân tố chính tác động đến là độ dốc, các lưu vực có độ dốc lớn làm giảm thời gian tập trung dòng chảy, tăng lưu lượng đỉnh lũ, độ dốc bình quân ở trên lưu vực Nậm Hằng là 40,75%, phổ biến ở từ 30÷40%, trong đó, từ 30÷70% chiếm tới 62% (là nhóm có độ dốc cao), trên 70% chiếm 7% (nhóm ở độ dốc đặc biệt cao).

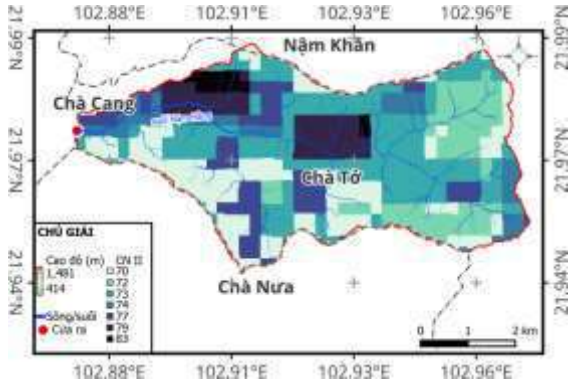


Hình 5: Phân bố độ dốc lưu vực suối Nậm Hằng

(2) Chỉ số CN

Chỉ số Curver Number (CN) là chỉ số kết hợp giữa loại đất và sử thảm phủ trên lưu vực, chỉ số CN càng thấp thể hiện khả năng hấp thụ mưa lớn, tiềm năng trữ nước của lưu vực lớn và ngược lại. Trên lưu vực suối Nậm Hằng, chỉ số CN bình quân (lưu vực ở điều kiện độ ẩm

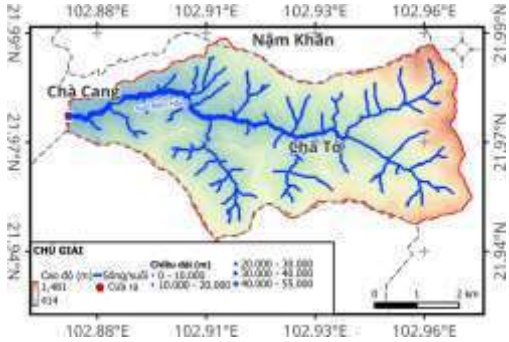
kỳ trước trung bình) là 73,5 (đối với lưu vực có thảm phủ rất tốt, chỉ số này thường dưới 70 và đối với khu vực đô thị, chỉ số này thường trên 75).



Hình 6: Bản đồ CN II lưu vực

(3) Chiều dài dòng chảy

Chiều dài dòng chảy được xét là tổng chiều dài tích lũy của các nhánh sông đổ ra điểm cửa ra của lưu vực. Lưu vực Nậm Hằng có chiều dài dòng chảy là 55km.



Hình 7: Chiều dài dòng chảy

3.3. Các yếu tố thủy văn

(4) Số liệu quan trắc

Lưu vực suối Nậm Hằng và phụ cận có 5 trạm đo mưa giờ bao gồm: Chà Cang 2, Mường Chà, Chà Nưa, Chà Tở và Nậm Khăn, bắt đầu quan trắc từ 01/2021 trở lại đây, ngoài ra, cách thượng nguồn lưu vực 12km có trạm đo mưa Mường Tùng (thuộc huyện Mường Chà). Số liệu thống kê quan trắc lượng mưa tại vị trí các trạm đến thời điểm xảy ra lũ quét được thống kê ở bảng sau:

Bảng 1: Số liệu quan trắc mưa giờ trận mưa ngày 15/7/2023 tại một số trạm lân cận vị trí xảy ra lũ quét

Đơn vị: mm

Thời gian	Chà Cang 2	Chà Nưa	Chà Tở	Mường Chà	Nậm Khăn	Mường Tùng
Mưa tích lũy 1 ngày	0,4	0,0	3,8	5,4	13,6	11,6
Mưa tích lũy 2 ngày	1,4	0,2	3,8	5,4	15,8	13,8
Mưa tích lũy 3 ngày	14,6	2,8	47,6	44,8	27,2	26,6
Mưa tích lũy 4 ngày	39,0	28,0	51,4	56,2	37,6	36,6
Mưa tích lũy 5 ngày	47,2	28,0	67,0	73,6	50,4	40,8
15/07/2023 03:00	6,2	0,2	12,8	2,6	8,0	0,2
15/07/2023 04:00	32,0	64,4	52,6	56,6	26,0	9,4
15/07/2023 05:00	8,6	8,8	9,2	10,0	11,2	20,6
15/07/2023 06:00	4,4	1,2	4,8	4,2	4,4	8,2
15/07/2023 07:00	5,8	4,0	5,4	5,0	5,2	5,2
15/07/2023 08:00	4,6	3,8	4,8	3,6	4,2	6,2
15/07/2023 09:00	2,4	3,4	3,4	3,4	2,6	0,8
15/07/2023 10:00	1,2	0,4	0,6	0,8	0,4	0,0

Lượng mưa tích lũy là lượng mưa tính đến thời điểm 03:00 ngày 15/7/2023

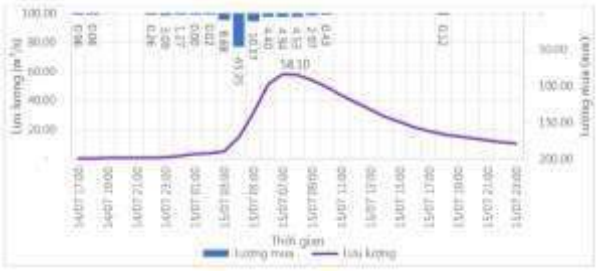
Có thể nhận thấy rõ việc xuất hiện lượng mưa đột biến vào thời điểm 04 giờ sáng ngày 15/7 là nguyên nhân chính gây ra trận lũ này. Trạng thái độ ẩm kỳ trước của lưu vực được xác định căn cứ trên lượng mưa tích lũy 5 ngày trước khi trận mưa xảy ra.

Theo số liệu thống kê, lượng mưa tích lũy của 5 trạm thuộc lưu vực suối Nậm Hằng và phụ cận đạt mức bình quân là 51,2mm. Theo đó, với lượng mưa tích lũy trong 5 ngày đạt từ 53,34mm trở lên thì độ ẩm kỳ trước của lưu vực sẽ đạt trạng thái điều kiện ướt [3]. Như

vậy, về cơ bản bề mặt lưu vực suối Nậm Hằng đã gần đạt đến trạng thái điều kiện ướt, trạng thái này thể hiện sự hấp thụ lượng mưa của bề mặt lưu vực giảm và tăng khả năng tập trung dòng chảy mặt, tạo thành dòng chảy lũ.

(5) Kết quả mô phỏng thủy văn trận lũ

Để xác định được lưu lượng tại cửa ra lưu vực suối Nậm Hằng, nghiên cứu sử dụng phương pháp SCS-CN để xác định. Do trên lưu vực và phụ cận không có trạm quan trắc mực nước/lưu lượng, hệ số điều chỉnh K_t và K_p sẽ được áp dụng tương tự lưu vực Nà Hừ (thuộc xã Bum Nưa, huyện Mường Tè, tỉnh Lai Châu). Trong đó, K_t là hệ số điều chỉnh về thời gian tập trung dòng chảy và K_p là hệ số điều chỉnh về lưu lượng đỉnh lũ. Lượng mưa được nội suy theo raster và tổng hợp bình quân lưu vực suối Nậm Hằng theo giờ. Kết quả tính toán lưu lượng trận lũ rạng sáng ngày 15/7 tại cửa ra lưu vực thể hiện như Hình 8.



Hình 8: Kết quả mô phỏng thủy văn trận lũ ngày 15/7/2023 trên suối Nậm Hằng

3.4. Các chỉ số nguy cơ lũ quét có liên quan đến thủy văn

(6) Chỉ số mô đun đỉnh lũ

Chỉ số mô-đun đỉnh lũ là một chỉ số nhằm xác định một trận lũ là lũ quét hay lũ thường. Năm 2009, sau khi đánh giá đặc trưng của các trận lũ quét xảy ra ở châu Âu, Gaume và cộng sự đã tìm ra rằng mô-đun đỉnh lũ của các trận lũ quét từ 0,5 – 40 m³/(s.km²) [4].

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

Trong đó: Q là lưu lượng đỉnh lũ (m³/s) và A là diện tích lưu vực thượng nguồn (km²).

Năm 2014, Braud đã tiếp tục nghiên cứu và chỉ ra sự phân định về lũ quét với lũ thường [5] bằng một khái niệm về lũ quét được xác định như sau: Lũ quét là một sự gia tăng về thuỷ văn trong thời đoạn rất ngắn (vài giờ hoặc ít hơn với lưu vực từ 1 – 100km² và dưới 24 giờ đối với lưu vực có diện tích khoảng 1.000km²), để được coi là lũ quét, các trận lũ phải có mô-đun đỉnh lũ lớn hơn 0,5 m³/(s.km²).

Kết quả mô phỏng dòng chảy lũ ở hình 8 cho thấy, mô đun đỉnh lũ của lưu vực suối Nậm Hằng I = Q/A = 58,10/30 = 1,93 m³/(s.km²) là một giá trị khá cao và quy mô trận lũ được địa phương đánh giá là tương đối lớn.

(7) Lưu lượng tràn bờ

Trong trường hợp không có số liệu khảo sát về mặt cắt, lưu lượng tràn bờ có thể xác định theo công thức thực nghiệm [6]:

$$Q_{bf} = kA^{\alpha}S^{\beta}$$

Trong đó: A là diện tích lưu vực (đơn vị là km²); S là độ dốc bình quân lưu vực (không thứ nguyên) và k, α, β là hệ số. Trong một nghiên cứu mới của Trịnh Thu Phương [7], hệ số cho khu vực miền núi phía Bắc được xác định lần lượt là k=15, α=0,076 và β=0,33. Kết quả tính toán cho lưu vực Nậm Hằng với A=30km²; S=0,4075 thu được Q_{bf}=14,44m³/s.

3.5. Thảo luận

Chỉ số 0,5 m³/(s.km²) là một chỉ số khá an toàn và giá trị thực tế để có thể được xem là lũ quét có thể phải là một giá trị lớn hơn rất nhiều với giá trị này. Qua quá trình nghiên cứu, mức 0,5 m³/(s.km²) chỉ có thể là ở mức lũ nhanh ở các khu vực miền núi.

Với công thức tràn bờ theo kinh nghiệm, lưu lượng tràn bờ của lưu vực Nậm Hằng được xác định bằng 14,44m³/s, kết quả tính toán là 58,1³/s là một kết quả lớn và chứng tỏ đây là một trận lũ quét.

Như vậy, có thể sơ bộ xác định được diện tích mặt cắt lũ tràn qua khoảng hơn 20m². Với lưu lượng 14,44m³/s, vận tốc mặt cắt chỉ khoảng 0,7m/s là quá nhỏ cho một trận lũ quét (theo một số nghiên cứu [8] [9], vận tốc bình quân dòng chảy trên sông suối ở một số lưu vực nhỏ khoảng 0,6÷1,8 m/s). Nghiên cứu này đưa ra kết quả tính toán vận tốc khoảng từ 2,5÷ 3m/s cho trận lũ ngày 15/7.

Theo nghiên cứu của Darren Lumbroso [10],

vận tốc bình quân của các trận lũ quét hiếm khi vượt mức 3m/s cho thấy, kết quả mô phỏng phù hợp với trận lũ đã diễn ra. Tuy nhiên, với kết quả này, chỉ số mô-đun đỉnh lũ và lưu lượng tràn bờ là khá thấp. Mặc dù vậy, khái niệm "flash flood" của các nghiên cứu trên thế giới không có sự phân định rõ ràng và hướng tới một trận lũ lên nhanh, xuống nhanh ở khu vực miền núi, khác với cách hiểu về lũ quét dựa trên sự tàn phá khốc liệt của các trận lũ đã và đang xảy ra ở Việt Nam.

4. KẾT LUẬN

Quá trình phân tích một số yếu tố địa không gian và thủy văn trên lưu vực suối Nậm Hằng cho thấy, đây là một lưu vực có độ dốc tương đối lớn, đặc trưng cho khu vực miền núi phía Bắc. Lưu vực có diện tích khoảng 30km², thời gian đạt đỉnh lũ khoảng 3 giờ.

Nghiên cứu đã tính toán cho 02 chỉ số nguy cơ lũ quét bao gồm chỉ số mô-đun đỉnh lũ theo Gaume [4] và chỉ số lưu lượng tràn bờ theo Carpenter [6]. Cả hai kết quả đều cho thấy trận lũ ngày 15/7 tương ứng với quy mô lũ quét. Mặc dù vậy, các chỉ số này ở mức an toàn khá cao và cần có những điều chỉnh phù hợp cho khu vực miền núi phía Bắc nhằm giảm tình trạng cảnh báo khống khi áp dụng tính toán.

