

NGHIÊN CỨU ĐẶC TRƯNG HÌNH THÁI MẶT CẮT PHỤC VỤ XÁC ĐỊNH CÁC THAM SỐ THỦY LỰC

Lê Văn Thìn, Nguyễn Đăng Giáp

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

Tóm tắt: Hình thái mặt cắt có ảnh hưởng trực tiếp đến các tham số thủy lực, tuy nhiên đối với các sông, suối nhỏ, tình trạng thiếu hụt dữ liệu đã làm giảm khả năng ước tính các tham số thủy lực dòng chảy trong đánh giá lũ lụt. Do đó, khái quát đặc trưng hình thái mặt cắt có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá lũ lụt trong điều kiện hạn chế số liệu ở các khu vực miền núi. Nghiên cứu này phân tích 132 mặt cắt ngang từ tám hệ thống sông suối nhỏ khu vực miền núi phía Bắc nhằm xác định đặc trưng hệ số hình dạng mặt cắt (r) và tỷ số giữa chiều rộng tràn bờ và chiều sâu tràn bờ (k). Nghiên cứu sử dụng phương pháp mô hình hóa mặt cắt ngang chuẩn hóa và phương pháp thống kê, kết quả xác định được hệ số hình dạng mặt cắt đặc trưng là $r = 2,0$ và tỷ số $k = 8,5$. Các giá trị này phù hợp với các nghiên cứu toàn cầu, đồng thời là cơ sở để ước tính các tham số thủy lực quan trọng như độ sâu mực nước, vận tốc, chiều rộng dòng chảy tại một vị trí khi biết lưu lượng, từ đó hỗ trợ đánh giá lũ lụt cho các khu vực hạn chế về số liệu đo đạc. Kết quả nghiên cứu có thể hữu ích đối với các nhà thủy văn học trong đánh giá lũ lụt tại các sông suối nhỏ.

Từ khóa: Hình thái mặt cắt ngang, lưu lượng tràn bờ, ước tính tham số thủy lực.

Summary: Cross-sectional morphology directly influences hydraulic parameters, however, for small rivers and streams, data scarcity has reduced the capability to estimate hydraulic flow parameters in flood assessment. Therefore, generalizing morphological characteristics of cross-sections holds significant importance in flood assessment under data-limited conditions in mountainous regions. This study analyzes 132 cross-sections from eight small river and stream systems in the northern mountainous region to determine the characteristics of cross-sectional shape coefficient (r) and the ratio between bankfull width and bankfull depth (k). The study employs normalized cross-sectional modeling methods and statistical approaches, yielding a characteristic cross-sectional shape coefficient of $r = 2.0$ and ratio $k = 8.5$. These values are consistent with global studies and serve as a foundation for estimating critical hydraulic parameters such as water depth, velocity, and flow width at a given location when discharge is known, thereby supporting flood assessment in areas with limited observational data. The research findings may be beneficial for hydrologists in flood assessment of small rivers and streams.

Keywords: Cross-sectional morphology, bankfull discharge, hydraulic estimation.

1. GIỚI THIỆU

Hình thái mặt cắt ngang lòng dẫn trong tự nhiên được hình thành cơ bản bởi sự tương tác phức tạp giữa lượng mưa và điều kiện bề mặt dựa trên quá trình thủy văn. Trong các hệ thống sông suối nhỏ ở thượng nguồn – thường

là các dòng suối có bậc Strahler từ 1-3 [1, 2], quá trình hình thành lòng dẫn chủ yếu diễn ra trong điều kiện tự nhiên với tác động tối thiểu của hoạt động dân sinh, là kết quả của các quá trình xói mòn và lắng đọng liên tục. Hệ thống phân loại bậc dòng suối Strahler được minh họa trong hình 1, cung cấp khung lý thuyết để phân tích cấu trúc mạng lưới sông ngòi trong nghiên cứu lưu vực. Những dòng suối nhỏ này đại diện cho các lòng dẫn thượng nguồn

Ngày nhận bài: 30/6/2025

Ngày thông qua phản biện: 22/7/2025

Ngày duyệt đăng: 31/7/2025

và thể hiện mối tương quan nhất định đối với lưu vực.

Trên hình 1 thể hiện các dòng suối bậc 1 (đánh số 1) thể hiện các suối thượng nguồn mà không có các nhánh suối khác đổ vào. Khi hai nhánh suối cùng cấp gặp nhau, chúng sẽ tạo ra dòng suối với cấp bậc lớn hơn.



Hình 1: Hệ thống phân loại bậc dòng suối Strahler

Nếu hai nhánh suối không cùng cấp gặp nhau, chúng sẽ giữ bậc cao hơn ở hạ lưu. Hệ thống phân loại này cung cấp khung lý thuyết định lượng để phân tích cấu trúc mạng lưới sông ngòi trong nghiên cứu về lưu vực sông.

