

ỨNG DỤNG MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP ƯỚC TÍNH THÔNG SỐ TỐI ƯU CHO MÔ HÌNH THỦY VĂN PHÂN BỐ IMECHTV2

Nguyễn Thị Hằng, Nguyễn Chính Kiên, Dương Thị Thanh Hương
Viện Cơ học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Tóm tắt

Để mô phỏng lại quá trình tạo dòng chảy từ mưa, các mô hình thủy văn thường sử dụng một bộ gồm nhiều thông số khác nhau phù hợp với từng lưu vực nhất định. Trong bài báo này, mô hình thủy văn thông số phân bố ImechTV2 tích hợp 06 phương pháp tối ưu được sử dụng để áp dụng tính toán cho các lưu vực thủy văn Bản Chát, Bản Vẽ và PleiKrông, từ đó tự động dò tìm các bộ thông số phù hợp nhất cho từng lưu vực. Kết quả hiệu chỉnh và kiểm định mô hình cho thấy khả năng ứng dụng các phương pháp dò tìm tối ưu này đạt hiệu quả cao, giảm công sức tính toán của dự báo viên, nâng cao chất lượng các bản tin dự báo.

Từ khóa: Mô hình thủy văn thông số phân bố; ImechTV2; Tự động dò tìm.

Abstract

Methods for optimizing parameters of ImechTV2 distributed hydrological model

To simulate the process of runoff from rain, hydrological models often use a set of many different parameters, depending on conditions of each basin. In this study, the ImechTV2 distributed hydrological model integrated six optimization methods was applied for Ban Chat, Ban Ve and PleiKrong basins, thereby automatically detecting the most suitable parameters for each basin. Results of model calibration and variation showed that the application of these optimal detection methods was highly effective, reduced the forecasters' work and improved the quality of forecast reports.

Keywords: Distributed hydrological model; ImechTV2; Near - optimal detection method.

1. Đặt vấn đề

Có rất nhiều phương pháp dự báo đã được nghiên cứu và phát triển dựa trên mô hình vật lý và toán học, bên cạnh đó cùng với sự phát triển mạnh mẽ của các ngôn ngữ lập trình, máy tính, công nghệ viễn thám và GIS, các mô hình mưa - dòng chảy xuất hiện ngày càng nhiều và cho kết quả mô phỏng ngày càng chính xác. Trong mô hình thủy văn thường bao gồm nhiều thông số đặc trưng khác nhau và đối với mỗi lưu vực khác nhau thì các thông số này được hiệu chỉnh sao cho

đường quá trình lưu lượng quan trắc và tính toán là phù hợp nhất có thể. Do mỗi thông số lại có mức độ ảnh hưởng khác nhau vì vậy để tìm được bộ thông số tối ưu tốn rất nhiều thời gian, công sức và tùy thuộc vào kinh nghiệm của dự báo viên.

Tại Viện Cơ học, mô hình thủy văn phân bố ImechTV2 sau một thời gian cải tiến (được viết lại theo lý thuyết của mô hình Marine) với các tính năng mới như: Gán mưa theo 4 phương pháp (Mưa trên ô lưới, phân bố theo đa giác Thiessen, nội suy 2D Kriging, phân bố mưa theo

Nghiên cứu

ngược đảo khoảng cách), nâng 4 hướng dòng chảy thành 8 hướng; Tự động xử lý GIS không dùng phần mềm thứ 3 như ArcView (Fill DEM - thuật toán Planchon và Darboux, Flow Direction, Flow Accumulation); Tính toán song song trên CPU và GPU giảm thời gian tính giúp bài toán có thể chia ô lưới mịn,... thì gần đây cũng đã phát triển thêm module dò tìm tối ưu các tham số. Việc phát triển này là cần thiết để có thể dò tìm được khối lượng lớn các tham số tương ứng với mô hình thủy văn thông số phân bố được xây dựng.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình thủy văn thông số phân bố ImechTV2

Để mô phỏng quá trình hình thành dòng chảy sinh ra bởi mưa trên lưu vực dựa trên phương trình bảo toàn khối lượng [1]:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + u \cdot \text{grad}(V) = P_0$$

Với giả thiết vận tốc của dòng chảy trao đổi giữa các ô lưới vuông:

$$\|u\| = \sqrt{S} \cdot \frac{H^{2/3}}{K_m}$$

Bảng 1. Các thông số của mô hình ImechTV2

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Giới hạn dưới	Giới hạn trên
Sức cản bề mặt	n	-	0,01	0,2
Độ rỗng đất	Eta	-	0,05	0,5
Cột nước mao dẫn của mặt ướt	Sf	mm	30	500
Độ dẫn thủy lực	Kga	mm/giờ	0	150
Hệ số thấm	PerInf	-	0	100
Độ ẩm của đất	Theta	-	0	1

Tùy theo đặc trưng của từng ô lưới mà khoảng giá trị của các tham số cần dò tìm cũng được thu hẹp tương ứng theo bảng tiêu chuẩn trên.

Ta có phương trình dưới dạng sai phân:

$$\Delta H + \sum_{j=1}^8 \frac{H_j^{5/3}}{K_m} \cdot \sqrt{S} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} = P_0 \cdot \Delta t$$

Trong đó:

- S: độ dốc được tính theo 8 hướng;
- Km: hệ số nhám Manning;
- Δx: chiều rộng ô lưới;
- Δt: Bước thời gian tính từ thời điểm t1 đến t2;
- j: Hướng chảy của ô lưới (j = 1 ÷ 8);
- H: Độ sâu mực nước của ô lưới tính;
- ΔH: Sự thay đổi mực nước của ô lưới tính từ thời điểm t1 đến t2. Từ đó tính được tổng lưu lượng ra khỏi lưu vực:

$$Q = \sum \Delta q = \sum (\Delta H \cdot \Delta x \cdot \Delta x - q_{\text{thấm}})$$

với $q_{\text{thấm}}$ là lưu lượng thấm mỗi ô lưới được tính theo mô hình Green-Ampt.