Lời cảm ơn: Bài báo này là một phần của Đề tài 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)"* thuộc Kênh Phòng thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển 2023. Chúng tôi xin chân thành cảm ơn Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam và Phòng thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển đã cấp kinh phí tài trợ cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] "Điện Biên," Wikipedia, [Online]. Available: https://vi.wikipedia.org/wiki/% C4 %90i%E1%BB%87n_Bi%C3%AAn. [Accessed 15 07 2023].

[2] Lê Văn Thìn, *Kết quả điều tra tình hình lũ quét trong 10 năm đến tháng 8/2023 tại huyện Nậm Pồ, tỉnh Điện Biên,* Điện Biên, 2023.

[3] Ven Techow, David R. Maidment and Larry W.Mays, "Nước trên mặt đất," in *Thủy văn ứng dụng*, Hà Nội, Nhà xuất bản giáo dục, 1994, p. 130.

[4] Eric Gaume, Valerie Bain, Pietro Bernardara and et al, "A compilation of data on European flash floods," *Journal of Hydrology*, vol. 367, no. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.12.028, 2009, pp. 70-78, 2009.

[5] I. Braud, P.-A. Ayral, C. Bouvier and et al, "Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash flood understanding," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, no. doi:10.5194/hess-18-3733-2014, pp. 3733-3761, 2014.

[6] T.M. Carpenter, J.A. Sperfslage, K.P. Georgakakos, T. Sweeney and D.L. Fread, "National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems," *Journal of Hydrology*, vol. 224, no. 1-2, pp. 21-44, 1999.

[7] Trinh Thu Phuong, Tran Tuyet Mai, Nguyen Thi Nhu Quynh, Nguyen Tien Kien and Luong Huu Dung, "Exploiting SEAFFGS to determine threshold runoff and bankfull discharge - pilot application for Quang Nam province," *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, vol. 12, pp. 25-36, 2022.

[8] H Takagi, T T Anh, L T Anh, N D Thao, T Takabatake and R Nakamura, "Mechanisms of Rapid Flow caused by Tidal-Fluvial Flow Interaction in Inland Waterways of the Mekong Delta," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 167, p. 012001, 2018.

[9] Anette Eltner, Hannes Sardemann and Jens Grundmann, "Flow velocity and discharge measurement in rivers using terrestrial and UAV imagery," *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019.

[10] 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.

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

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

Lê Văn Thìn
Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia về Động lực học sông biển

Tóm tắt: *Phương pháp SCS-CN là phương pháp tính tổn thất dòng chảy từ một trận mưa nhằm xác định dòng chảy cho một lưu vực sông. Trong đó, chỉ số đường cong dòng chảy (Curve Number – CN) và hệ số tổn thất ban đầu λ là một trong những chỉ số quan trọng và đặc trưng của mỗi lưu vực sông. Hiện nay, bảng tra đường cong CN do Cục bảo tồn tài nguyên thiên nhiên Hoa Kỳ (NRCS) được xây dựng cho λ = 0,2 dựa trên số liệu thực nghiệm tại các lưu vực đầu nguồn của Hoa Kỳ và chưa có sự điều chỉnh cho các lưu vực sông khác, điều này dẫn đến một số đặc điểm chưa phù hợp trong việc áp dụng phương pháp SCS-CN tại Việt Nam. Nghiên cứu này trình bày phương pháp chung để điều chỉnh hệ số tổn thất ban đầu dựa trên tài liệu khí tượng thủy văn của lưu vực và xây dựng đường quá trình đơn vị cho lưu vực suối Bắc Cuông, huyện Bảo Yên, tỉnh Lào Cai.*
Từ khóa: *Phương pháp SCS-CN, chỉ số tổn thất ban đầu, suối Bắc Cuông.*

Summary: *The SCS-CN method is widely used to estimate runoff from a rainfall event for determining streamflow in a watershed. Among its parameters, the Curve Number (CN) and the initial abstraction coefficient (λ) are crucial and distinctive characteristics of each watershed. Currently, the CN curve table developed by the Natural Resources Conservation Service (NRCS) is based on λ = 0.2 and experimental data from headwater watersheds in the United States. However, this table lacks adjustments for other watersheds, leading to inconsistencies in applying the SCS-CN method in Vietnam. This study presents a general approach for adjusting the initial abstraction based on meteorological and hydrological data and building unit hydrograph for the Bac Cuong river basin, Bao Yen district, Lao Cai province.*
Keywords: *SCS-CN method, Initial Abstraction Rate, Bac Cuong river.*

1. GIỚI THIỆU

Các phương pháp tính toán mưa – dòng chảy là nguyên tắc cơ bản trong tính toán thủy văn nhằm xác định các tham số dòng chảy như lưu lượng đỉnh lũ, tổng lượng đỉnh lũ, thời gian tập trung dòng chảy lũ… từ lượng mưa. SCS-CN là một trong những phương pháp nổi bật được đưa ra vào năm 1954 dựa trên sự kết hợp của kết quả nghiên cứu từ Mockus [1] và Andrews [2] với tài liệu quan trắc mưa, tổn thất, thấm của các lưu vực Grand (Neosho), Arkansas, Kansas, Missouri, Oklahoma, Texas và Louisiana, được Bộ Nông nghiệp Hoa Kỳ xuất bản vào năm 1956. Từ đó, phương pháp này được áp dụng ở nhiều nơi trên toàn thế giới, đặc biệt, nguyên tắc tính toán tổn thất mưa của lưu vực đã được tích hợp sử dụng trong nhiều mô hình thủy văn nổi tiếng như SWAT, HEC-HMS, TR-55, WEPP…

Mặc dù rất phổ biến, phương pháp này chỉ đưa ra bảng tra hệ số Curve Numbers (CN) trong điều kiện hệ số tổn thất ban đầu λ = 0,2, tuy đã có nhiều nghiên cứu khác cho ra kết quả trong khoảng từ 0÷0,3 [3] [4] và khuyến nghị sử dụng 0,05 thay thế [3], cho đến nay (năm 2024), Cục bảo tồn tài nguyên thiên nhiên Hoa Kỳ (NRCS) chưa đưa ra quyết định nào về việc giữ hay thay đổi giá trị của λ nhằm xây dựng/phát triển bộ số CN mới một cách phù

Ngày nhận bài: 23/4/2024
Ngày thông qua phản biện: 28/5/2024
Ngày duyệt đăng: 05/6/2024

hợp và hiệu quả dựa trên số liệu về quan trắc thấm của cho các trường hợp tổn thất khác. Nghiên cứu này trình bày một phương pháp xác định và điều chỉnh các chỉ số của phương pháp SCS-CN dựa trên các tài liệu thực đo nhằm tăng cường độ tin cậy và phản ánh đúng hơn về kết quả mô phỏng dòng chảy lũ cho một lưu vực cụ thể.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Phương pháp SCS-CN

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

Thứ nhất: Tỷ lệ giữa dòng chảy mặt trực tiếp (P_e) và lượng dòng chảy tiềm năng ($P - I_a$) bằng với tỷ lệ giữa độ sâu thấm liên tục (F_a) và lượng nước giữ tiềm năng tối đa (S). Thể hiện bằng phương trình như sau:

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

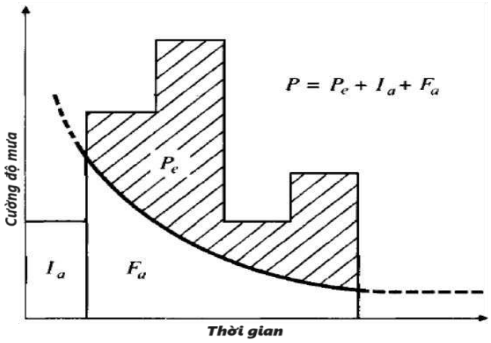
Thứ hai: Tổng lượng mưa tổn thất ban đầu (I_a – lượng tổn thất không sinh dòng chảy), độ sâu thấm liên tục (F_a) và dòng chảy mặt trực tiếp (P_e) bằng lượng mưa rơi xuống bề mặt. Thể hiện bằng phương trình như sau:

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

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

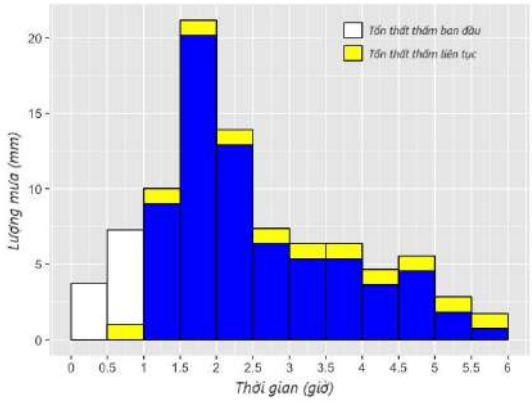
$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \qquad (2\text{-}3)$$

Phương trình (2-3) được gọi là phương trình cơ bản của phương pháp SCS-CN để tính độ sâu mưa hiệu dụng (hay dòng chảy trực tiếp) từ một trận mưa.



Hình 1: Các biến số của tổn thất dòng chảy trong phương pháp SCS:

I_a – Độ sâu tổn thất ban đầu;
P_e – Độ sâu mưa hiệu dụng;
F_a – Độ sâu thấm liên tục;
P – Tổng lượng mưa



Hình 2: Minh họa tổn thất thấm ban đầu (I_a) và tổn thất thấm liên tục (F_a)

Lượng tổn thất ban đầu I_a có mối quan hệ đến lượng giữ nước tiềm năng tối đa S thông qua biểu thức:

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

Với λ được gọi là hệ số tổn thất thấm ban đầu. Hình 2 minh họa tổn thất thấm ban đầu của một lưu vực là I_a = 10mm và tổn thất thấm liên tục là F_a = 2mm/giờ (giả định – trên thực tế, lượng tổn thất thấm liên tục giảm dần theo thời gian), như vậy, cường độ mưa trong giờ đầu là 4 + 7 = 11mm mới chỉ đủ cho tổn thất thấm ban đầu (10 mm) và một bước tổn thất thấm liên tục (1mm trong nửa giờ). Mỗi bước thời gian tiếp theo (nửa giờ), lượng mưa tiếp tục chịu tổn thất thấm liên tục (1mm/nửa giờ). Phần màu xanh được gọi là lượng mưa vượt mức (Rainfall excess) trong trận mưa. Lượng mưa này còn gọi là lượng mưa hiệu quả hay dòng chảy mặt, là tham số quan trọng trong việc hình thành dòng chảy lũ trên lưu vực.

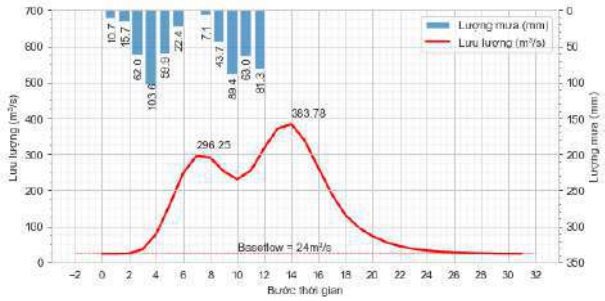
Thông số S của phương pháp SCS-CN phụ thuộc vào loại đất, loại hình sử dụng đất, điều kiện thủy văn và điều kiện độ ẩm kỳ trước (AMC). Tổn thất thấm ban đầu chỉ là ngắn hạn, sau đó nước sẽ được thấm theo thời gian. Tuy nhiên, đặc tính lưu vực, loại đất, thảm phủ là những định lượng khó xác định một cách chính xác, đặc biệt việc xây dựng đường cong CN là đại diện cho dữ liệu thực tế phủ khắp Hoa Kỳ.

Công thức (2-3) có thể viết lại thành:

$$P_e = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S} \quad (2\text{-}5)$$

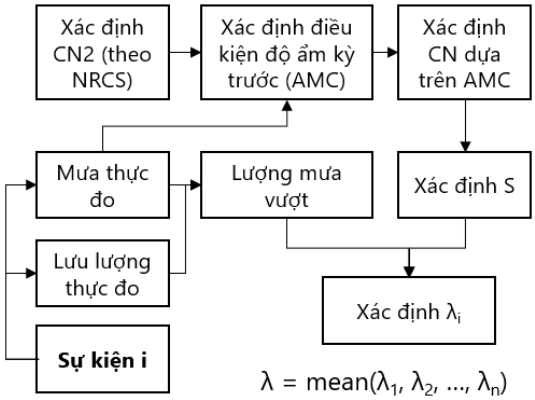
2.2 Xác định hệ số tổn thất ban đầu λ

Điểm đầu tiên bắt đầu đường quá trình của một trận lũ có thể dễ dàng phát hiện đối với các trận mưa lớn, do vậy, đó cũng là biểu thị quá trình mưa vượt tổn thất (lượng mưa vượt mức). Đồng nghĩa với thời điểm đó là P ≥ λS (với P là lượng mưa tích lũy tính từ đầu trận mưa) hay λ ≤ P/S. Tương ứng với mỗi trận mưa, cần xác định CN, S và từ đó xác định chỉ số λ. Giá trị trung bình của chuỗi các giá trị λ chính là giá trị cần tìm.