Các nghiên cứu trên thế giới đã chứng minh rằng chiều rộng và chiều sâu tràn bờ có mối tương quan mạnh mẽ đến lưu vực thượng lưu [3, 4, 5]. Mối quan hệ này cho thấy hình dạng mặt cắt trong các lưu vực cụ thể thường có sự tương đồng dựa trên đặc điểm địa hình, thành phần địa chất và các điều kiện khí hậu. Dingman [6] cho rằng hình dạng mặt cắt ngang trong dòng chảy tự nhiên có thể được khái quát hóa thành các dạng mặt cắt ngang chuẩn thể hiện tính tương đồng về thủy lực – một khái niệm đặc biệt có giá trị cho việc ước tính các thông số thủy lực.

Trong mô hình thủy lực, mối quan hệ giữa độ

sâu dòng chảy và diện tích mặt cắt ướt đóng vai trò nền tảng cho việc đặc trưng hóa mặt cắt ngang [7]. Những mối quan hệ này cho phép các nhà nghiên cứu khái quát hóa hình dạng lòng dẫn trên mạng lưới sông ngòi, từ đó tạo điều kiện cho phân tích thủy lực tại các vị trí thiếu số liệu khảo sát mặt cắt hoặc không khả thi để thực hiện như các sông suối nhỏ trên khu vực miền núi phía Bắc.

Lũ quét là đại diện cho loại hình thiên tai đặc biệt nguy hiểm tại khu vực miền núi phía Bắc, những sự kiện này thường xảy ra trên các sông, suối thượng nguồn có diện tích lưu vực nhỏ. Các khu vực này thường gây ra lũ quét do sự kết hợp giữa độ dốc địa hình và cường độ mưa lớn. Tuy nhiên các khu vực này thường chỉ được phát triển các mô hình thủy văn mà không quan tâm nhiều đến các tham số thủy lực khác bao gồm vận tốc dòng chảy và độ sâu mực nước.

Nghiên cứu này tập trung vào phân tích hình dạng mặt cắt ngang của một số hệ thống sông suối nhỏ trên khu vực miền núi phía Bắc để xác định các chỉ số hình dạng đặc trưng nhằm ước tính các tham số thủy lực nêu trên trong điều kiện hạn chế số liệu. Bằng việc đặc trưng hóa những tham số này, kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp một khung lý thuyết để ước tính độ sâu mực nước, chiều rộng dòng chảy và vận tốc dòng chảy tại các vị trí chưa có trạm quan trắc khi biết được lưu lượng (thông qua mô hình thủy văn) nhằm hiểu rõ hơn đặc điểm lũ lụt ở các khu vực này.

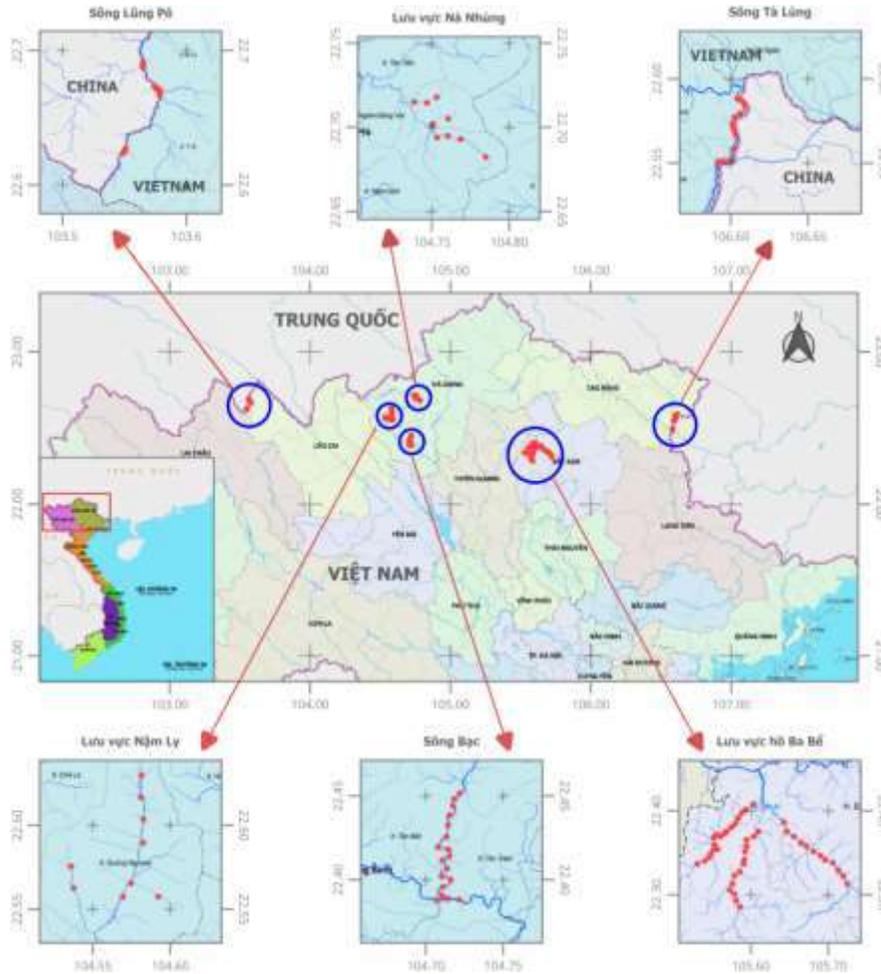
2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Dữ liệu sử dụng