Các thông số được tự động hiệu chỉnh trong mô hình ImechTV2

Dựa trên tiêu chuẩn quốc gia TCVN 9845:2013 về “Tính toán các đặc trưng dòng chảy lũ” và đối sánh với bản đồ sử dụng đất và thảm phủ tại lưu vực nghiên cứu, các thông số được dò tìm của mô hình ImechTV2 được liệt kê dưới Bảng sau:

2.2. Phương pháp giải bài toán ước tính hệ số tối ưu

Xét hàm mục tiêu là hàm bình phương tối thiểu [2]:

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2$$

Trong đó:

- Q_i : Giá trị lưu lượng tính toán = $G(R_j, TS_k)$: Hàm của giá trị mưa đầu vào R_j và các thông số TS_k bị chặn trong khoảng cho trước;

- \hat{Q}_i : Giá trị lưu lượng thực đo.

Như vậy để giá trị tính toán gần sát với các giá trị thực đo thì giá trị hàm F phải tiến về cực tiểu $F = 0$.

Đối với các hàm F , tùy thuộc vào tính chất của nó mà người ta sử dụng các phương pháp khác nhau tìm cực trị tương ứng. ImechTV2 đã áp dụng một số phương pháp giải bài toán tối ưu hóa không dùng đạo hàm được chia thành ba nhóm [3, 4, 5]:

- Phương pháp tìm kiếm (Phương pháp ô vuông, phương pháp Rosenbrock);

- Phương pháp quy hoạch toán học (Phương pháp Hooke-Jeeves, phương pháp Nelder-Mead);

- Các thuật toán tối ưu dựa trên nền tảng của sự tiến hóa (Giải thuật di truyền, phương pháp tiến hóa xáo trộn phức hợp SCE).

2.2.1. Phương pháp ô vuông

Có nhiều phương pháp lựa chọn giá trị tối ưu của thông số nhưng dễ hiểu hơn cả và tính toán vất vả hơn cả là phương pháp ô vuông (Phương pháp lưới). Chia miền xác định của từng thông số thành các phần bằng nhau. Với mỗi bộ điểm tại các

nút xác định một bộ thông số của mô hình. Thực hiện n lần tính toán theo mô hình để tìm miền có giá trị nhỏ nhất của hàm mục tiêu. Quá trình cứ như thế tiếp diễn cho đến khi bước dò tìm nhỏ hơn một vô cùng bé chọn trước. Phương pháp này chỉ cho phép phát hiện cực trị địa phương đủ rộng hơn mắt lưới, do đó mặc dù đã chấp nhận khối lượng tính toán khổng lồ nhưng vẫn có khả năng rơi vào cực trị địa phương.

2.2.2. Phương pháp Rosenbrock

Phương pháp Rosenbrock là bước phát triển của phương pháp độ dốc, thích hợp với dạng hàm mục tiêu không tính được đạo hàm riêng phần. Chọn sơ bộ mỗi thông số một giá trị hợp lý nào đó, tính giá trị của hàm mục tiêu ứng với các giá trị của thông số được chọn lần đầu. Chỉ thay đổi giá trị của một thông số, giữ nguyên tất cả giá trị của các thông số còn lại, tính giá trị mới của hàm mục tiêu. Nếu hàm mục tiêu có giá trị nhỏ hơn tại vị trí cũ, chọn ngay giá trị của thông số vừa tính thử làm giá trị chính thức, còn ngược lại thay đổi giá trị thông số đó theo quy luật tịnh tiến. Lặp lại cho từng thông số và đánh giá hàm mục tiêu sau mỗi lần thực hiện với tất cả các thông số, dừng thực hiện khi bước thay đổi các thông số đều nhỏ hơn 1 giá trị cho trước.

2.2.3. Phương pháp Hooke-Jeeves

Thủ tục cơ bản của thuật toán Hooke-Jeeves là thủ tục dò tìm địa phương: Xuất phát từ một điểm $x \in R^n$ theo $2n$ hướng dọc theo n trục tọa độ với độ dài bước h tìm điểm x' có giá trị hàm mục tiêu $f(x')$ tốt hơn $f(x)$.

2.2.4. Phương pháp Nelder-Mead

Thuật toán Nelder-Mead sử dụng một mô hình hình học gọi là simplex để

Nghiên cứu

di chuyển đi mò điếm tối ưu trong không gian tìm kiếm nên nó được gọi là “Simplex search method”. Các simplex n-chiều này được biến dạng nhờ 3 phép biến đổi: Đối xứng gương, phép co, phép dãn dựa vào 4 tham số cần xác định đó là: Hệ số phản xạ, hệ số dãn C, hệ số co D và hệ số thu hẹp E.

2.2.5. Giải thuật di truyền

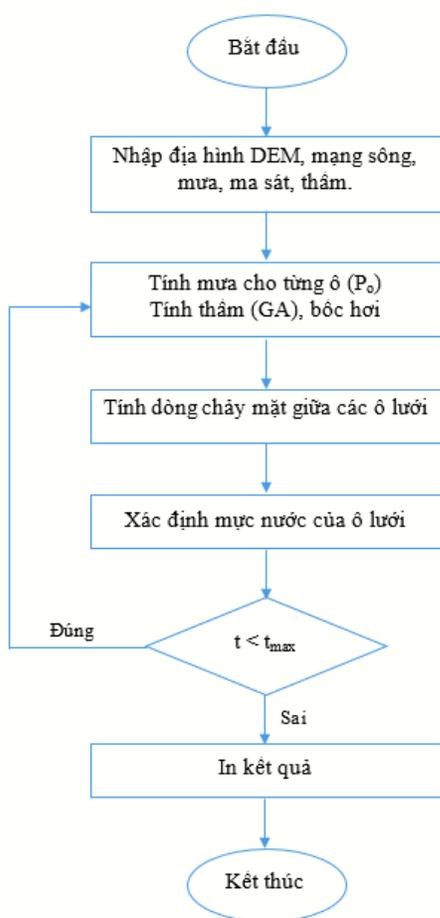
Giải thuật Di truyền (Genetic Algorithms - GA) áp dụng quá trình tiến hóa tự nhiên (vận dụng các nguyên lý của tiến hóa như di truyền, đột biến, chọn lọc tự nhiên và trao đổi chéo) để giải các bài

toán tối ưu trong thực tế (từ tập các lời giải có thể ban đầu thông qua nhiều bước tiến hóa hình thành các tập hợp mới với lời giải tốt hơn và cuối cùng sẽ tìm được lời giải gần tối ưu) [8].