Hình 3: Dữ liệu của một trận lũ của một lưu vực

Như ở Hình 3, tại bước thời gian số 3 dòng chảy lũ bắt đầu xuất hiện (tổng lượng mưa ở bước thời gian 1 và bước thời gian 2 là 26,4mm). Ở đây, P vượt mức ghi nhận là 26,4mm. Mặc dù giá trị thực tế vượt ngưỡng có thể chỉ lớn hơn 26,4 không đáng kể, dữ liệu quan trắc mưa theo bước thời gian 1 giờ không đủ phát hiện ở mức chi tiết hơn. Tuy nhiên với số liệu quan trắc trong nhiều trận lũ, con số này sẽ biến động đáng kể và trung bình của các giá trị mưa vượt ngưỡng sẽ được xác định một cách tương đối phù hợp. Quy trình xác định hệ số tổn thất ban đầu λ có thể được xác định như sau:



Hình 4: Quy trình xác định λ của lưu vực

Theo hướng dẫn của NRCS, bảng tra CN từ nhóm đất thủy văn và điều kiện sử dụng đất là CN2 (theo điều kiện độ ẩm kỳ trước là AMCII), các điều kiện khác được quy đổi như sau:

Bảng 1: Xác định CN và S theo điều kiện độ ẩm AMC

Điều kiện độ ẩm AMC	Lượng mưa 5 ngày trước (mm)		CN quy đổi	S quy đổi
	Mùa kém sinh trưởng	Mùa sinh trưởng		
AMCI	< 12,7	< 35,56	$CN = \frac{4{,}2CN_2}{10 - 0{,}0568CN_2}$	$S = \frac{25400}{CN} - 254$
AMCII	12,7 ÷ 27,94	35,56 ÷ 53,34	$CN = CN_2$ (tra bảng)	
AMCIII	≥ 27,94	≥ 53,34	$CN = \frac{23CN_2}{10 + 0{,}13CN_2}$	

Từ tổng lượng mưa 5 ngày trước (tính đến thời điểm bắt đầu trận mưa đang xét) có thể xác định được điều kiện độ ẩm kỳ trước AMC và CN tương ứng, lượng mưa vượt trong quy trình xác định λ là lượng mưa lũy tích tính từ thời điểm bắt đầu mưa đến khi xuất hiện lưu lượng tăng trên sông/suối. Mỗi trận mưa sẽ xác định một λ, từ đó lấy giá trị trung bình để xác định λ đại diện cho lưu vực.

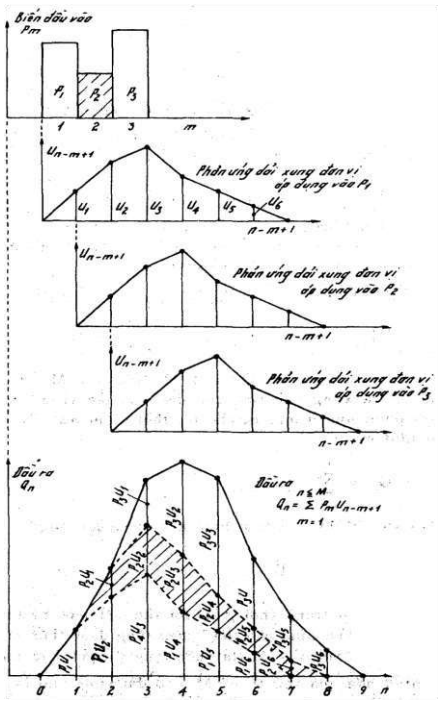
Việc phải tìm λ mang một ý nghĩa lớn bởi đó là tham số đại diện cho tổn thất ban đầu và là tham số quan trọng trong việc tính toán dòng chảy mặt, từ đó làm cơ sở tính toán lưu lượng dòng chảy lũ. Do hệ số tổn thất λ của một lưu vực được xem là không đổi, nên khi λ càng nhỏ thì tổn thất ban đầu càng nhỏ và ngược lại.

2.3 Xây dựng đường quá trình đơn vị

Vào đầu những năm 1930, L.K. Sherman [10] đã trình bày một lý thuyết về đường quá trình

thủy văn đơn vị với một giả định rằng lưu lượng tại bất kể thời điểm nào cũng đều tỷ lệ với lượng mưa hiệu quả thoát ra tại cửa ra của lưu vực, các yếu tố thời gian ảnh hưởng đến hình dạng của đường quá trình lũ là không đổi.

Điều này có nghĩa, cùng lượng mưa hiệu quả thì lưu lượng tại cửa ra có cùng một hình dạng. Đây còn gọi là nguyên tắc bất biến của đường quá trình đơn vị. Nguyên tắc thứ hai là nguyên tắc xếp chồng, có nghĩa là lượng mưa hiệu quả hình thành theo thời gian sẽ tạo thành lưu lượng dòng chảy theo thời gian riêng biệt, kết quả tổng hợp của lưu lượng dòng chảy theo từng bước thời gian sẽ là lưu lượng tại cửa ra của lưu vực.



Hình 5: Nguyên tắc xếp chồng đường quá trình lũ theo thời gian [11]

Lưu lượng dòng chảy trực tiếp được sinh ra bởi lượng mưa hiệu quả. Mỗi đơn vị mưa hiệu quả tương ứng với đường quá trình đơn vị của lưu vực. Tại một thời điểm n, lưu lượng dòng chảy trực tiếp Q_n với lượng mưa vượt P_m và đường quá trình đơn vị U được xác định bằng công thức (2-6):

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \le M} P_m U_{n-m+1} \qquad (2\text{-}6)$$

Để giải được U, ứng với mỗi Q_n và P_m, có thể giải được U tương ứng. Như vậy, sử dụng một trận lũ đã biết có thể khôi phục lại dòng chảy trực tiếp (sau khi đã bỏ qua dòng chảy cơ sở) và lượng mưa vượt có thể khôi phục lại U nhằm xác định đường quá trình lũ đơn vị. Một cách giải khác là sử dụng phép tính ma trận. Ta có:

$$[P][U] = [Q]$$
$$\rightarrow [U] = [Q][P]^T \qquad (2\text{-}7)$$

3. KẾT QUẢ, THẢO LUẬN

3.1 Số liệu sử dụng

Trong phần này, nghiên cứu sẽ trình bày phương pháp xác định chỉ số tổn thất ban đầu và xây dựng đường quá trình đơn vị cho lưu vực suối Bắc Cuông, huyện Bảo Yên, tỉnh Lào Cai trong việc áp dụng phương pháp SCS-CN để tính toán tổn thất. Nghiên cứu lựa chọn 16 trận lũ sinh ra bởi các trận mưa lớn từ năm 2020 trở lại đây.

Bảng 2: Số liệu và nguồn số liệu sử dụng

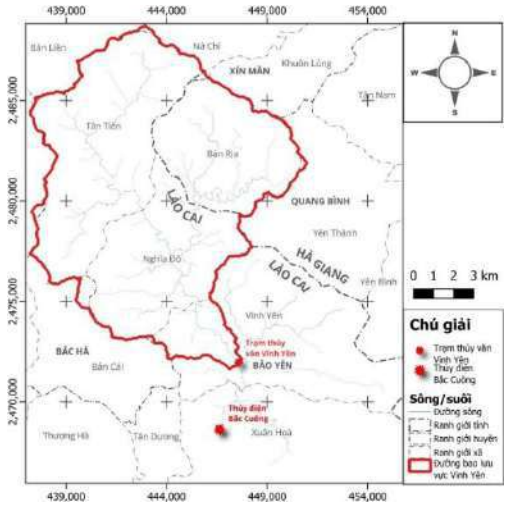
TT	Tên số liệu	Nguồn số liệu
1	Lưu lượng dòng chảy	Tại trạm thủy văn Vĩnh Yên, huyện Bảo Yên, tỉnh Lào Cai (01/01/2021 ÷ 31/12/2023) - Tổng cục Khí tượng Thủy văn
2	Lượng mưa tại khu vực Bảo Yên, tỉnh Lào Cai	- Nguồn dữ liệu Vrain, cung cấp miễn phí truy cập tại https://www.vrain.vn. Tài khoản: Laocai@vinarain; Mật khẩu: 123456 [6]. - Nguồn dữ liệu WeatherPlus, cung cấp miễn phí truy cập tại đường link: http://laocai.weatherplus.vn/. Tài khoản: pcttlaocai; Mật khẩu: laocai2021 [6].
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 [7].
4	Thảm phủ 2020 Việt	Bản đồ thảm phủ được giải đoán từ ảnh Sentinel-2 ở độ phân giải 10m được

TT	Tên số liệu	Nguồn số liệu
	Nam	cung cấp bởi JAXA/ALOS [8].

Chi tiết quy đổi chỉ số CN từ nhóm đất thủy văn và thảm phủ theo NRCS được thể hiện ở bảng sau:

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

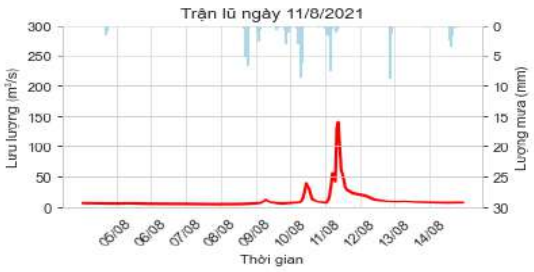
Mã hiệu trong dữ liệu	Mô tả	Chỉ số CN theo nhóm đất thủy văn				Tham khảo
		A	B	C	D	
#1: Water	Mặt nước	99	99	99	99	[9]
#2: Urban/Built-up	Khu vực đô thị/xây dựng	89	92	94	94	[9]
#3: Rice	Trồng lúa	61	75	83	87	[10]
#4: Other Crops	Các loại cây trồng khác	67	78	85	89	[11]
#5: Grass/Shrub	Cỏ/cây bụi	30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



Hình 6: Lưu vực suối Bắc Cuông (cửa ra tại trạm thủy văn Vĩnh Yên)

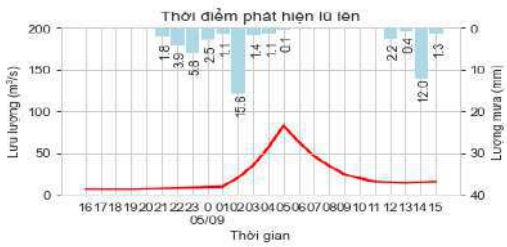
Bằng phương pháp chập lớp bản đồ trên GIS của hai loại bản đồ nhóm đất thủy văn và bản đồ thảm phủ, sau đó tổng hợp giá trị bình quân cho lưu vực suối Bắc Cuông, huyện Bảo Yên, nghiên cứu đã xác định được hệ số CN2 theo NRCS của lưu vực là 75,8.

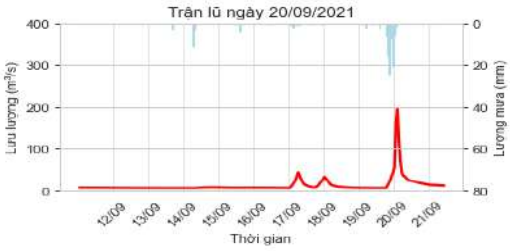
Để xác định lượng mưa theo thời gian của lưu vực, nghiên cứu sử dụng phương pháp nội suy các điểm mưa theo thời gian (thành raster) và tổng hợp theo lưu vực có cửa ra là trạm thủy văn Vĩnh Yên. Số liệu mưa và lưu lượng của một số trận lũ được tổng hợp cho lưu vực nghiên cứu được thể hiện trong các hình dưới đây (bên trái là toàn cảnh trận lũ, bên phải là thời điểm phát hiện lũ lên).