Nghiên cứu này sử dụng dữ liệu 132 mặt cắt ngang được thu thập trên tám hệ thống sông suối nhỏ khu vực miền núi phía Bắc. Danh sách các mặt cắt ngang được thu thập thể hiện trong bảng 1 và sự phân bố không gian các mặt cắt được thể hiện trong hình 2.

Bảng 1: Chi tiết số liệu mặt cắt ngang sử dụng

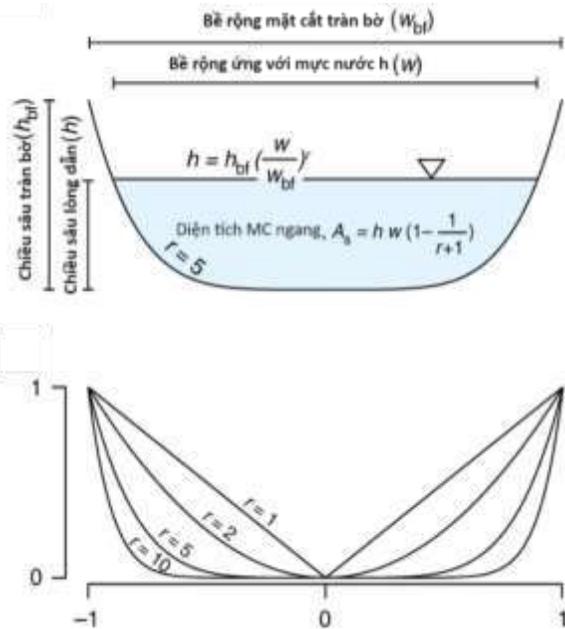
TT	Nguồn tham khảo	Sông/suối	Khu vực	Số lượng mặt cắt
1	Đề tài cấp Quốc gia: Nghiên cứu các giải pháp ứng phó với một số thiên tai chính gây mất ổn định tự nhiên khu vực hồ Ba Bể phục vụ phát triển kinh tế xã hội của địa phương [8]	Suối Xuân Lạc (còn gọi là suối Tả Han)	Xã Xuân Lạc, huyện Chợ Đồn, tỉnh Bắc Kạn	18
		Suối Nam Cường (còn gọi là suối Bó Lù)	Xã Nam Cường, Xã Đồng Lạc, Xã Quảng Bạch, huyện Chợ Đồn, tỉnh Bắc Kạn	14
		Suối Pắc Ngòi (còn gọi là suối Chợ Lèng)	Xã Quảng Khê, Xã Đồng Phúc, huyện Ba Bể, tỉnh Bắc Kạn	12
2	Luận Án: Nghiên cứu phương pháp cảnh báo lũ quét cho lưu vực nhỏ miền núi và áp dụng thử nghiệm cho 2 lưu vực Nậm Ly và Nà Nhùng tỉnh Hà Giang (2023) [9]	Suối Nậm Ly	Xã Quảng Nguyên, huyện Hoàng Su Phì, tỉnh Hà Giang	9
		Suối Nà Nhùng	Xã Bán Nhùng, xã Tả Sử Choóng, huyện Hoàng Su Phì, tỉnh Hà Giang	9
3	Các đề tài, dự án khác (tài liệu thu thập bổ sung)	Suối Tà Lùng	Huyện Quảng Hòa, tỉnh Cao Bằng	24
		Sông Lũng Pô	Huyện Bát Xát, tỉnh Lào Cai	28
		Sông Bạc	Huyện Quang Bình, tỉnh Hà Giang	18
TỔNG CỘNG				132



Hình 2: Vị trí các mặt cắt thu thập

2.2. Mô hình hóa mặt cắt ngang

Nghiên cứu sử dụng phân tích tương quan hình học thủy lực để mô hình hóa các mặt cắt ngang thông qua hệ số hình dạng r . Việc khái quát hóa hình thái mặt cắt ngang được minh họa trong hình 3 cho thấy các giá trị r khác nhau ảnh hưởng đến hình dạng lòng dẫn. Mọi mặt cắt bất kỳ đều có thể được biểu diễn dưới một mặt cắt ngang có hệ số hình dạng r phù hợp tương ứng.