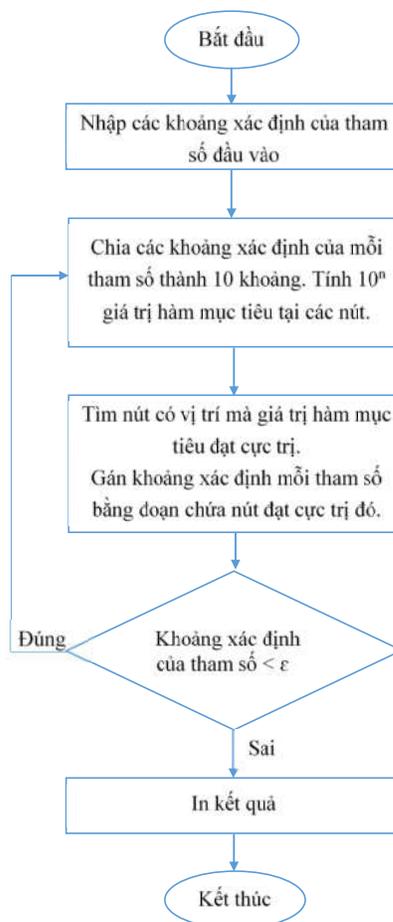
2.2.6. Phương pháp tiến hóa xáo trộn phức hợp

Phương pháp tiến hóa xáo trộn phức hợp (Shuffled Complex Evolution - SCE): Kết hợp giữa phương pháp Downhill Simplex với các khái niệm của phương pháp tìm kiếm ngẫu nhiên có kiểm soát; Sự xáo trộn cạnh tranh; Xáo trộn các phức hợp.

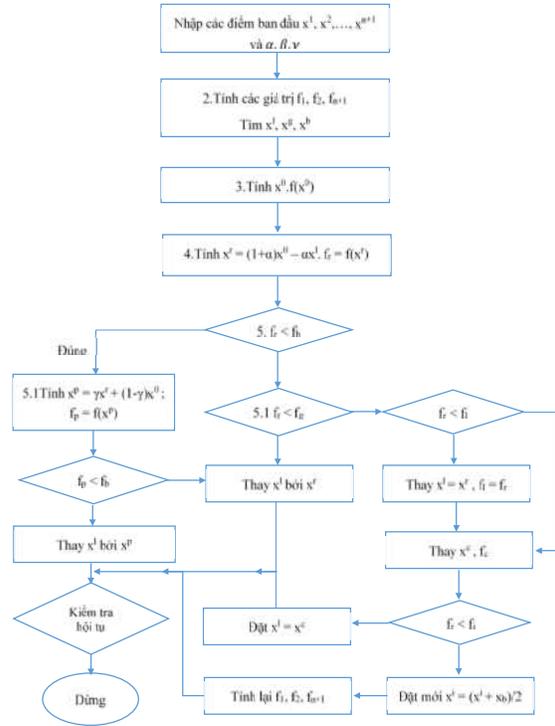
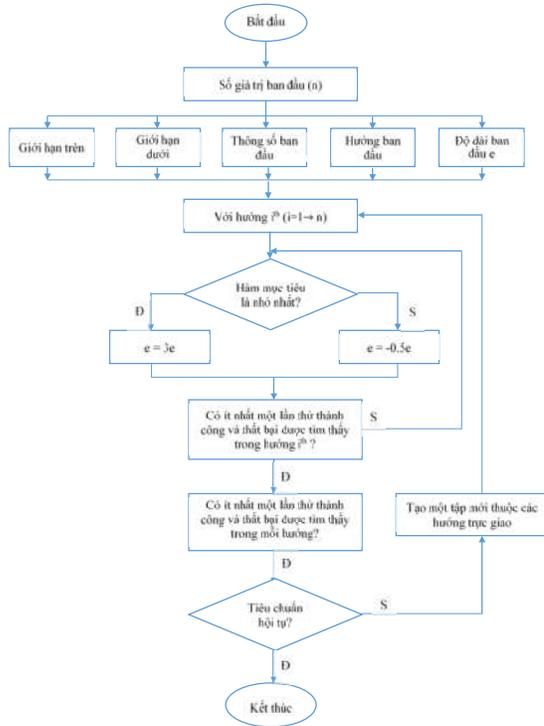
2.3. Sơ đồ khối chương trình tính toán