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

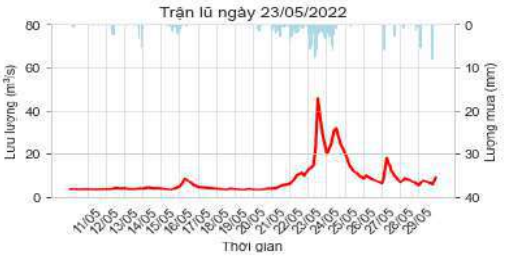

Thời điểm phát hiện lũ lên
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian

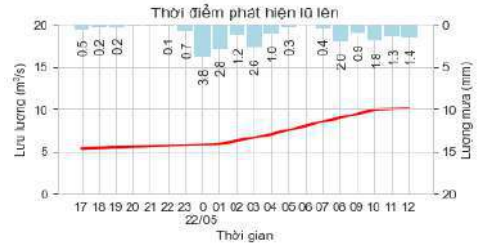

Trận lũ ngày 20/09/2021
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


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)
Thời gian


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


Trận lũ ngày 22/07/2022
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 21/08/2022
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 04/09/2022
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 02/10/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian

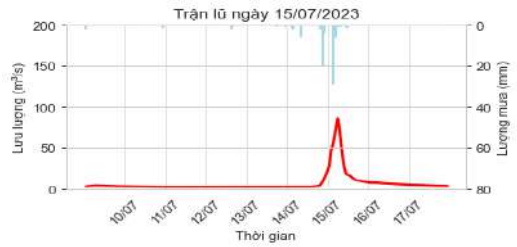

Thời điểm phát hiện lũ lên
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Trận lũ ngày 09/10/2022
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian

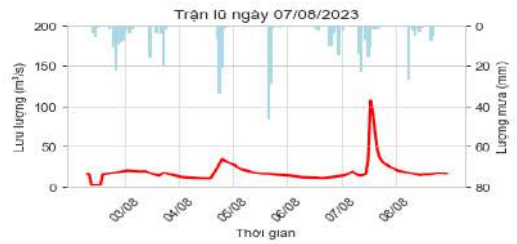

Thời điểm phát hiện lũ lên
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


Trận lũ ngày 24/06/2023
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 15/07/2023
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 07/08/2023
Lưu lượng (m³/s)
Lượng mưa (mm)
Thời gian


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





3.2 Kết quả xác định hệ số tổn thất ban đầu dựa trên dữ liệu quan trắc

Mỗi sự kiện lũ cần xác định thời điểm bắt đầu tính toán, sau đó xác định trạng thái độ ẩm kỳ trước lưu vực AMC dựa vào lượng mưa tích lũy 5 ngày trước (120 giờ trước thời điểm bắt đầu trận lũ). Các hệ số CN và S được xác định tương ứng với mỗi trạng thái AMC. Chi tiết thể hiện như sau:

Bảng 4: Tổng hợp các tham số trận lũ phục vụ tính hệ số tổn thất ban đầu 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	52,133	233,212	0,059
2	04/09/2021 20:00	42,523	1,100	II	72,800	94,901	0,012
3	19/09/2021 19:00	22,660	5,550	I	52,133	233,212	0,024
4	14/10/2021 15:00	57,080	11,170	III	86,025	41,261	0,271
5	21/05/2022 21:00	22,950	8,591	I	52,133	233,212	0,037
6	05/06/2022 22:00	7,100	18,499	I	52,133	233,212	0,079
7	13/06/2022 23:00	14,600	6,560	I	52,133	233,212	0,028
8	21/07/2022 21:00	87,230	9,938	III	86,025	41,261	0,241
9	21/08/2022 07:00	29,310	16,019	I	52,133	233,212	0,069
10	04/09/2022 02:00	23,086	8,733	I	52,133	233,212	0,037
11	01/10/2022 21:00	43,047	4,260	II	72,800	94,901	0,045
12	09/10/2022 07:00	19,200	14,630	I	52,133	233,212	0,063
13	23/06/2023 07:00	8,490	19,593	I	52,133	233,212	0,084
14	14/07/2023 19:00	13,268	21,120	I	52,133	233,212	0,091
15	07/08/2023 10:00	338,000	6,600	III	86,025	41,261	0,160
16	06/09/2023 23:00	29,358	32,080	I	52,133	233,212	0,138

Từ bảng đánh giá cho thấy, hệ số λ của lưu vực suối Bắc Cuông dao động từ 0,014÷0,317 với bình quân toàn chuỗi số liệu là 0,1. Hệ số λ ≈ 0,1 cũng chưa thấp như với nghiên cứu của Hawkins [3] và Noori [13] đề xuất là 0,05, tuy nhiên, mỗi lưu vực khác nhau có những phản ứng khác nhau và xu hướng cho thấy giá trị λ = 0,2 là quá lớn đối với lưu vực suối Bắc Cuông. Do đó, khi xác định dòng chảy mặt ở trên lưu vực này cần có sự điều chỉnh phù hợp

3.3 Kết quả xây dựng đường quá trình đơn vị và mô phỏng thủy văn

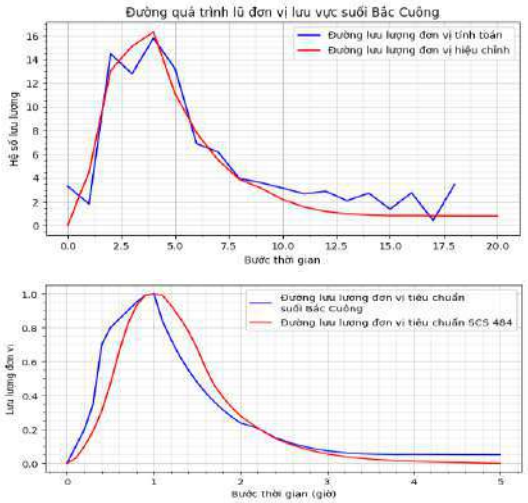
Nghiên cứu sử dụng trận mưa – lũ ngày 21/8/2022 để khôi phục, xây dựng đường quá trình đơn vị. Đây là trận mưa đơn đồng thời có thời gian mưa vượt ngưỡng là 2 giờ.

Bảng 5: Số liệu sử dụng khôi phục đường quá trình lũ đơn vị

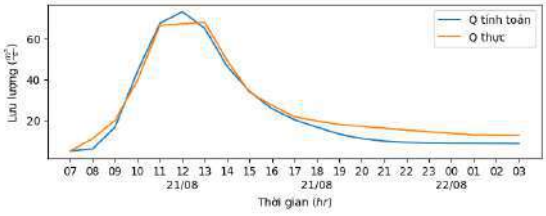
Ngày	Giờ	P (mm)	Pe (mm)	Q (m³/s)	Qr (m³/s)
2022-08-21	7	0.03	-	4.86	-
	8	16.02	0.22	10.94	6.08
	9	15.20	1.96	19.84	14.98
	10	9.99	2.23	39.53	34.67
	11			66.20	61.34
	12			66.98	62.12
	13			67.77	62.91
	14			49.09	44.23
	15			33.47	28.61
	16			27.17	22.32
	17			21.56	16.70
	18			19.63	14.77
	19			17.79	12.93
	20			16.88	12.02

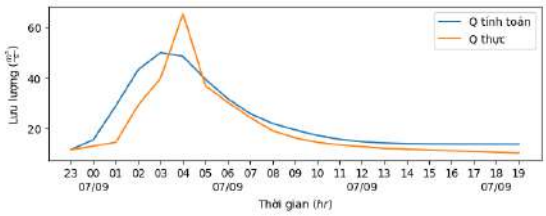
Ngày	Giờ	P (mm)	Pe (mm)	Q (m^3/s)	Qr (m^3/s)
	21			15.99	11.13
	22			15.12	10.27
	23			14.29	9.43
2022-08-22	0			13.47	8.62
	1			12.69	7.83
	2			12.63	7.77
	3			12.58	7.72

Cột P thể hiện lượng mưa thực tế (kết quả nội suy tại các trạm thành raster và tổng hợp cho lưu vực), cột Pe là lượng mưa hiệu quả (tạo dòng chảy mặt), cột Q là lưu lượng thực đo trên sông và cột Qr là lưu lượng được sinh ra bởi dòng chảy mặt (sau khi trừ đi lưu lượng cơ sở). Như vậy, 2 chuỗi số liệu cần sử dụng là lượng mưa hiệu quả Pe và lưu lượng Qr. Sử dụng công thức (2-7) cho phép tính ma trận kết hợp với thư viện Numpy trong python để thực hiện phép tính. Ta được kết quả thể hiện ở hình 7. Như vậy, đường quá trình lũ trên là đường quá trình thể hiện khi lưu vực vượt 1mm mưa hiệu quả sẽ sinh ra đường quá trình lưu lượng tương ứng.



Hình 7: Kết quả xây dựng đường quá trình lưu lượng đơn vị lưu vực suối Bắc Cuông





Hình 8: Kết quả mô phỏng lũ cho trận lũ ngày 21/8/2022 và trận lũ 07/9/2023

Kết quả hiệu chỉnh (trận lũ ngày 21/8/2022) cho hệ số NASH lên tới 0,95 (do bộ thông số lũ ngày 21/8/2022 được sử dụng để tính toán ngược lại đường quá trình đơn vị). Trong khi đó, kết quả tính toán hệ số NASH cho trận lũ ngày 7/9/2023 là 0,76. 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 suối Bắc Cuông, huyện Bảo Yên, tỉnh Lào Cai.

Việc thay đổi hệ số tổn thất ban đầu sẽ làm thay đổi hoàn toàn cách mà lưu vực phản ứng với lượng mưa theo thời gian, đặc biệt là việc xác định dòng chảy mặt (lượng mưa hiệu quả) để tính toán dòng chảy trên sông.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã trình bày một phương pháp điều chỉnh hệ số tổn thất ban đầu trong phương pháp SCS-CN dựa trên số liệu quan trắc thực tế (mưa – lưu lượng) của một lưu vực nhằm phù hợp hơn với điều kiện của từng lưu vực, đảm bảo đặc tính tổn thất ban đầu của lưu vực và hướng tới sự điều chỉnh phù hợp trong tính toán thủy văn dựa vào phương pháp SCS-CN.

Kết quả mô phỏng cho thấy hệ số tổn thất ban đầu λ của lưu vực suối Bắc Cuông là 0,1, nhỏ hơn so với ngưỡng 0,2 do NRCS khuyến nghị và cần có sự điều chỉnh lại để phù hợp tổn thất thực tế của mỗi lưu vực. Thay đổi này sẽ ảnh hưởng trực tiếp tới tham số dòng chảy mặt và dòng chảy hình thành trên sông/suối.

Kết quả nghiên cứu có thể hữu ích đối với các nghiên cứu áp dụng phương pháp SCS-CN trong tính toán mưa – dòng chảy cho các lưu vực khác nói chung và lưu vực suối Bắc Cuông nói riêng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Mockus, V., "Estimation of total and peak rates of surface runoff for individual storms," U.S. Department of Ag- riculture, Washington, D.C., 1949.

[2] Andrews, R. G., "The use of relative infiltration indices in computing runoff," Soil Conservation Service, Fort Worth, Texas, 1954.

[3] Hawkins, Richard H., "A comparison of predicted and observed runoff curve numbers," in *Symposium Proceedings, Water Today and Tomorrow*, Arizona, 1984.

[4] Bosznay, Miklós, "Generalization of SCS Curve Number Method," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 115, no. 1, p. 139–144, 1989.

[5] Sherman, L.K., "Streamflow from rainfall by the," *Engineering News Record*, vol. 108, pp. 501-505, 1932.

[6] 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.

[7] 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. [Online]. Available: https://baolaocai.vn/pho-bien-rong-rai-phan-mem-canh-bao-som-thien-tai-post370415.html. [Accessed 19 04 2024].

[8] ORNL DAAC, "Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling," 11 05 2020. [Online]. Available: https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsviewer.pl?ds_id=1566. [Accessed 19 04 2023].

[9] ALOS, "High-Resolution Land-Use and Land-Cover Map of Vietnam for 2020 (Released in September 2023 / Version 23.09)," 16 02 2024. [Online]. Available: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/lulc/lulc_vnm_v2309_e.htm. [Accessed 19 04 2024].

[10] 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.

[11] 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.

[12] HEC, "Creating a Curve Number Grid and Computing Subbasin Average Curve Number Values," Hydrologic Engineering Center, 22 05 2023. [Online]. Available: 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. [Accessed 19 04 2024].

[13] NRCS, "Part 630 Hydrology," in *Chapter 9. Hydrologic Soil-Cover Complexes*, Natural Resources Conservation Service, 2004, pp. 9-3.

[14] 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.

[15] Ven Te Chow, David R. Maidment and Larry W. Mays, Thủy văn ứng dụng (bản dịch bởi Đỗ Hữu Thành), Hà Nội: Nhà xuất bản giáo dục, 1994.

CHARACTERIZING CROSS-SECTIONAL SHAPE INDICES FOR HYDRAULIC ESTIMATION IN SMALL MOUNTAINOUS STREAMS: A CASE STUDY IN NORTHERN VIETNAM

Thin Van Le

Duong Cao Phan

Hoa Dinh Tran

Giap Dang Nguyen

Sustainable Water Resources Management (2026) 12:3
https://doi.org/10.1007/s40899-025-01313-5

ORIGINAL ARTICLE

Characterizing cross-sectional shape indices for hydraulic estimation in small mountainous streams: a case study in Northern Vietnam

Thin Van Le[1] · Duong Cao Phan[2] · Hoa Dinh Tran[1] · Giap Dang Nguyen[1]

Received: 19 April 2025 / Accepted: 6 November 2025
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Switzerland AG 2025

Abstract

The morphology of stream cross-sections in mountainous regions significantly influences hydraulic processes, yet in Northern Vietnam, data scarcity hinders flood risk assessment. This study analyzed 132 cross-sections from eight small mountainous streams to quantify two key hydraulic parameters: the cross-section shape characteristic index (r) and the bankfull width-to-depth ratio (k). Using standardized cross-section modeling and statistical methods, we found that the characteristic shape index $r = 2.0$ and bankfull width-to-depth ratio $k = 8.5$ for the Northern Vietnamese mountainous streams. These values are consistent with global studies while reflecting unique regional geomorphological characteristics. The identified parameters enable the estimation of critical hydraulic variables (e.g., water depth, velocity, and flow width) in ungauged locations when discharge data is known, thereby supporting flood assessment in data-limited environments. Our findings provide practical framework for hydrologists and water resource engineers working in similar mountainous regions, contributing to improved understanding of stream hydraulics and more effective flood risk management in Northern Vietnam.