Hình 3: Khái quát mặt cắt ngang bằng hệ số hình dạng r

Dựa trên hệ số hình dạng mặt cắt ngang r , bề rộng lòng dẫn và độ sâu lòng dẫn tương ứng với lưu lượng tràn bờ và mực nước trên sông/suối, có thể xác định được bề rộng lòng dẫn tương ứng. Khi $r = 1$, mặt cắt ngang có dạng hình tam giác và diện tích được tính theo công thức tính diện tích hình tam giác, khi $r \rightarrow \infty$, diện tích mặt cắt ngang được tính theo công thức tính diện tích hình chữ nhật.

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

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

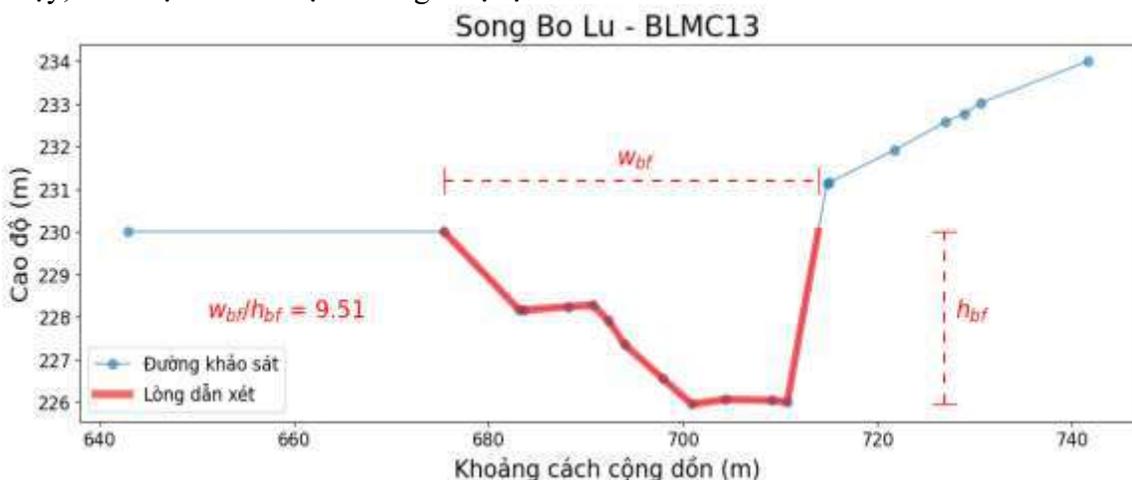
Nghiên cứu đánh giá độ lệch chuẩn cho mỗi mặt cắt ngang thông qua sự phù hợp của hệ số hình dạng r . Chỉ số độ lệch chuẩn được xác định bằng cách lấy căn bậc 2 của phương sai số liệu tương quan diện tích mặt cắt đơn vị so với mặt cắt chuẩn. Do mục đích của đánh giá là để ước lượng độ lệch chuẩn trên dữ liệu mẫu (độ lệch chuẩn mẫu - ký hiệu D), tác giả sử dụng chỉ số độ lệch chuẩn mẫu thay vì độ lệch chuẩn quần thể (ký hiệu σ).