a. Sơ đồ khối mô hình ImechTV2

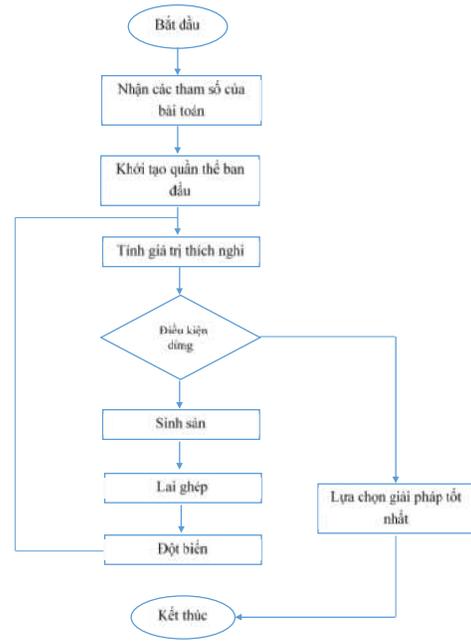
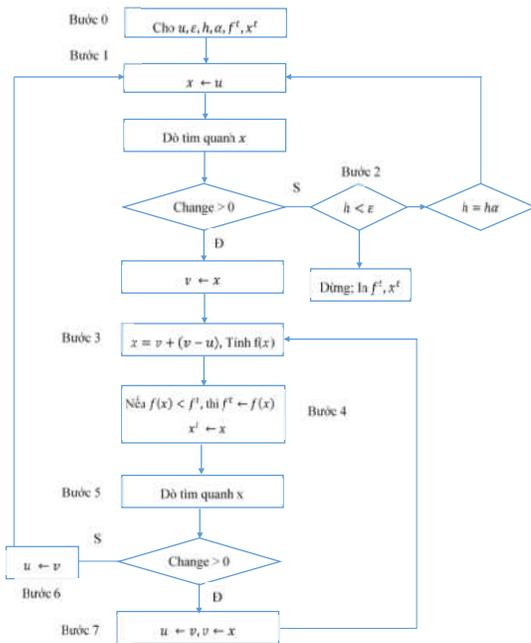


b. Sơ đồ khối thuật toán ô vuông



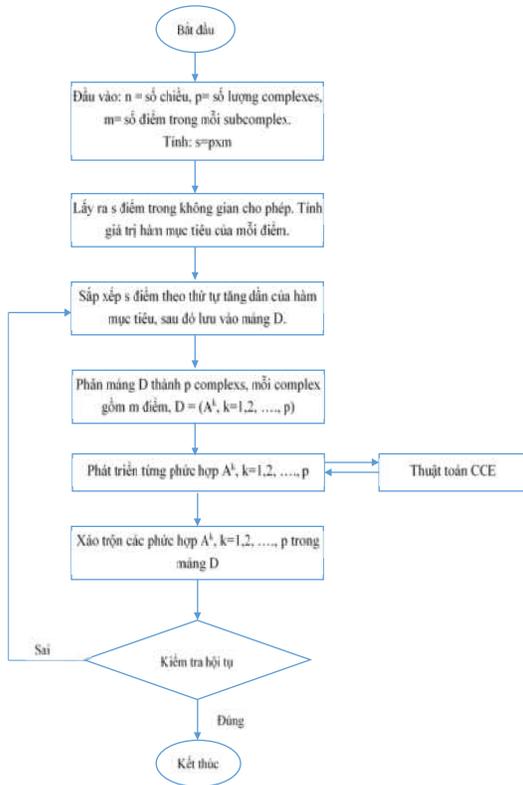
c. Sơ đồ khối thuật toán Rosenbrock

d. Sơ đồ khối thuật toán Hooke-Jeeves

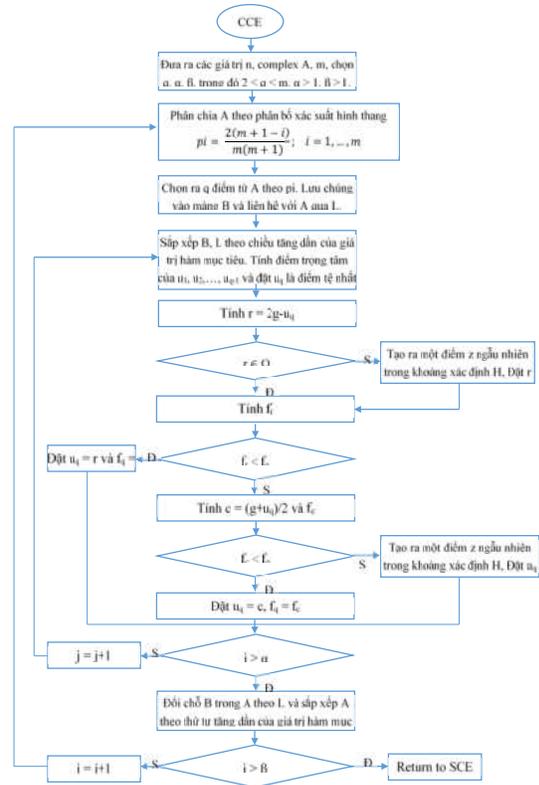


e. Sơ đồ khối thuật toán Nelder-Mead

f. Sơ đồ khối giải thuật di truyền



g.1. Sơ đồ khối thuật toán SCE



g.2. Sơ đồ khối module CCE của thuật toán SCE

Hình 1: Sơ đồ khối mô hình thủy văn ImechTV2 và các thuật toán dò tìm tối ưu sử dụng

3. Kết quả áp dụng và thảo luận

3.1. Lưu vực nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, 3 lưu vực tính toán bao gồm: Lưu vực Bản Chát đại diện vùng miền núi phía Bắc, lưu vực Bản Vẽ đại diện miền Trung và lưu vực PleiKrông đại diện cho vùng Tây Nguyên của Việt Nam được lựa chọn để tính toán. Đây là các lưu vực có đặc điểm địa hình cũng như đặc điểm lũ khác nhau và có đầy đủ số liệu phục vụ cho tính toán thử nghiệm.

Lưu vực thủy văn Bản Chát bao gồm gần như toàn bộ lưu vực sông Nậm Mu, bắt nguồn từ vùng núi cao 1.500 - 3.300 m ở phía Bắc huyện Tam Đường giáp ranh giới tỉnh Lào Cai, chảy qua hai huyện Tân Uyên, Than Uyên, có tổng chiều dài 150 km. Diện tích lưu vực khoảng 2.000 km².