Keywords Cross-section characteristics · Bankfull geometry · Hydraulic estimation · Small streams · Mountainous hydrology · Vietnam

Introduction

Stream channel morphology is fundamentally shaped by the complex interplay between watershed characteristics and hydrological processes. In headwater systems of small watersheds – specifically streams with Strahler orders 1–3 (Strahler 1957; Vannote et al. 1980) – the channel formation occurs predominantly under natural conditions with minimal anthropogenic influence, resulting from the continuous processes of erosion and deposition. The Strahler stream order classification system, illustrated in Fig. 1, provides a quantitative framework for analyzing drainage network structure in watershed studies. These small streams represent the initial conduits in river networks and demonstrate distinct hydraulic characteristics that reflect their surrounding landscape.

Research across diverse geographical settings has demonstrated that bankfull width and depth have a strong correlation with upstream drainage area (Williams 1978; Trampush et al. 2014; Wilkerson et al. 2014). This relationship suggests that channel dimensions within specific watersheds often share common morphological characteristics due to similarities in topographic features, geological composition, and climatic patterns. This premise aligns with Dingman's proposition (Dingman 2007) that natural stream cross-sections across a region can be generalized to standard cross-sectional forms displaying hydraulic similarity – a concept particularly valuable for hydraulic parameter estimation.

In hydraulic modeling, the relationship between flow depth and wetted cross-sectional area serves as a foundation for characterizing cross-sectional shapes (Chow 1959). These relationships enable engineers and hydrologists to generalize channel geometry across stream networks, thereby facilitating analysis in locations where direct measurements are either unavailable or impractical to obtain.

✉ Thin Van Le
levanthin@gmail.com

[1] Vietnam Academy for Water Resources, Dong Da, Hanoi, Vietnam

[2] Ireland's Centre for AI, School of Computer Science, University College Dublin, Dublin 4, D02 V2N9, Belfield, Ireland

Published online: 02 December 2025

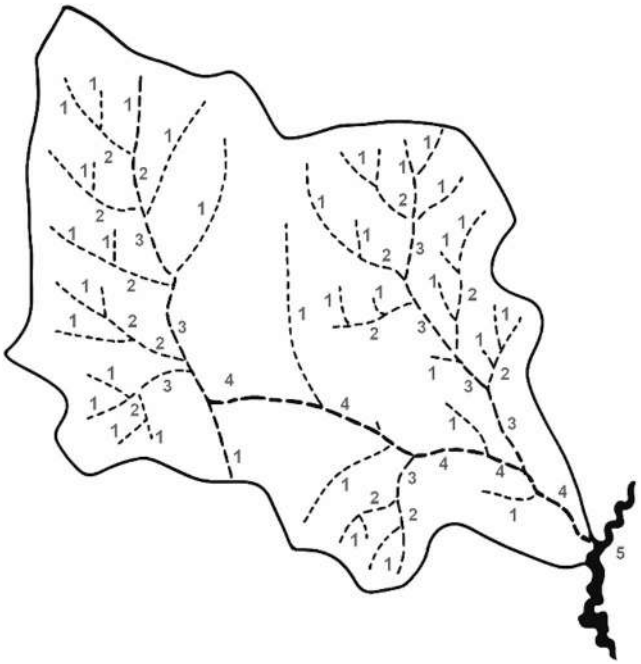


Fig. 1 Strahler stream order classification system. First-order streams (no 1) represent headwater channels without tributaries. When two streams of the same order (n) converge, they form a stream of order $n+1$, as illustrated by the progression from first-order to fourth-order streams (1→2→3→4). When streams of different orders join, the higher order is maintained downstream. This hierarchical classification provides a quantitative framework for analyzing drainage network structure in watershed studies

In Viet Nam, the geographic distribution of the population has significantly influenced hydrological research priorities in the country. The majority of inhabitants are concentrated in delta regions and downstream areas of major rivers (Asian Development Bank 2013), where research efforts have traditionally focused on mitigating flood impacts in these densely populated zones. Consequently, mountainous regions have received less attention, leading to a substantial knowledge gap in understanding rainfall-runoff interactions in these upland environments. For small streams with limited catchment areas, hydrological modeling has typically been employed to estimate discharge at watershed outlets, primarily serving as input for hydraulic simulations of larger downstream river reaches.

Flash flooding represents a particularly hazardous phenomenon in Northern Vietnam's mountainous regions. These events typically occur in steep headwater streams with small catchment areas, where the combination of topography and intense precipitation can generate rapidly developing flood waves. Due to the limited emphasis on hydraulic modeling in these regions, the detailed analysis and estimation of critical flood parameters, such as flow velocity and water depth, remain significantly under-researched.

While channel morphology of major Vietnamese rivers has been investigated in previous studies (Thuan 2002; Cuong 2014; Quynh 2014), small streams and rivers have received minimal attention in the scientific literature. This research gap is particularly significant given the importance of these smaller systems in the hydrological network and their role in flood generation in mountainous regions. Moreover, accurate estimation of channel dimensions across river networks has significant implications for understanding total evaporation processes and quantifying greenhouse gas emissions from riverine systems (Allen et al. 2018). Such knowledge enhances our understanding of channel formation processes and the spatial distribution of morphological characteristics throughout river networks.

This study focuses on analyzing cross-sectional shapes of small rivers and streams in Northern Vietnam's mountainous region to identify characteristic shape indices that can support hydraulic parameter estimation under data-limited conditions. By characterizing these parameters, we aim to provide framework for estimating water depths, flow widths, and velocities in ungauged locations based on calculated discharge values, thereby addressing a critical need for improved hydrological understanding in this region's headwater streams.

Data and methods

Data collection

This study utilizes legacy cross-sectional data from 132 sites across eight small mountainous streams in Northern Vietnam, collected between 2021 and 2023 as part of national research projects and doctoral studies. These streams, spanning provinces such as Bac Kan, Ha Giang, Cao Bang, and Lao Cai, represent a diversity of geomorphological settings, including steep headwater systems, and broader valley reaches, with watershed areas ranging from 10 to 250 km² and Strahler stream orders of 1–3. Measurement procedures utilized electronic total stations (accuracy ± 2 mm), with data standardized to the UTM coordinate system (EPSG:32648) to ensure consistency throughout cross-sectional shape analysis. The list of collected cross-sections is presented in Table 1 and the spatial distribution of survey sites is shown in Fig. 2. The dataset was selected based on the availability of complete bankfull geometry measurements (width and depth) from prior surveys, prioritizing cross-sections from headwater reaches with minimal anthropogenic influence to align with the study's focus on natural channel morphology. Despite the uneven distribution of samples (ranging from 9 to 28 cross-sections per stream), the selected sites

Table 1 List of collected Cross-Sections for characteristic determination

No.	Source	Stream/river	Location	Number of cross-sections
1	National Level Project Research: Research on Solutions to Respond to Some Major Natural Disasters Causing Natural Instability in the Ba Be Lake Area for Socio-Economic Development of the Locality (Truong 2023). Measured in 2022	Xuan Lac Stream (also known as Ta Han Stream)	Xuan Lac Commune, Cho Don District, Bac Kan Province	18
		Nam Cuong Stream (also known as Bo Lu Stream)	Nam Cuong Commune, Dong Lac Commune, Quang Bach Commune, Cho Don District, Bac Kan Province	14
		Pac Ngoi Stream (also known as Cho Leng Stream)	Quang Khe Commune, Dong Phuc Commune, Ba Be District, Bac Kan Province	12
2	Doctoral Thesis Report: Flash flood warning method for small mountainous basin – Piloting on 2 basins, namely: Nam Ly and Na Nhung in Ha Giang province (Toan 2023). Measured in 2023.	Nam Ly Stream	Quang Nguyen Commune, Hoang Su Phi District, Ha Giang Province	9
		Na Nhung Stream	Ban Nhung Commune, Ta Su Choong Commune, Hoang Su Phi District, Ha Giang Province	9
3	Project: Development of Flood Inundation Maps Downstream of the Bac River Hydropower Project - Ha Giang measured in 2022, were obtained from a report by the Center for Science and Technology Development of Irrigation (2022)	Bac River	Quang Binh District, Ha Giang Province	18
4	Collected directly on-site	Ta Lung Stream	Quang Hoa District, Cao Bang Province	24
		Lung Po River	Bat Xat District, Lao Cai Province	28
	Total			**132**

collectively capture the topographic and hydrological variability of the Northern mountainous region.

Cross-sectional morphology analysis using hydraulic geometry correlation using the r index

The study employs hydraulic geometry correlation analysis to model channel cross-sections as characteristic geometric shapes (triangles, parabolas, trapezoids, and rectangles) through the shape parameter *r*, as characterized by Dingman's formula (Dingman 2007). The parameterization of stream cross-sectional geometry is illustrated in Fig. 3, showing how different *r* values influence channel morphology. This parameterization enables any river or stream channel cross-section to be represented by a characteristic cross-section with an appropriate shape coefficient (*r*).

$$h = h_{\mathrm{bf}}\left(\frac{w}{w_{\mathrm{bf}}}\right)^{r} \tag{1}$$

$$A_{\mathrm{s}} = hw\left(1 - \frac{1}{r+1}\right) = hw\frac{r}{r+1} \tag{2}$$

This parameterization enables any river or stream channel cross-section to be represented by a characteristic cross-section with an appropriate shape coefficient (*r*). A triangular cross-section corresponds to $r = 1$; as r increases, the cross-section progressively transforms from a parabolic shape toward a rectangular configuration.

This research evaluates the suitability of the *r* index through a standard deviation metric for each cross-section, thereby identifying the characteristic cross-sectional morphology for the Northern mountainous region. The standard deviation index is calculated as the square root of the variance between the unit cross-sectional area correlation data and the standard cross-section. Since the evaluation aims to estimate standard deviation from sample data, we employ the sample standard deviation rather than the population standard deviation (Kenney 1947).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{3}$$

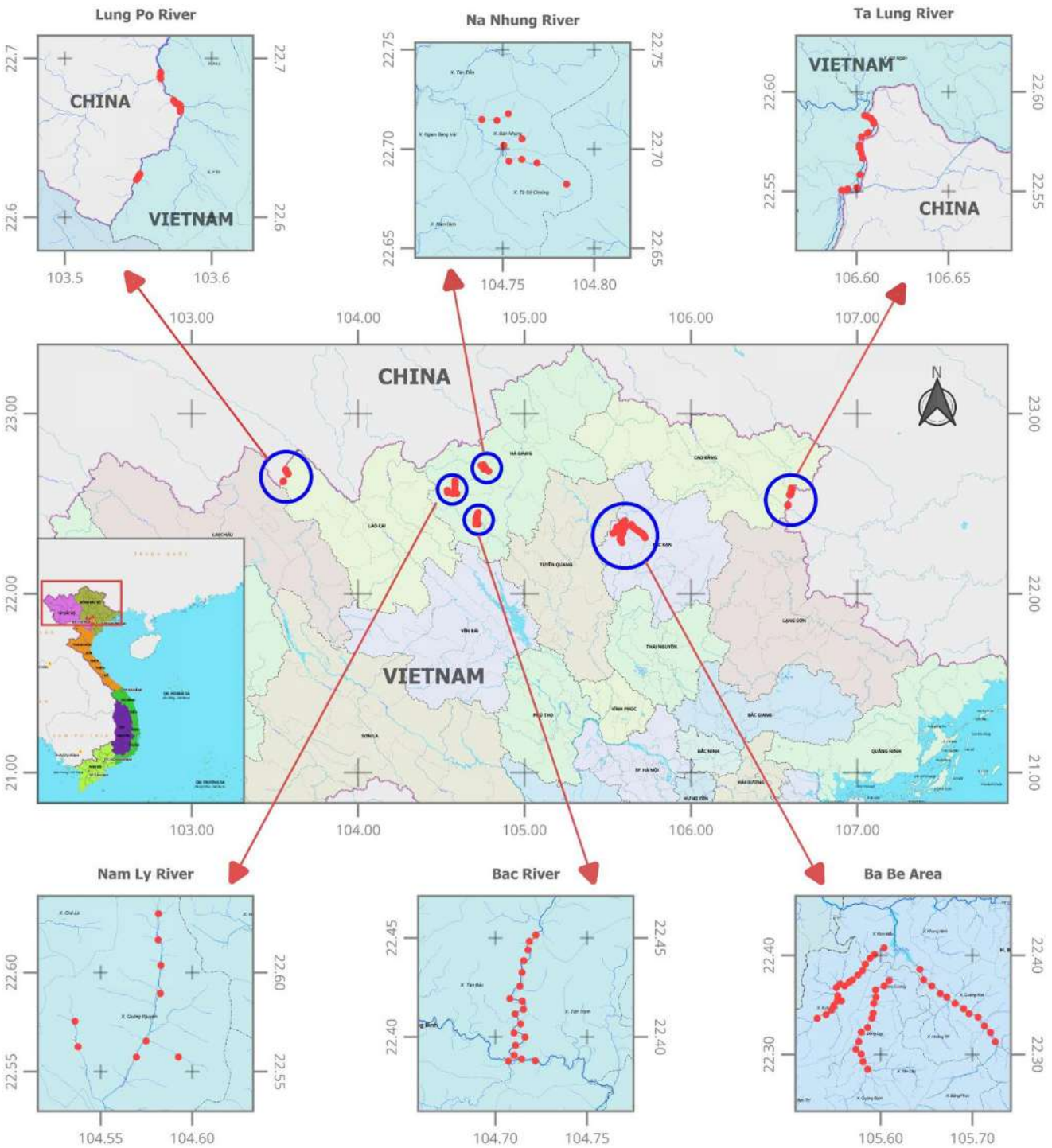


Fig. 2 Spatial distribution of river cross-section survey sites in the mountainous region of Northern Vietnam. The main map illustrates the geographic context of the study areas, with blue circles indicating the six primary river systems investigated: Lung Po River, Na Nhung River, Ta Lung River, Nam Ly River, Bac River, and Ba Be Area. Detailed inset maps display the precise locations of cross-sectional measurements (red dots) for each river system