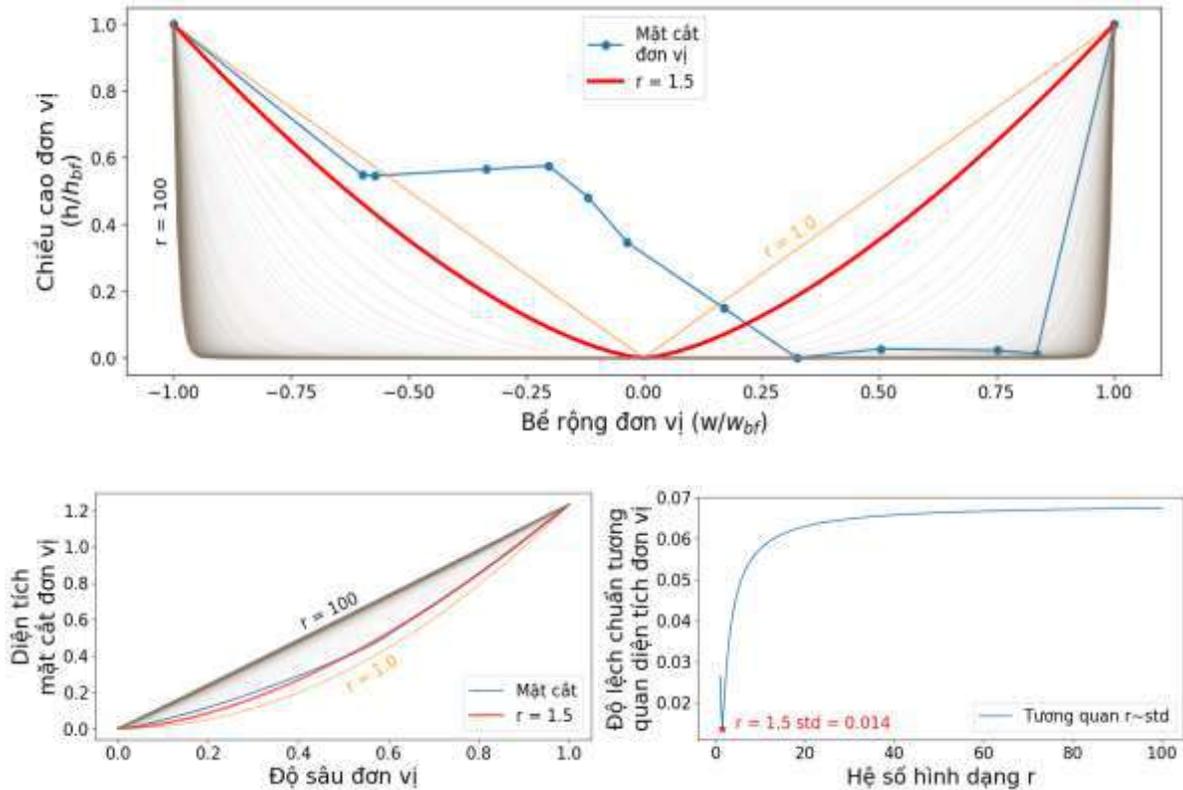
$$D = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Như vậy, mỗi mặt cắt sẽ được đánh giá độ lệch

chuẩn mẫu so với mặt cắt mẫu (tương ứng với chỉ số hình dạng r của mặt cắt) từ đó lựa chọn chỉ số r phù hợp của mỗi mặt cắt. Sau khi đánh giá tổng thể toàn bộ mặt cắt, nghiên cứu lựa chọn phương pháp phân tích đặc trưng bằng việc xác định trung vị và trung bình của chuỗi số liệu cho chỉ số r và chỉ số k của mỗi mặt cắt để đưa ra đặc trưng hình thái mặt cắt cho khu vực miền núi phía Bắc. Chỉ số hình dạng r của mặt cắt được xét trong khoảng từ 1÷100 với bước khoảng cách là 0,5. Như vậy, có gần 200 hình dạng mặt cắt mẫu được đánh giá cho từng mặt cắt để xác định đặc trưng hình thái.

Nghiên cứu xác định tương quan mặt cắt theo đường quan hệ giữa độ sâu và diện tích mặt cắt ướt ($h \sim A$), nhằm đảm bảo tuân thủ các nguyên tắc của thủy lực mặt cắt trong phân tích dòng chảy. Khi ở cùng độ sâu h , diện tích mặt cắt ướt của mặt cắt thực tế được xác định sao cho có giá trị gần nhất với mặt cắt mẫu, đảm bảo độ phù hợp nhất trong việc mô tả đặc điểm thủy lực của dòng chảy. Tương quan $h \sim A$ không chỉ phù hợp cho các mặt cắt đơn giản mà còn hiệu quả đối với các mặt cắt có cấu tạo phức tạp, chẳng hạn như mặt cắt có bãi bồi ở giữa, mặt cắt lệch, hoặc các dạng địa hình không đều khác (hình 4)





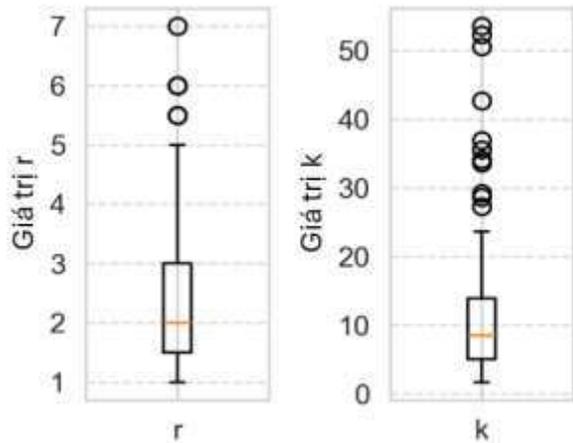
Hình 4: Phương pháp mô hình hóa mặt cắt đặc trưng theo hệ số hình dạng r