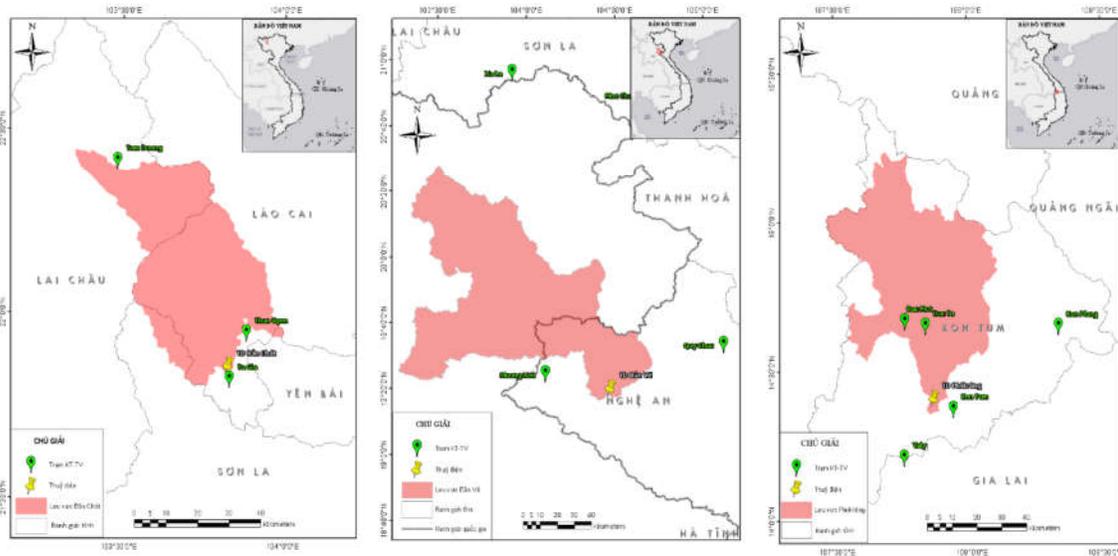
Lưu vực thủy văn Bản Vẽ có diện tích khoảng 8.690 km² bao gồm cả phần diện tích của Lào và Việt Nam. Phần lớn diện tích nằm trên lãnh thổ của đất nước Lào. Dòng chảy chính của lưu vực là dòng Nậm Nơn, đây là một trong hai nhánh sông chính của lưu vực sông Cả.

Lưu vực thủy văn PleiKrông phần lớn thuộc lưu vực sông Pô Kô với chiều dài 121 km, diện tích lưu vực khoảng 3.220 km², bắt nguồn từ núi cao Ngọc Linh có đỉnh cao 2.598 m.

Số liệu địa hình được lấy từ bản đồ cao độ số DEM, từ trang web của Cơ quan Thám hiểm Hàng không Vũ trụ Nhật Bản (JAXA) với độ phân giải 30 × 30 m [9]. Bản đồ thảm phủ, sử dụng đất có độ phân giải 10 × 10 m với 20 lớp chi tiết, là sản phẩm hợp tác giữa

ESRI và Microsoft năm 2020 [10]. Số liệu khí tượng thủy văn (số liệu các trạm mưa trong lưu vực) được lấy từ nguồn số liệu của Trung tâm dự báo Khí tượng

thủy văn Quốc gia, Tổng cục Khí tượng thủy văn. Số liệu dòng chảy ra khỏi lưu vực là lưu lượng vào các hồ chứa tương ứng của mỗi lưu vực.



a) Lưu vực Bản Chát b) Lưu vực Bản Vẽ c) Lưu vực PleiKrông

Hình 2: Các lưu vực nghiên cứu

3.2. Kết quả tính toán

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã chọn các trận lũ điển hình của các năm 2018, 2020 và 2021 để hiệu chỉnh và kiểm

định cho mô hình ImechTV2. Tùy thuộc vào thời điểm các trận lũ xảy ra của mỗi lưu vực mà khoảng thời gian nhóm tác giả lựa chọn hiệu chỉnh và kiểm định được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Khoảng thời gian hiệu chỉnh và kiểm định mô hình ImechTV2

Lưu vực	Hiệu chỉnh	Kiểm định
Bản Chát	06/07/2020 - 18/07/2020	07/08/2021 - 22/08/2021
Bản Vẽ	13/08/2018 - 22/08/2018	21/07/2021 - 31/07/2021
PleiKrông	01/10/2020 - 14/10/2020	20/09/2021 - 30/09/2021

Hệ số hiệu quả (Nash Sutcliffe Efficiency - NSE) được sử dụng để đánh giá mức độ tương quan giữa giá trị thực đo và tính toán từ mô hình.

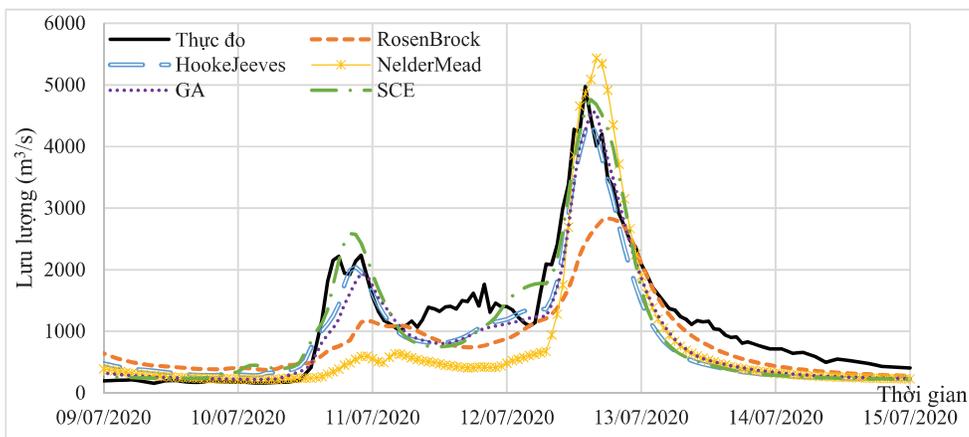
• **Kết quả hiệu chỉnh**

Hình 3, 4 và 5 là kết quả đường quá trình lưu lượng tính toán và thực đo tại các lưu vực Bản Chát, Bản Vẽ và PleiKrông với các phương pháp dò tìm tự động.