Each cross-section is assessed by calculating its sample standard deviation relative to the sample cross-section (corresponding to the respective shape index r), thereby determining the optimal r index for each cross-section. Following comprehensive evaluation of all cross-sections, we characterize the regional morphology by determining the median and mean values of the r and k indices across all cross-sections, thus establishing characteristic cross-sectional

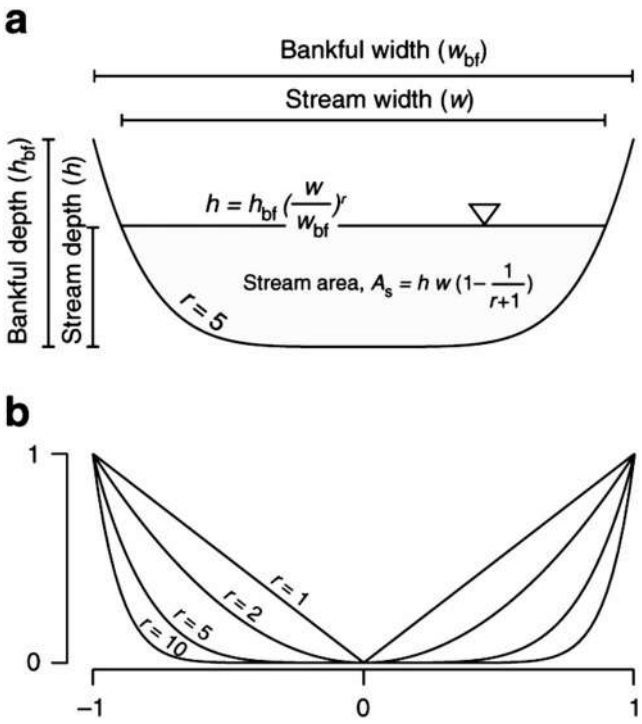


Fig. 3 Hydraulic geometry parameterization of stream cross-sections. **a** Schematic representation of the cross-sectional geometry showing bankfull width (w_{bf}), stream width (w), bankfull depth (h_{bf}), stream depth (h), and the stream area (A_s) calculation using the shape parameter r (shown with $r=5$). **b** Normalized cross-sectional profiles illustrating how different values of the shape parameter r ($r=1, 2, 5, 10$) influence channel morphology, ranging from triangular ($r=1$) to increasingly rectangular forms as r increases

morphology for the Northern mountainous region. In this investigation, the shape index r is examined across a range from 1 to 100 with incremental steps of 0.5, resulting in the evaluation of approximately 200 sample cross-sectional shapes per cross-section to determine the characteristic morphology. The study establishes cross-sectional correlation according to the $h \sim A$ (depth-area) relationship, ensuring adherence to principles of cross-sectional hydraulics (Chow 1959).

Statistics

To characterize the cross-sectional morphology of small mountainous streams in Northern Vietnam, we employed a two-stage statistical approach to determine the shape index (r) and bankfull width-to-depth ratio (k) across the 132 cross-sections from eight streams.

In the first stage, we calculated reach-specific means for r and k for each of the eight streams. For each stream, individual cross-sectional measurements were analyzed using the sample standard deviation method described in Sect. 2.2 (Cross-Sectional Morphology Analysis). The optimal r value for each cross-section was identified as the shape coefficient that minimized the standard deviation between the observed depth-area ($h \sim A$) relationship and the theoretical profile, while k was computed directly as the ratio of bankfull width (w_{bf}) to bankfull depth (h_{bf}). These individual values were then averaged within each stream to derive a single representative r and k value, accounting for intra-stream variability.

In the second stage, we derived regional characteristic values by calculating an unweighted average of the reach-specific means across all eight streams. This unweighted approach ensures that each stream contributes equally to the regional characterization, regardless of the number of cross-sections surveyed per stream (ranging from 9 to 28). We opted against a weighted average (e.g., by sample size) to avoid biasing the results toward streams with more extensive historical surveys, such as Lung Po River (28 cross-sections), which may not necessarily reflect greater geomorphological significance. This method leverages the available legacy data effectively while maintaining simplicity and consistency in representing the Northern mountainous region's diverse stream morphologies.

To further assess the variability and distribution of r and k, we computed descriptive statistics – including mean, variance, minimum, maximum, and quartiles – for both parameters across the entire dataset and by individual stream. These statistics provide a quantitative foundation for identifying the predominant cross-sectional shapes and bankfull geometries in the region. The shape index r was evaluated over a range from 1 to 100 in increments of 0.5, though subsequent analysis (Sect. 3) revealed that values rarely exceeded 10, allowing for a refined parameter space in future applications. All statistical analyses were performed using standard methods for sample data, ensuring robust estimation of regional hydraulic characteristics.

Results

Standardization of surveyed cross-section data

All 132 surveyed cross-sections underwent standardization and parametric evaluation using the shape index r methodology. The depth-area *($h \sim A$)* relationship served as the primary analytical criterion for comparing empirical cross-sections with theoretical profiles across a spectrum of shape coefficients. The surveyed cross-sectional shape used to determine these parameters is represented in Fig. 4, while the hydraulic geometry correlation analysis is illustrated in Fig. 5.

For each cross-section, the optimal r value was determined by identifying the coefficient that minimized the sample standard deviation between observed and modeled

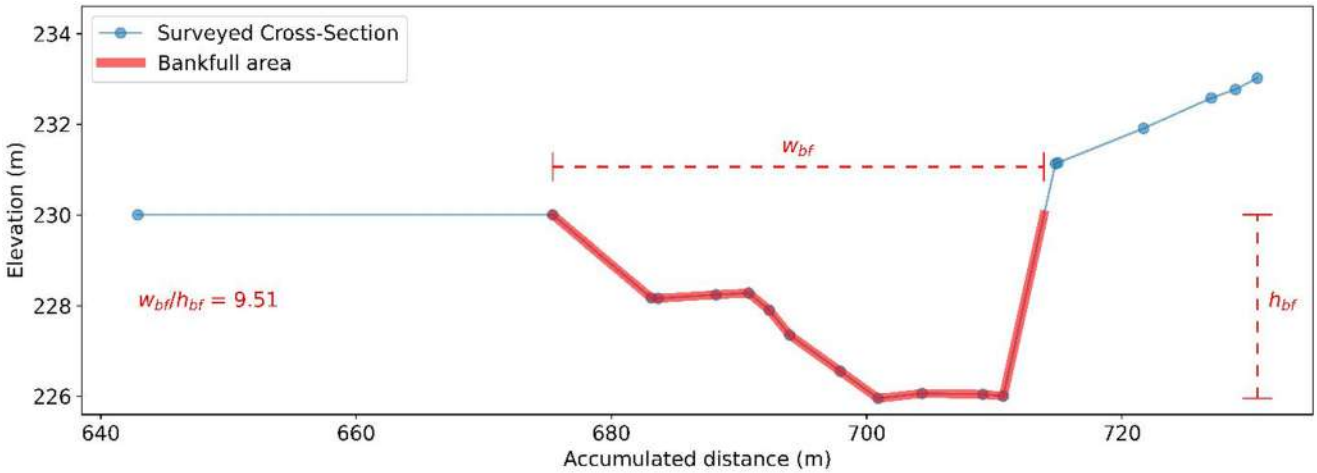


Fig. 4 Representative cross-sectional profile of a surveyed stream channel in the Northern mountainous region of Vietnam. The blue line with markers indicates the surveyed cross-section topography plotted against accumulated distance (m). The red-highlighted area represents the bankfull channel area. Key hydraulic geometry parameters are annotated, including bankfull width (w_{bf}), bankfull depth (h_{bf}), and the bankfull width-to-depth ratio (w_{bf}/h_{bf} = 9.51), which is an important morphological indicator for regional stream classification

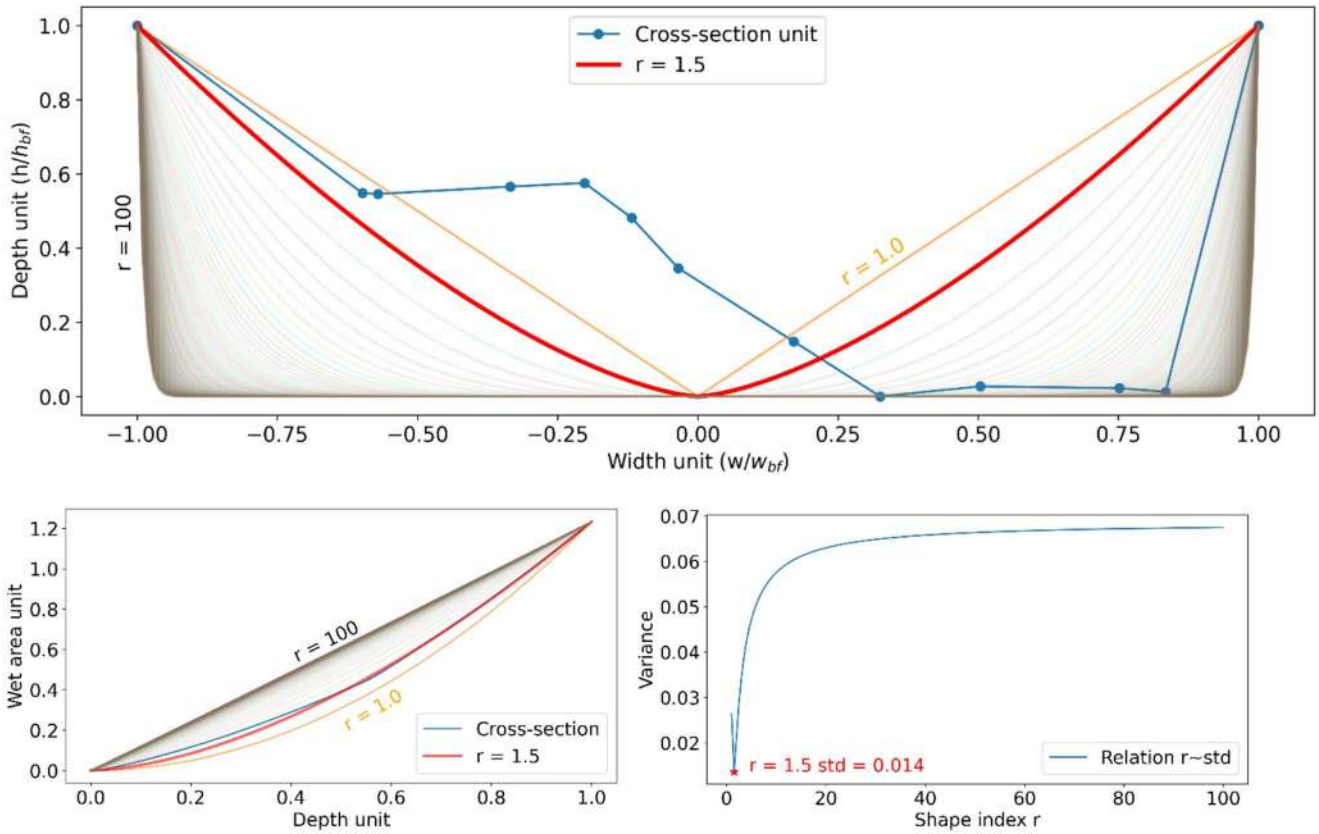


Fig. 5 Hydraulic geometry correlation analysis for cross-section parameterization. Top panel: Normalized cross-section profile (blue line with markers) compared with theoretical profiles for shape parameters r=1.5 (red line), r=1.0 (orange line), and r=100 (gray lines), plotted against normalized width (w/w_{bf}) and depth (h/h_{bf}). Bottom left: Relationship between normalized wet area and depth for the surveyed cross-section compared with theoretical models. Bottom right: Variance analysis showing the determination of optimal shape parameter (r=1.5, standard deviation=0.014) through the relationship between variance and shape index r, demonstrating the method used to identify the most representative cross-sectional morphology

Table 2 Statistical distribution of characteristic shape index (r) by stream

Stream/river	Number of cross-sections	Mean	Variance	Min	25%	50%	75%	Max
Lung Po	28.00	1.96	0.90	1.00	1.00	2.00	2.50	4.00
Na Nhung	9.00	3.11	1.08	2.00	2.50	3.00	3.50	5.50
Nam Ly	9.00	2.78	1.15	1.00	2.00	2.50	3.50	5.00
Nam Cuong	14.00	3.18	1.62	1.50	2.13	2.75	3.38	7.00
Bac river	18.00	2.33	0.79	1.00	2.00	2.25	2.88	4.00
Pac Ngoi	12.00	3.21	1.44	1.00	2.50	3.00	4.13	6.00
Xuan Lac	18.00	2.11	1.02	1.00	1.50	2.00	2.00	5.00
Ta Lung	24.00	2.75	1.63	1.00	1.50	2.00	3.25	6.00

Table 3 Statistical distribution of characteristic w_{bf}/h_{bf} ratio (k index) by stream

Stream/river	Number of cross-sections	Mean	Variance	Min	25%	50%	75%	Max
Lung Po	28.00	14.45	13.20	3.42	5.47	8.00	19.27	52.30
Na Nhung	9.00	5.04	1.05	3.60	4.13	4.97	5.85	6.53
Nam Ly	9.00	7.14	1.84	4.75	5.91	6.38	8.33	10.17
Nam Cuong	14.00	15.31	11.74	6.49	9.59	12.42	15.46	53.55
Bac river	18.00	16.97	12.57	3.97	7.05	14.14	20.34	50.56
Pac Ngoi	12.00	17.02	5.61	9.73	13.15	15.93	20.28	28.60
Xuan Lac	18.00	7.10	3.88	1.87	4.62	5.56	8.41	16.31
Ta Lung	24.00	7.40	5.20	1.68	3.28	5.50	10.35	19.37

geometries. As illustrated in Fig. 5, cross-Sect. 13 from Nam Cuong Stream (Bac Kan Province) exhibited optimal geometric representation at $r = 1.5$, with a minimal sample standard deviation of 0.014, indicating strong concordance between the observed profile and the theoretical model. This quantitative approach enables systematic classification of cross-sectional morphologies throughout the study region based on statistically derived shape parameters.