Ngoài hệ số hình dạng r, để có thể quy đổi được hình dạng mặt cắt mẫu về hình dạng mặt cắt thực tế, tỷ số giữa bề rộng tràn bờ và chiều sâu tràn bờ (tỷ số k) cũng được xác định tương ứng. Tỷ số này là kết quả đo trực tiếp từ mặt cắt ngang.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả phân tích đặc trưng mặt cắt

Kết quả phân tích cho thấy các mặt cắt ở khu vực miền núi phía Bắc có chỉ số hình dạng r dao động từ 1÷7 (mặc dù có xét tới khoảng từ 1÷100, các giá trị chỉ số hình dạng r ở khu vực miền núi phía Bắc không có hệ số vượt ngưỡng 7), trong đó phổ biến nhất từ 1,5÷3 (chiếm ≈ 50%).



Hình 5: Phân bố tỷ số k và hệ số hình dạng mặt cắt r của 132 mặt cắt

Các mặt cắt có chỉ số hình dạng r nhỏ hơn hoặc bằng 3 chiếm ≈ 75% và chỉ số hình dạng xuất hiện nhiều nhất là r = 2 (chiếm ≈ 25%). Chỉ số r trung bình toàn bộ dữ liệu là r = 2,68 (làm tròn bằng 2,5) và trung vị toàn bộ dữ liệu là 2. Nghiên cứu này đề xuất chỉ số r = 2 là chỉ số hình dạng đặc trưng cho khu vực miền núi

phía Bắc là chỉ số đại diện cho khu vực miền núi phía Bắc. Đối với các lòng dẫn tự nhiên sông suối nhỏ trên khu vực miền núi phía Bắc, nghiên cứu cũng đề xuất phạm vi r dao động

trong khoảng từ 1÷10 để làm cơ sở nghiên cứu và làm giảm thiểu khối lượng cần tính toán cho các nghiên cứu tiếp theo. Kết quả phân bố dữ liệu các mặt cắt thể hiện trong hình 5.

Bảng 2: Thống kê đặc trưng hệ số hình dạng mặt cắt r theo các suối

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

Về tỷ lệ giữa chiều rộng tràn bờ và chiều sâu tràn bờ (tỷ số k), tỷ số này phổ biến dao động từ 5÷15 với trung bình của toàn bộ chuỗi số liệu là 11,3, tuy nhiên giá trị trung vị chỉ đạt 8,5 cho thấy sự phân bố dữ liệu có

nhều điểm ngoại vi. Nghiên cứu đề xuất sử dụng chỉ số trung vị là 8,5 là chỉ số đại diện cho khu vực miền núi phía Bắc. Chi tiết đặc trưng theo từng nhánh suối được thể hiện trong bảng 3.

Bảng 3: Thống kê đặc trưng tỷ số k theo các suối

Suối	Số mặt cắt	Trung bình	Phương sai	Nhỏ nhất	25%	50%	75%	Lớn nhất
Lũng Pô	28,00	14,45	13,20	3,42	5,47	8,00	19,27	52,30
Nà Nhùng	9,00	5,04	1,05	3,60	4,13	4,97	5,85	6,53
Nậm Ly	9,00	7,14	1,84	4,75	5,91	6,38	8,33	10,17
Nam Cường	14,00	15,31	11,74	6,49	9,59	12,42	15,46	53,55
Sông Bạc	18,00	16,97	12,57	3,97	7,05	14,14	20,34	50,56
Pắc Ngòi	12,00	17,02	5,61	9,73	13,15	15,93	20,28	28,60
Xuân Lạc	18,00	7,10	3,88	1,87	4,62	5,56	8,41	16,31
Tà Lùng	24,00	7,40	5,20	1,68	3,28	5,50	10,35	19,37

3.2. Thảo luận

3.2.1. Kết quả nghiên cứu cho khu vực miền núi phía Bắc

Hệ số hình dạng r và tỷ số k cho khu vực miền núi phía Bắc được xác định là các giá trị phổ biến thu được từ tám đoạn sông, suối dựa trên phân tích 132 mặt cắt ngang. Mặc dù số lượng mẫu khá hạn chế trong việc đánh giá một cách khách quan, trong bối cảnh thiếu số liệu khảo sát cho các sông suối nhỏ, những giá trị này có thể hữu ích trong việc ước tính các tham số thủy lực khác như mực nước và vận tốc dòng chảy khi có sẵn các giá trị lưu lượng.