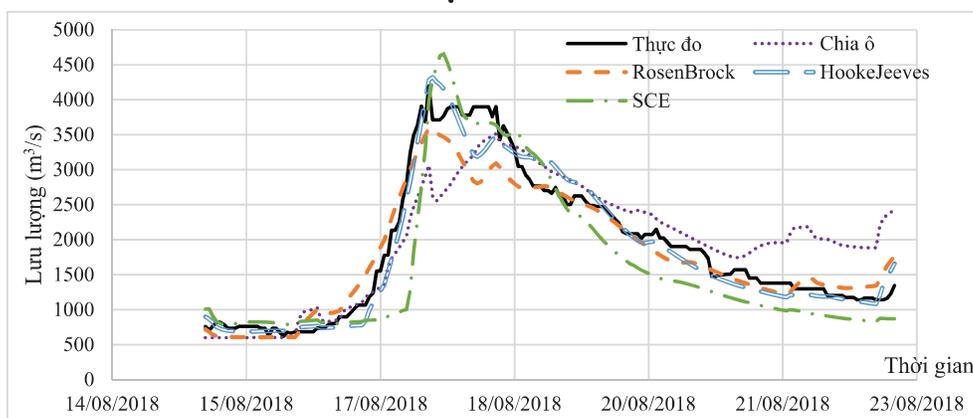
Từ Hình 3, nhận thấy ngoại trừ phương pháp Nelder-Mead các phương

pháp khác đều cho kết quả đường lưu lượng tính toán và thực đo đồng pha. Về biên độ, phương pháp SCE cho kết quả mô phỏng tốt nhất với đỉnh lũ đạt 4.761 m³/s (sai số 4 % so với đỉnh lũ thực tế), phương pháp Rosenbrock cho kết quả kém nhất với đỉnh lũ đạt 3.965 m³/s (sai số 20,1 % so với đỉnh lũ thực tế), các phương pháp còn lại cho kết quả khá phù hợp với giá trị lưu lượng thực đo.

Nghiên cứu



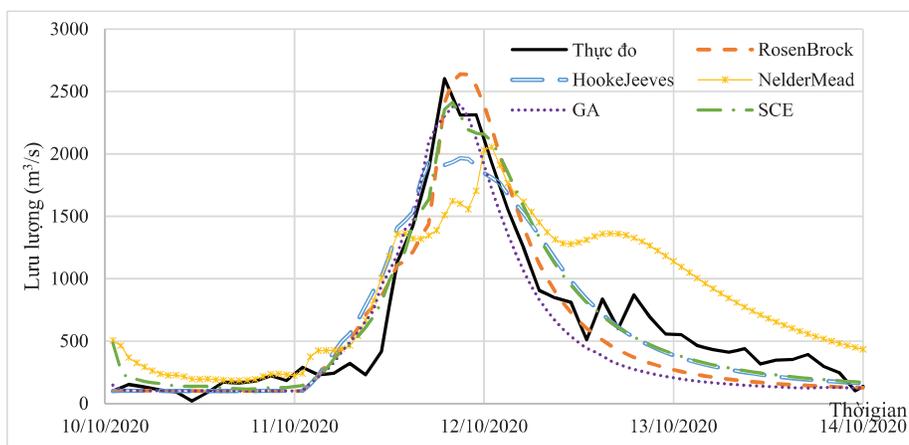
Hình 3: Kết quả hiệu chỉnh đường quá trình lưu lượng tính toán và thực đo lưu vực Bản Chất



Hình 4: Kết quả hiệu chỉnh đường quá trình lưu lượng tính toán và thực đo lưu vực Bản Vẽ

Kết quả hiệu chỉnh lưu vực Bản Vẽ cho thấy phương pháp Hooke-Jeeves có pha, biên độ phù hợp với đường giá trị thực đo nhất (lưu lượng đỉnh lũ đạt 4.320 m^3/s với sai số đỉnh lũ là 3 % so

với thực tế), phương pháp chia ô cho kết quả có sai số biên độ lớn nhất (lưu lượng đỉnh lũ chỉ đạt 3.512 m^3/s với sai số đỉnh lũ lên tới 16 %) trong các phương pháp còn lại.



Hình 5: Kết quả hiệu chỉnh đường quá trình lưu lượng tính toán và thực đo lưu vực PleiKrông

Kết quả hiệu chỉnh lưu vực PleiKrông ở Hình 5 cho thấy các phương pháp hiệu chỉnh đều cho kết quả khá phù hợp với thực tế về đỉnh lũ, về quá trình lên xuống và dòng ngầm, ngoại trừ phương pháp

Nelder-Mead cho kết quả về pha và biên độ kém hơn các phương pháp còn lại.

Dưới đây là bảng thống kê kết quả hệ số NSE ứng với mỗi phương pháp dò tìm trên mỗi lưu vực tính toán.