Results of determining the r and k indices for Cross-Sections

The analysis reveals that cross-sections in the Northern mountainous region of Vietnam exhibit shape indices (r) ranging from 1 to 7, despite the evaluation framework considering the full theoretical range of 1 to 100. The statistical distribution of the shape index (r) by stream is summarized in Table 2. The predominant r values fall between 1.5 and 3, constituting approximately 50% of all surveyed cross-sections. Notably, cross-sections with $r \leq 3$ represent approximately 75% of the dataset, with $r = 2.0$ being the most frequently occurring value (approximately 25% of cases). The mean shape index across the entire dataset is $r = 2.68$ (rounded to 2.5 for practical applications). Based on this statistical distribution, we propose $r = 2.0$ as the characteristic shape index for small river and stream channels in the Northern mountainous region of Vietnam. Furthermore, to optimize computational efficiency in future investigations, we recommend limiting the parameter space to r values between one and ten, consistent with Allen's approach (Allen et al. 2018).

Regarding the bankfull width-to-depth ratio ($k = w_{bf}/h_{bf}$), our analysis indicates values ranging from 1.8 to 53.55, with a mean value of 11.3 and a median value of 8.5, as presented in Table 3. Based on these findings, we propose $k = 8.5$ as a representative value for hydraulic and hydrological applications in the Northern mountainous region of Vietnam, particularly in scenarios where field measurements are unavailable. The statistical distributions of both r and k values are further illustrated in Fig. 6, showing median values and outliers for the Northern mountainous region.

Discussion

Research results for the Northern mountainous region of Vietnam

The shape coefficient r and the empirical coefficient k for the Northern mountainous region of Vietnam were determined as mean values derived from 8 river and stream sections comprising 132 cross-sections. Although this sample size may not be sufficiently large for comprehensive objective evaluation, in the context of limited survey data for mountainous regions – particularly channel survey data– these characteristic indices can provide valuable utility in estimating hydrological parameters such as water level and flow velocity when discharge values are available. In future research, we plan to expand the cross-sectional database by

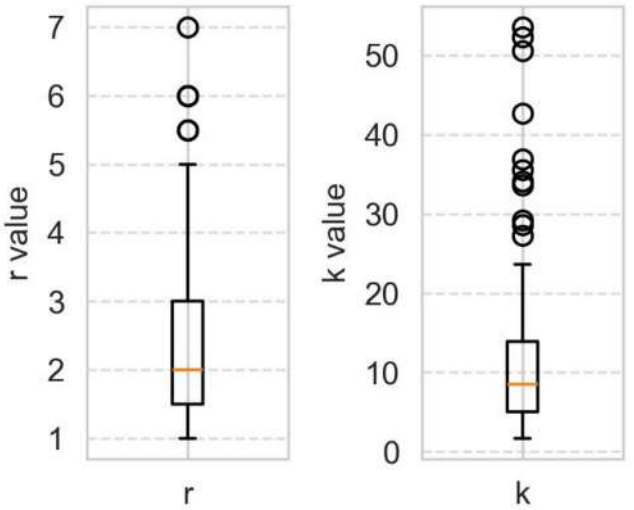


Fig. 6 Box plots showing the statistical distribution of hydraulic geometry parameters across the Northern mountainous region of Vietnam. Left panel: Distribution of shape coefficient (r) values, with median of approximately 2 and outliers reaching up to 7. Right panel: Distribution of bankfull width-to-depth ratio (k) values, with median of approximately 8 and several outliers exceeding 30. The orange horizontal lines represent the median values, while the boxes indicate the interquartile range (25th to 75th percentiles), and whiskers extend to the minimum and maximum values within 1.5 times the interquartile range

Table 4 Empirical coefficient k according to studies

No.	Author	Range value $k = w_{bf}/h_{bf}$	Location
1	Huang et al. 1997	4.27 ÷ 23.75	Small streams in southern Australia
2	Wohl et al. 2005	5.4 ÷ 38.33	Small streams in New Zealand
3	Wohl et al. 2008	Mean: 15.377	Compiled from various previous studies worldwide
4	Allen et al. (2018)	1.5 ÷ 35; Mean: 14	Small streams in North America and New Zealand
5	Williams (1978)	6.8 ÷ 61.96; Mean: 20.6	51 stations in Wisconsin, North Dakota, Texas, Idaho, Alaska, Pennsylvania in the United States and some stations in Canada, UK.

including additional river systems and conducting field surveys under varying flow conditions to validate these indices and enhance their applicability across diverse mountainous regions.

It should be emphasized that the r and k parameters reflect fixed geometric characteristics of cross-sections, unaffected by seasonal flow variations. Parameter r is determined from the depth-area ($h \sim A$) relationship—a geometric characteristic with minimal variability. Therefore, seasonal variations only affect instantaneous water levels, not the fundamental morphological parameters. Moreover, The current study focuses on cross-sectional geometric characteristics without analyzing relationships with basin factors such as geology, land cover, and precipitation patterns. This may limit our ability to explain the causal mechanisms behind the morphological characteristics r and k.

The shape coefficient $r = 2.0$ determined for the Northern mountainous region aligns with the threshold range of 1 to 10 as established by Allen et al. 2018 but lower than a normal distribution ($\mu = 5$, $\sigma = 2$). While the empirical coefficient $k = 8.5$ determined in our study is consistent with the range of values documented in previous research, as summarized in Table 4. Notably, the values of r and k for the Northern mountainous region of Vietnam demonstrate a tendency toward the lower end of the spectrum compared to studies conducted in other regions globally (Huang et al. 1997; Wohl et al. 2005, 2008; Allen et al. 2018).

The shape coefficient $r = 2.0$ and the bankfull width-to-depth ratio $k = 8.5$ determined for Northern Vietnam's small mountainous streams reflect the region's distinct hydrological and geomorphological conditions. Northern Vietnam experiences high annual precipitation, ranging from 1750 to 2500 mm (Thai et al. 2023; Hersbach et al. 2025), driven by its tropical monsoon climate. This intense rainfall, concentrated during the wet season, generates high-magnitude flows that enhance vertical incision over lateral widening, as evidenced by the low r value (2.0), which indicates a cross-sectional shape closer to triangular than rectangular. Similarly, the relatively low k (8.5) compared to global averages suggests deeper, narrower channels, a morphology consistent with the steep, bedrock-dominated terrain and high runoff in the region.

In contrast, regions with lower annual precipitation, such as southern Australia (200–500 mm/year) or New Zealand (500–1500 mm/year), often exhibit wider, shallower channels (higher k values, ranging from 4.27 to 38.33). The lower rainfall in these areas results in less concentrated flows, allowing for greater lateral expansion of stream channels. In Northern Vietnam, however, the combination of high rainfall and steep gradients restricts channel widening due to bedrock confinement, promoting deeper incision and producing the compact geometries observed in this study. This finding underscores the influence of regional climatic and topographic factors on stream morphology, highlighting the need for locally calibrated hydraulic parameters in tropical mountainous environments like Northern Vietnam.

While the sample of 132 cross-sections provides a statistically robust baseline for Northern Vietnam's headwater streams, it may not fully capture the variability across all sub-regions. Future research should expand the dataset to include additional stream systems and incorporate field measurements during high-flow events to validate the hydraulic estimations derived from r and k. Nevertheless, these indices offer a practical framework for estimating water depth,

velocity, and flow width in Northern Vietnam's ungauged streams, directly supporting flash flood preparedness in this data-scarce, flood-prone region.

We acknowledge that the number of surveyed cross-sections per stream is uneven (ranging from 9 to 28), which may limit the representation of morphological variability in some sub-regions. To minimize this effect, we applied an unweighted averaging approach so that each stream contributes equally to the regional characterization. Importantly, the present study provides a theoretical framework for determining the indices r and k where sufficient data are available. In data-limited or ungauged basins, the regional characteristic values obtained here ($r = 2.0$; $k = 8.5$) can serve as useful reference parameters for preliminary hydraulic estimation.

Applicability of indices in hydrological and hydraulic calculations

The significance of these indices lies in their ability to provide robust estimates of velocity, flow depth, and width, even under conditions of sparse cross-sectional data. These parameters have wide applications in studies on downstream flow (Kasahara et al. 2003), open channel hydraulics (Gleason et al. 2014) and channel bed erosion potential assessment (Allen el al. 2013). Mountainous areas typically lack sufficient data for detailed calculations, making parameter estimation particularly challenging to implement.

From $Q = Av$, substituting formulas (1) and (2) and using $k = w_{bf}/h_{bf}$ we obtain:

$$Q = vkh_{bf}^{1-\frac{1}{r}} h^{1+\frac{1}{r}} \left(\frac{r}{r+1}\right) \tag{4}$$

According to Manning's equation (Manning 1891):

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{5}$$

For natural flow conditions where the flow width (w) substantially exceeds the water depth, we can assume that the side walls of the stream exhibit negligible flow resistance compared to bottom friction. Under these conditions, the hydraulic radius r approximates the average flow depth (Katopodes 2019). Since r represents the average flow depth corresponding to width w, the cross-sectional area can be expressed as: $A_s = Rw = hwr/(r+1) \rightarrow R = hr/(r+1)$ (6) Formula 5 can be rewritten as:

$$v = \frac{1}{n}\left(h\frac{r}{r+1}\right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

Consequently, the flow discharge calculation formula becomes:

$$Q = \frac{1}{n} k S^{\frac{1}{2}} h_{bf}^{1-\frac{1}{r}} h^{\frac{5}{3}+\frac{1}{r}} \left(\frac{r}{r+1}\right)^{\frac{5}{3}} \tag{7}$$

The relationship between bankfull discharge and watershed area for the watershed can be expressed as (Emmett 1975):

$$Q_{bf} = \alpha A^{\beta} \tag{8}$$

When $Q = Q_{bf}$ *and* $h = h_{bf}$, substituting into formula (8) yields:

$$Q_{bf} = \frac{1}{n} k S^{\frac{1}{2}} h_{bf}^{\frac{8}{3}} \left(\frac{r}{r+1}\right)^{\frac{5}{3}} \tag{9}$$

From which we can derive:

$$h_{bf} = \left[\frac{nQ_{bf}}{kS^{\frac{1}{2}}\left(\frac{r}{r+1}\right)^{5/3}}\right]^{\frac{3}{8}} \tag{10}$$

Using formula (10), the flow depth h corresponding to the bankfull discharge (or Q_{bf}), can be determined, from which $w_{bf} = kh_{bf}$ can be determined with $k = 8.5$.

After determining the bankfull depth (h_{bf}) and bankfull width (w_{bf}) at a specific location when the bankfull discharge is known (according to formula 8), these values can be substituted into formula 7 to determine water level depth, formula 1 to determine water level width, and formula 7 to determine velocity values corresponding to flow discharge. This methodological approach enables water level estimation based on determined discharge values and characteristic cross-sectional parameters (r and k).

Several studies indicate the potential to utilize correlations between bankfull width and bankfull depth with upstream watershed area to estimate corresponding parameters, thereby simplifying the calculation process (Golden et al. 2006; Wilkerson et al. 2014). he general relationship formula remains similarly suitable as the relationship between bankfull discharge and upstream watershed drainage area previously described. In such applications, to estimate values for a specific location, it is necessary to determine the watershed area corresponding to the watershed with its outlet at that location using appropriate watershed partitioning algorithms (O'Callaghan et al. 1984).