Hệ số hình dạng $r = 2,0$ được xác định cho vùng núi phía Bắc phù hợp với phạm vi ngưỡng từ 1 đến 10 như được thiết lập bởi Allen [10] nhưng thấp hơn một phân bố chuẩn ($\mu = 5, \sigma = 2$). Trong khi hệ số thực nghiệm $k = 8,5$ được xác định trong nghiên cứu của phù hợp với phạm vi các giá trị được ghi nhận trong nghiên cứu trước đây, như được tóm tắt trong Bảng 4. Đáng chú ý, các giá trị r và k cho vùng núi phía Bắc thể hiện xu hướng về phía đầu thấp của phổ so với các nghiên cứu được thực hiện tại các vùng khác trên toàn cầu [11, 12, 13, 10].

Bảng 4: Tỷ số k trong một số nghiên cứu trên thế giới

TT	Tác giả/nhóm tác giả	Khoảng $k = \frac{w_{bf}}{h_{bf}}$	Khu vực
1	Huang và cộng sự [11]	4,27 ÷ 23,75	Sông suối nhỏ miền nam nước Úc
2	Wohl và cộng sự [12]	5,4 ÷ 38,33	Sông suối nhỏ ở New Zealand
3	Wohl và cộng sự [13]	Lấy trung bình: 15,377	Tổng hợp từ nhiều nguồn nghiên cứu trước đây trên toàn thế giới
4	Allen và cộng sự [10]	1,5 ÷ 35; Trung bình là 14	Sông suối nhỏ ở Bắc Mỹ và New Zealand
5	Williams 1978 [3]	6,8 ÷ 61,96; Trung bình 20,6	51 trạm ở Wisconsin, North Dakota, Texas, Idaho, Alaska, Pennsylvania ở Hoa Kỳ và một số trạm ở Canada, Anh.s

3.2.2. Ước tính các tham số thủy lực dựa trên kết quả nghiên cứu

Ý nghĩa của hệ số r và k nằm ở khả năng ước tính các tham số như vận tốc, độ sâu mực nước và bề rộng mực nước ngay cả trong điều kiện số liệu khảo sát mặt cắt ngang bị hạn chế. Đây là các tham số thủy lực được nghiên cứu rộng rãi trên toàn thế giới. Đối với các vùng miền núi thường thiếu số liệu, việc ước tính các tham số này là rất khó thực hiện.

Từ $Q = Av$, thay công thức (1) và (2) và sử

dụng $k = w_{bf}/h_{bf}$ ta có:

$$Q = vk h_{bf}^{1-\frac{1}{r}} h^{1+\frac{1}{r}} \left(\frac{r}{r+1} \right) \quad (4)$$

Theo Manning:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Đối với dòng chảy tự nhiên, chiều rộng của dòng chảy (w) lớn hơn nhiều so với độ sâu mực nước, khi đó người ta giả định rằng các thành bên của suối có lực cản dòng chảy không đáng kể khi so sánh với ma sát đáy. Do

đó bán kính thủy lực R sấp xỉ độ sâu trung bình của dòng chảy [14]. Do coi R là độ sâu trung bình của dòng chảy tương ứng với bề rộng w , ta có diện tích mặt cắt ngang $A_s = Rw = hw \frac{r}{r+1} \rightarrow R = h \frac{r}{r+1}$ (6)

Công thức (5) được viết lại:

$$v = \frac{1}{n} \left(h \frac{r}{r+1} \right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Thay vào công thức (4) ta được:

$$Q = \frac{1}{n} k S^{\frac{1}{2}} h_{bf}^{1-\frac{1}{r}} h^{\frac{5}{3}+\frac{1}{r}} \left(\frac{r}{r+1} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (8)$$

Khi $Q = Q_{bf}$ thì $h = h_{bf}$, do đó công thức (8) được viết lại thành:

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

Từ đó suy ra:

$$h_{bf} = \left[\frac{n Q_{bf}}{k S^{\frac{1}{2}} \left(\frac{r}{r+1} \right)^{\frac{5}{3}}} \right]^{\frac{3}{8}} \quad (10)$$

Như vậy, khi biết lưu lượng tràn bờ, tỷ số k , độ dốc lòng dẫn và hệ số hình dạng r , có thể xác định được h_{bf} . Thay vào công thức (8) với lưu lượng đã biết (từ kết quả tính toán thủy văn) sẽ xác định được chiều sâu mực nước h , thay vào công thức (7) có thể ước tính được vận tốc dòng chảy.

Trong trường hợp thiếu số liệu, lưu lượng tràn bờ có thể được xác định bằng công thức $Q_{bf} = \alpha A^\beta$ dựa trên diện tích lưu vực và tính toán cho một số trạm thủy văn điển hình khu vực lân cận nhằm xác định chỉ số α và β .