Bảng 3. Kết quả hiệu chỉnh của các phương pháp tự động dò tìm thông số

Bảng kết quả NSE		Chia ô	Rosenbrock	Hooke-Jeeves	Nelder-Mead	GA	SCE
Bản Chát	Số lần tính	1.283	1.215	192	665	10.002	1.242
	NSE	0,43	0,55	0,91	0,71	0,91	0,92
Bản Vẽ	Số lần tính	512	1.215	1.962	935	1.503	6.980
	NSE	0,74	0,91	0,94	0,14	0,39	0,81
PleiKrông	Số lần tính	1.242	1.414	818	1084	4.503	7.662
	NSE	0,36	0,88	0,87	0,57	0,87	0,92

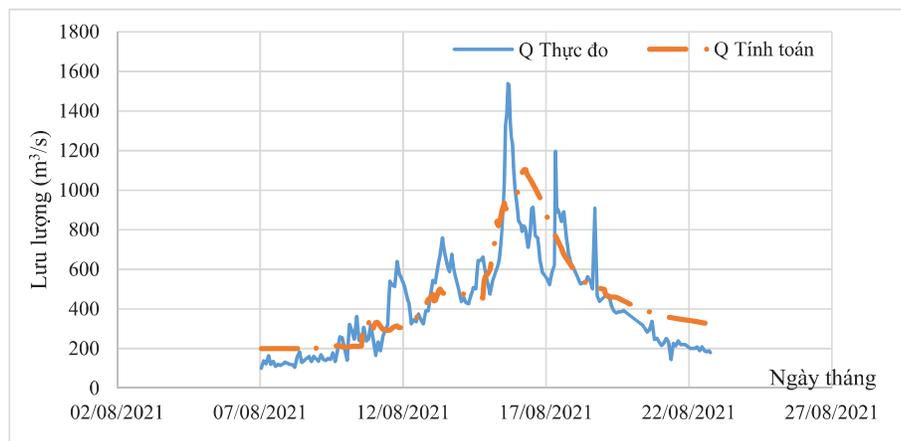
Đối với một số phương pháp dò tìm tự động có chỉ số NSE < 0,5 sẽ không được thể hiện ở hình vẽ kết quả hiệu chỉnh như phương pháp chia ô trong kết quả hiệu chỉnh lưu vực Bản Chát ở Hình 3. Lưu vực Bản Vẽ có hai phương pháp không đạt là Nelder-Mead và GA sẽ không được thể hiện ở Hình 4. Ở lưu vực PleiKrông có phương pháp chia ô không được thể hiện ở Hình 5.

Dựa vào Bảng 3, thấy rằng bộ thông số có kết quả tốt nhất (dựa vào chỉ số NSE) có được bằng các thuật toán tự động dò tìm đối với lưu vực là khác nhau. Với lưu vực Bản Chát là bộ thông số của thuật toán SCE, với lưu vực Bản Vẽ bộ thông

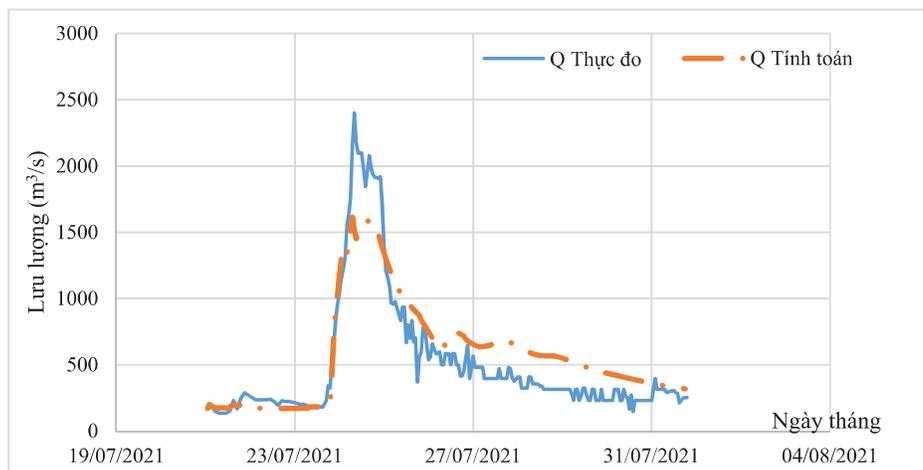
số tốt nhất là thuật toán HookeJeeves và bộ thông số của thuật toán SCE cho lưu vực PleiKrông.

• **Kết quả kiểm định**

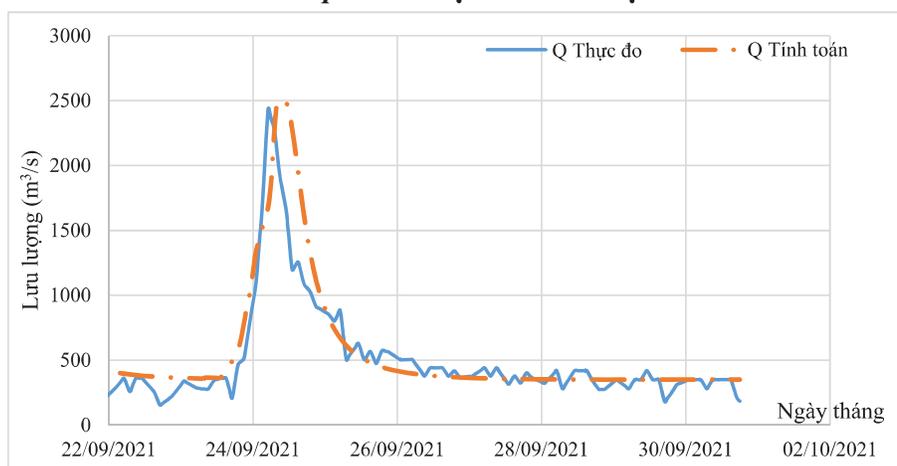
Sau khi có được bộ thông số tốt nhất từ kết quả hiệu chỉnh, thực hiện tính các phương án kiểm định cho các lưu vực với các trận lũ đã được xác định trong Bảng 2. Hình 6, 7 và 8 là kết quả so sánh giữa đường lưu lượng tính toán và thực đo tại 3 lưu vực Bản Chát, Bản Vẽ, PleiKrông. Bảng 4 thể hiện chỉ số NSE đánh giá kết quả giữa các đường lưu lượng tính toán và thực đo này, kết quả đạt mức khá và tốt cho thấy mức độ tin cậy của bộ thông số mô hình sau khi hiệu chỉnh.