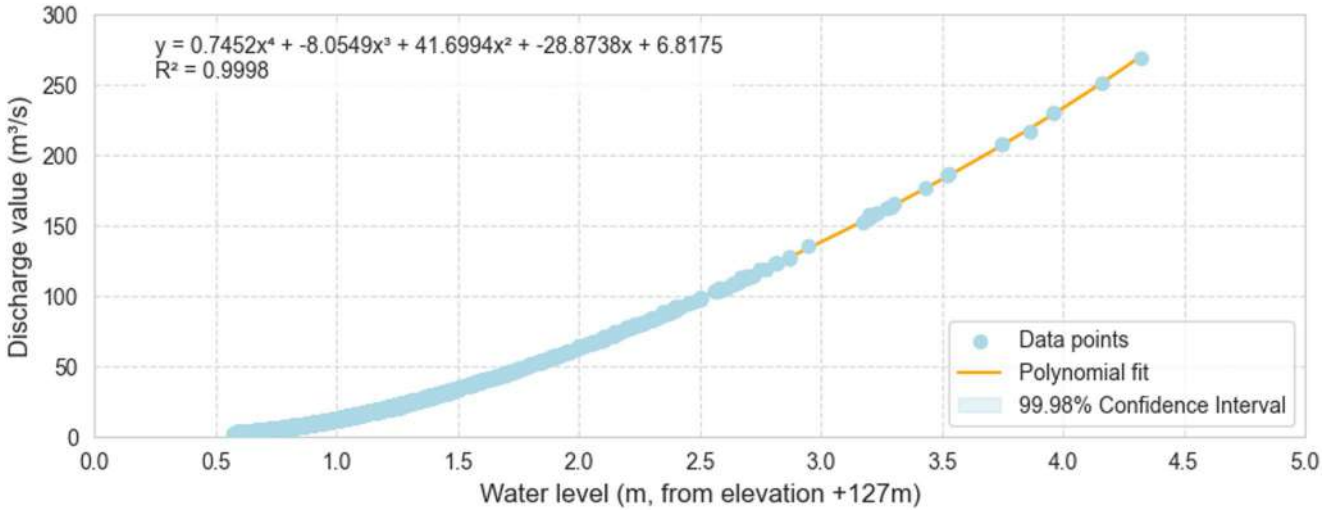


Fig. 7 Water level-discharge relationship at Vinh Yen hydrological station

Table 5 The estimated results of water level and velocity for different discharge levels at Vinh Yen hydrological station

Parameters	Method	Discharge level (m³/s)					
		50	100	150	174	200	250
h_1 (m)	Q~h relationship	1.79	2.52	3.14	3.40	3.67	4.15
h_2 (m)	Equation 8	2.03	2.79	3.36	3.60	3.84	4.26
Water level difference (m)	abs($h_2 - h_1$)	0.24	0.27	0.23	0.20	0.17	0.11
v_1 (m/s)	Equation 7 with h_1	1.48	1.86	2.16	2.28	2.40	2.60
v_2 (m/s)	Equation 7 with h_2	1.61	1.99	2.26	2.37	2.47	2.64

Testing the application of water level and velocity calculations from discharge determination results

We collected data on the discharge-water level relationship at the Vinh Yen hydrological station to verify the suitability of the proposed r and k values. The Vinh Yen hydrological station (in Lao Cai province) has a basin area of 135.57 km², an average basin slope of 41.69%, and a corresponding channel bed slope at the station of 1.57%. The Manning's roughness coefficient was selected as 0.095 (determined based on velocity relationship calculations at the station). We utilized the bankfull discharge at a 50% frequency (Carpenter et al. 1999), which, over a 64-year period (from 1960 to 2023), corresponds to 174 m³/s. The water level-discharge relationship at the Vinh Yen hydrological station is presented in Fig. 7, based on a time series of data from 2020 to 2022.

By substituting all values into Eq. 11, we determined the bankfull depth (h_{bf}) as 3.6 m and the bankfull width (w_{bf}) as 30.62 m. These values are close to the water level observed in the relationship chart shown in Fig. 7 (h = 3.4 m, corresponding to a discharge of 174 m³/s). We then proceeded to use hypothetical discharge values ranging from 50 to 250 m³/s to calculate water levels using Eq. 8. The estimated results of water level and velocity for different discharge levels are summarized in Table 5, demonstrating the reliability of the proposed parameters for approximating hydraulic characteristics in the region.

The results indicate that the water level values estimated using Eq. 8 tend to be slightly higher than those derived from the actual water level-discharge relationship. This discrepancy can be attributed to differences between the actual cross-sectional shape at the Vinh Yen hydrological station and the standard cross-section proposed in the model. Nevertheless, the estimated results remain reliable for approximating water level parameters. Additionally, velocity estimations based on Eq. 7 also yield results consistent with the flow characteristics in the area.

Conclusion

This study provides the first comprehensive characterization of cross-sectional shape parameters for small mountainous streams in Northern Vietnam, addressing a critical knowledge gap in regional hydraulic modeling. Through the analysis of 132 cross-sections across eight river systems, we establish that these streams exhibit a characteristic shape index (r) of 2.0 and a bankfull width-to-depth ratio (k) of 8.5. These parameters enable reliable estimation of key hydraulic variables in data-sparse environments.

The identified shape parameters align with global studies but trend toward the lower end of documented ranges, suggesting distinct regional geomorphological characteristics influenced by local geological formations and precipitation patterns. The lower r and k values compared to those observed in Australia, New Zealand, and North America indicate that Northern Vietnamese Mountain streams generally feature more compact cross-sectional profiles with relatively deeper channels relative to their width.

The practical significance of this research extends beyond parameter identification. By providing a methodological framework that relates discharge to hydraulic parameters through Eqs. 8–12, we offer water resource engineers a valuable framework for estimating water levels, flow velocities, and inundation widths in ungauged locations when discharge is known. This approach is particularly valuable for flash flood risk assessment in mountainous regions where conventional hydraulic modeling is constrained by data limitations.

Further research should focus on expanding the cross-sectional database across additional watersheds and validating the hydraulic estimations against field measurements during various flow conditions. Additionally, investigating the relationship between these parameters and watershed characteristics (e, g., geology, land cover, and precipitation patterns) would enhance the understanding of the factors influencing stream morphology in this region.

Acknowledgements The authors gratefully acknowledge the Vietnam Academy for Water Resources (VAWR) and Thuyloi University for providing the cross-sectional data essential for this study. These data were collected as part of research projects conducted between 2021 and 2023 in the provinces of Bac Kan, Ha Giang, Cao Bang, and Lao Cai, and their availability significantly contributed to the success of our analysis. We also extend our appreciation to the Key Laboratory of River and Coastal Engineering at VAWR for their technical support and valuable insights during the research process. Additionally, we thank our colleagues for their constructive feedback, which greatly improved the quality of this manuscript.

Author Contributions **Thin Van Le**: Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Methodology, Software (including coding and GIS mapping), Validation, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Duong Cao Phan**: Supervision, Writing – revising & editing. **Hoa Dinh Tran**: Conceptualization, Supervision, Writing – review & editing. **Giap Dang Nguyen**: Methodology, Supervision, Writing – review & editing. All authors have approved the final version of the manuscript and agree to be accountable for all aspects of the work, ensuring that any questions related to the accuracy or integrity of the research are appropriately investigated and resolved. **Thin Van Le** is the corresponding author (email: levanthin@gmail.com).

Data availability The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Declarations

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

Allen GH, Barnes JB, Pavelsky TM, Kirby E (2013) Lithologic and tectonic controls on bedrock channel form at the Northwest Himalayan front. J Geophys Res Earth Surf 118(3):1806–1825. https://doi.org/10.1002/jgrf.20113

Allen GH, Pavelsky TM, Barefoot EA et al (2018) Similarity of stream width distributions across headwater systems. Nat Commun 9(1). https://doi.org/10.1038/s41467-018-02991-w

Asian Development Bank (2013) Vietnam Environment and Climate Change Assessment. Asian Development Bank, Hanoi. https://data.vietnam.opendevelopmentmekong.net/vi/dataset/viet-nam-environment-and-climate-change-assessment, Accessed 7 January 2025

Carpenter TM, Sperfslage JA, Georgakakos KP, Sweeney T, Fread DL (1999) National threshold runoff Estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. J Hydrol 224(1–2):21–44. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00115-8

Chow VT (1959) Open—Channel hydraulics. McGraw-Hill, New York

Cuong VH (2014) Research on the relationship between river hydraulics, sediment and bed morphology in Creek in the Mekong Delta (in Vietnamese). J Water Resour Environ Eng 46:137–143. https://vjol.info.vn/index.php/DHTL/article/view/22308/19078/. Accessed 9 February 2025

Dingman SL (2007) Analytical derivation of at-a-station hydraulic–geometry relations. J Hydrol 334(1–2):17–27. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.021

Emmett WW (1975) The channels and waters of the upper salmon river Area, Idaho. United States Government Printing Office, Washington https://doi.org/10.3133/pp870a

Gleason CJ, Smith LC (2014) Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry. Proc Natl Acad Sci 111(13):4788–4791. https://doi.org/10.1073/pnas.1317606111

Golden LA, Springer GS (2006) Channel geometry, median grain size, and stream power in small mountain streams. Geomorphology 78(1–2):64–76. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.01.031

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Biavati G, Horányi A, Muñoz Sabater J, Thépaut J-N et al (2025) ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview. Accessed 7 January 2025

Huang HQ, Nanson GC (1997) Vegetation and channel variation; a case study of four small streams in southeastern Australia. Geomorphology 18(3–4):237–249. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(96)00028-1

Kasahara T, Wondzell SM (2003) Geomorphic controls on hyporheic exchange flow in mountain streams. Water Resour Res 39(1). https://doi.org/10.1029/2002wr001386

Katopodes ND (2019) Long waves. Free-Surface flow. Elsevier, Delphi, p 306. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815487-8.00006-8

Kenney JF (1947) Mathematics of statistics part One - Second edition. D. Van Nostrand Company, Inc., New York

Manning R (1891) On the flow of water in open channels and pipes. Trans Inst Civ Eng Irel 20:161–207

O'Callaghan JF, Mark DM (1984) The extraction of drainage networks from digital elevation data. Comput Vis Graphics Image Process 28(3):323–344. https://doi.org/10.1016/s0734-189x(84)80011-0

Quynh NN (2014) Changes in morphological elements and relationships in the red river and Duong river due to hydrological and

channel dynamics (in Vietnamese). J Water Resour Sci Technol 21:1–13. https://vawr.org.vn/images/File/PGS.TS.%20Nguyen%20Ngoc%20Quynh(1).pdf Accessed 9 February 2025

Strahler AN (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology. Trans Am Geophys Union 38(6):913–920. https://doi.org/10.1029/tr038i006p00913

Thai TH, Cuong HD, Khiem MV, Lam HP, Thuy NB, Dai HV, Nguyen LN et al (2023) Hydrometeorological characteristics of Vietnam 2022 (in Vietnamese). Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration, Hanoi. http://vnmha.gov.vn/upload/files/2023/Thang%203/dac-diem-kttv-nam-2022-da-gop.pdf. Accessed 22 February 2025

Thuan TN (2002) Determine the size of the stable riverbed (in Vietnamese). J Hydro-Meteorol 23–29. http://tapchikttv.vn/data/article/735/Bai5.pdf. Accessed 12 February 2025

Toan NT (2023) Flash flood warning method for small mountainous basin – Piloting on 2 basins, namely: Nam Ly and Na Nhung in Ha Giang province (in Vietnamese). Dissertation, Thuyloi University, Hanoi. http://daotao.tlu.edu.vn/ftp/P3/upload/NCS/LATS_NguyenTheToan_2023.zip. Accessed 24 February 2025

Trampush SM, Huzurbazar S, McElroy B (2014) Empirical assessment of theory for bankfull characteristics of alluvial channels. Water Resour Res 50(12):9211–9220. https://doi.org/10.1002/2014wr015597

Vannote RL, Minshall GW, Cummins KW, Sedell JR, Cushing CE (1980) The river continuum concept. Can J Fish Aquat Sci 37(1):130–137. https://doi.org/10.1139/f80-017

Wilkerson GV, Kandel DR, Perg LA, Dietrich WE, Wilcock PR, Whiles MR (2014) Continental-scale relationship between bankfull width and drainage area for single-thread alluvial channels: BANKFULL WIDTH AND DRAINAGE AREA RELATIONSHIP. Water Resour Res 50(2):919–936. https://doi.org/10.1002/2013wr013916

Williams GP (1978) Bank-full discharge of rivers. Water Resour Res 14(6):1141–1154. https://doi.org/10.1029/wr014i006p01141

Wohl EE, Merritt DM (2008) Reach-scale channel geometry of mountain streams. Geomorphology 93(3–4):168–185. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.014

Wohl EE, Wilcox A (2005) Channel geometry of mountain streams in new Zealand. J Hydrol 300(1–4):252–266. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.006

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.