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này cung cấp một khung lý thuyết nhằm khái quát hóa hình thái mặt cắt theo hệ số hình dạng r , tỷ số bề rộng tràn bờ và độ sâu tràn bờ k cho các sông suối nhỏ khu vực miền núi phía Bắc, từ đó làm cơ sở ước tính các tham số thủy lực trong điều kiện thiếu số liệu đo đạc về mặt cắt trên khu vực.

Các tham số này đã được triển khai nghiên cứu trên nhiều khu vực trên thế giới, kết quả nghiên cứu cho thấy có sự phù hợp với các nghiên cứu toàn cầu nhưng các chỉ số có xu hướng thấp hơn các khoảng đã được ghi nhận. Điều này phản ánh đặc điểm khu vực đã tác động đến đặc trưng hình dạng khu vực miền núi phía Bắc và cần có những nghiên cứu chuyên sâu nhằm thể hiện mối quan hệ chặt chẽ giữa đặc điểm lưu vực và hình dạng mặt cắt trong khu vực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Strahler, Arthur N., "Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology," *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 38, no. 6, p. 913-920, 1957. DOI:10.1029/tr038i006p00913.
- [2] Vannote, Robin L., Minshall, G. Wayne, Cummins, Kenneth W., Sedell, James R. and Cushing, Colbert E., "The River Continuum Concept," *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 37, no. 1, p. 130-137, 1980. DOI:10.1139/f80-017.
- [3] Williams, Garnett P., "Bank-full discharge of rivers," *Water Resources Research*, vol. 14, no. 6, pp. 1141-1154, 1978. DOI:10.1029/wr014i006p01141.
- [4] Trampus, S. M., Huzurbazar, S. and McElroy, B., "Empirical assessment of theory for bankfull characteristics of alluvial channels," *Water Resources Research*, vol. 50, no. 12, p. 9211-9220, 2014. DOI:10.1002/2014wr015597.
- [5] G. V. Wilkerson, D. R. Kandel, L. A. Perg, W. E. Dietrich, P. R. Wilcock and M. R. Whiles, "Continental-scale relationship between bankfull width and drainage area for single-thread alluvial channels: BANKFULL WIDTH AND DRAINAGE AREA RELATIONSHIP," *Water Resources Research*, vol. 50, no. 2, pp. 919-936, feb/2014. DOI:10.1002/2013wr013916.
- [6] Lawrence, Dingman, S., "Analytical derivation of at-a-station hydraulic-geometry relations," *Journal of Hydrology*, vol. 334, no. 1-2, pp. 17-27, 2007. DOI:10.1016/j.jhydrol.2006.09.021.
- [7] Chow, V.T, Open—Channel Hydraulics, New York: McGraw-Hill, 1959.
- [8] Trần Mạnh Trường, "Báo cáo tổng hợp: Nghiên cứu các giải pháp ứng phó với một số thiên tai chính gây mất ổn định tự nhiên khu vực hồ Ba Bể phục vụ phát triển kinh tế xã hội của địa phương," Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, Hà Nội, 2023.
- [9] Nguyễn Thế Toàn, "Nghiên cứu phương pháp cảnh báo lũ quét cho lưu vực nhỏ miền núi và áp dụng thử nghiệm cho 2 lưu vực Nậm Ly và Nà Nhùng tỉnh Hà Giang," Trường Đại học Thủy lợi, Hà Nội, 2023. Địa chỉ: <https://www.tlu.edu.vn/tin-tuc/nghien-cuu-phuong-phap-can-bao-lu-quet-20761>.
- [10] Allen, George H., Pavelsky, Tamlin M., Barefoot, Eric A. and et al., "Similarity of stream width distributions across headwater systems," *Nature Communications*, vol. 9, no. 1, 2018. DOI:10.1038/s41467-018-02991-w.
- [11] Huang, H.Q. and Nanson, Gerald C., "Vegetation and channel variation; a case study of four small streams in southeastern Australia," *Geomorphology*, vol. 18, no. 3-4, p. 237-249, 1997. DOI:10.1016/S0169-555X(96)00028-1.
- [12] Wohl, Ellen E. and Wilcox, Andrew, "Channel geometry of mountain streams in New Zealand," *Journal of Hydrology*, vol. 300, no. 1-4, p. 252-266, 2005. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.06.006.
- [13] Wohl, Ellen and Merritt, David M., "Reach-scale channel geometry of mountain streams," *Geomorphology*, vol. 93, no. 3-4, p. 168-185, 2008. DOI:10.1016/j.geomorph.2007.02.014.
- [14] Katopodes, Nikolaos D., "Long Waves," in *Free-Surface Flow*, Delphi, Elsevier, 2019, p. 306. DOI:10.1016/b978-0-12-815487-8.00006-8.