Hình 6: Kết quả kiểm định cho lưu vực Bản Chát



Hình 7: Kết quả kiểm định cho lưu vực Bản Vẽ



Hình 8: Kết quả kiểm định cho lưu vực PleiKrông

Bảng 4. Kết quả kiểm định của các lưu vực

Lưu vực	Bản Chất	Bản Vẽ	PleiKrông
NSE	0,67	0,78	0,73

Nhận xét:

Việc sử dụng các phương pháp tự động dò tìm bộ thông số của phần mềm ImechTV2 đem lại nhiều kết quả. Mỗi phương pháp dò tìm có một ưu điểm khác nhau như phương pháp Rosenbrock là phương pháp chạy cho kết quả trong thời gian ngắn nhất, sẽ phù hợp khi cần tính toán trong bối cảnh không có nhiều thời gian. Phương pháp SCE thường cho kết quả tốt tuy nhiên cần thời gian tính toán lâu hơn các phương pháp còn lại.

Về kết quả hiệu chỉnh của IMECHTV2, phương pháp SCE thường cho kết quả tốt nhất (NSE = 0,92 ở lưu vực Bản Vẽ và PleiKrông), tiếp đó là đến phương pháp Hooke-Jeeves; Phương pháp Nelder-Mead và phương pháp ô vuông tỏ ra kém hiệu quả nhất. Nhìn chung các phương pháp thường cho kết quả tốt hơn giá trị chưa hiệu chỉnh, tuy nhiên trong một số ít trường hợp cho kết quả NSE kém hơn.

Các chỉ số đánh giá cho thấy kết quả kiểm định ở mức khá và tốt cho thấy độ tin cậy của bộ thông số dò tìm được ở bước hiệu chỉnh.

4. Kết luận

Nội dung nghiên cứu của bài báo được thể hiện qua các tính toán dòng chảy tại 3 lưu vực bằng mô hình thủy văn thông số phân bố ImechTV2 kết hợp sử dụng 6 phương pháp ước tính thông số tối ưu. Kết quả hiệu chỉnh và kiểm định qua các trận lũ cho các lưu vực Bản Chát, Bản Vẽ, PleiKrông tại các cơn lũ năm 2018, 2020 và 2021 đạt kết quả tốt, phương pháp dò tìm thông số tự động cho kết quả chỉ số NSE cao nhất ở các lưu vực khác nhau là khác nhau. Xét về thời gian tính: Phương pháp Rosenbrock nhanh nhất và phương pháp SCE chậm nhất. Trong 3 lưu vực, phương pháp SCE thường cho kết quả tính toán tốt nhất (chỉ số NSE cao nhất). Dựa trên tiêu chí “chỉ phí tính toán”: Kết quả NSE của phương pháp Hooke-Jeeves cũng gần tương đương với SCE, nhưng thời gian tính toán là thấp hơn đáng kể (thường chỉ mất một nửa thời gian khi tính SCE). Qua việc thử nghiệm tại nhiều lưu vực có các đặc trưng khác nhau với các cơn lũ khác nhau cho thấy khả năng áp dụng việc dò tìm thông số tối ưu tự động bằng các thuật toán hiện đại đạt kết quả tốt so với các phương pháp dò tìm thủ công trước đây (thử đúng - sai, kinh nghiệm, tham chiếu tương đương), giảm nhiều công sức tính toán của dự báo viên đồng thời cũng nâng cao chất lượng dự báo dòng chảy từ mưa trên lưu vực.

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của đề tài Cơ sở cấp Viện Cơ học năm 2022 “*Ứng dụng một số phương pháp ước tính thông số tối ưu cho mô hình thủy văn phân bố*”, trong việc thực hiện và công bố nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Đề tài cấp Nhà nước KC-08-13. *Nghiên cứu cơ sở khoa học cho các giải pháp tổng thể dự báo phòng tránh lũ lụt ở đồng bằng sông Hồng*. Thuộc Chương trình Bảo vệ môi trường và Phòng tránh thiên tai.

[2]. Nguyễn Đức Hạnh, Hoàng Thị Mỹ Linh (2013). *Tối ưu hóa một số thông số của mô hình mưa dòng chảy sử dụng phương pháp SCE*. Tạp chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội, Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Tập 29, số 2S, 112 - 120.

[3]. Nguyễn Chính Kiên, Nguyễn Thị Hằng (2020). *Thử nghiệm một số phương pháp số giải bài toán ước tính thông số tối ưu cho mô hình thủy văn*. Hội nghị 45 năm thành lập Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

[4]. Nguyễn Chính Kiên, Dương Thị Thanh Hương, Nguyễn Thị Hằng (2021). *Nghiên cứu phương pháp hiệu chỉnh quan hệ thể tích - mực nước của hồ chứa*. Tạp chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường, số 37, 85 - 94.

[5]. Lê Xuân Toàn (2015). *Một số phương pháp tối ưu không dùng đạo hàm*. Luận văn thạc sĩ toán học.

[6]. Lê Văn Nghinh (2005). *Mô hình toán thủy văn*. Giáo trình, Đại học Thủy lợi, 11 - 56.

[7]. Trần Thu Hà, Dương T. T. Hương (2004). *Mô hình mưa rào dòng chảy cho hệ thống sông Thái Bình*. Tuyển tập công trình khoa học Hội nghị Cơ học thủy khí toàn quốc, Hà Tiên, tháng 7.

[8]. Nguyễn Chính Kiên (2017). *Thử nghiệm ứng dụng mạng neuron nhân tạo trong dự báo thủy văn và thủy lực*. Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X, Hà Nội, tháng 12.

[9]. https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/fnf_e.htm.

[10]. <https://livingatlas.arcgis.com/landcover/>.

Ngày nhận bài: 11/8/2022; Ngày chấp nhận đăng: 27/9/2022