

Bài báo khoa học

Phát triển mô hình thủy văn tham số phân bố MARINE trong bài toán dự báo lũ, áp dụng thí điểm cho lưu vực sông Nậm Mu

Bùi Đình Lập^{1*}, Trần Hồng Thái², Phạm Thị Hương Lan³

¹ Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn quốc gia; Nghiên cứu sinh của Trường Đại học Thủy Lợi; lapbuidinh@gmail.com

² Tổng cục Khí tượng Thủy văn; tranthai.vkttv@gmail.com

³ Trường Đại học Thủy Lợi; lanpth@wru.vn

*Tác giả liên hệ: lapbuidinh@gmail.com; Tel.: +84-904356641

Ban Biên tập nhận bài: 25/12/2020; Ngày phản biện xong: 9/2/2021; Ngày đăng bài: 25/3/2021

Tóm tắt: Bài toán dự báo lũ phục vụ công tác giảm nhẹ thiên tai và quản lý rủi ro nguồn nước là nhiệm vụ đang ngày càng trở lên cấp thiết do tài nguyên nước Việt Nam đang ngày càng khan hiếm, trong khi các công cụ, mô hình tính toán và công nghệ dự báo lũ ở nước ta còn nhiều hạn chế. Nghiên cứu này sẽ trình bày các kết quả đạt được trong phát triển công cụ mô hình toán thủy văn thông số phân bố hiện đại Marine để giải bài toán dự báo lũ. Các kết quả đạt được khi triển khai áp dụng thí điểm cho lưu vực sông Nậm Mu, với tập số liệu 19 năm đã cho thấy, mô hình Marine sau khi được phát triển mới đã cho kết quả mô phỏng khá tốt, hệ thống đã mô phỏng đường quá trình lũ, sai số đỉnh lũ và thời gian xuất hiện đỉnh là khá hợp lý. Kỹ thuật điều khiển tham số tối ưu đa mục tiêu MSCE-UA đã giúp cải thiện đáng kể chất lượng mô phỏng hệ thống của mô hình Marine, chỉ số NASH kiểm định trung bình các năm đạt mức 67%. Sự thành công của công trình nghiên cứu này đã cải thiện đáng kể tính khả thi của mô hình Marine khi triển khai ứng dụng trên diện rộng cho nhiều lưu vực khác nhau trên lãnh thổ Việt Nam.

Từ khóa: Tối ưu đa mục tiêu; Mô hình thủy văn phân bố; Ước tính tham số.

1. Mở đầu

Bài toán dự báo lũ phục vụ công tác giảm nhẹ thiên tai và quản lý rủi ro nguồn nước là nhiệm vụ đang ngày càng trở lên cấp thiết do tài nguyên nước Việt Nam đang ngày càng khan hiếm, suy giảm cả về số lượng và chất lượng, kèm theo đó hạn hán và lũ lụt xảy ra gay gắt ở cả quy mô, mức độ và thời gian trong khi nhu cầu sử dụng nước ngày càng tăng và đó chính là nguyên nhân gây ra khủng hoảng về nước. Nhu cầu phát triển kinh tế, xã hội đòi hỏi về chất lượng dự đoán các hiểm họa liên quan đến nước ngày càng cao, trong khi các công cụ, mô hình tính toán và công nghệ dự báo lũ ở nước ta còn nhiều hạn chế.

Các mô hình thủy văn thông số phân bố đang được phát triển và ứng dụng trong thực tế để giải bài toán dự báo lũ ngày càng nhiều, đặc biệt là ở các nước phát triển có chất lượng dữ liệu đầu vào tốt hơn. Hầu hết các trường đại học lớn trên thế giới đều nghiên cứu và phát triển mô hình thủy văn thông số phân bố nhằm phục vụ công tác nghiên cứu và giảng dạy, một vài mô hình có cấu trúc và thuật toán tốt đã được triển khai vào ứng dụng trong thực tế để giải bài toán dự báo lũ. Các mô hình mưa-dòng chảy thông số phân bố được đánh giá cao về tính ứng dụng có thể kể đến như: TOPMODEL [1]; MIKE SHE models [2]; GBHM model [3]; WEB-DHM model [4]; MARINE model [5]; IFAS model [6]; DIMOSOP [7];

WETSPA [8]; KsEdgeFC2D [9]; SWAT [10], ... Mô hình TOP (*Topography Model*): do giáo sư Mike Kirkby thuộc trường Đại học Địa lý Leeds phát triển vào năm 1974 dưới sự bảo trợ của Hội đồng nghiên cứu môi trường thiên nhiên Vương quốc Anh. Năm 1975, Keith Beven bắt đầu xây dựng chương trình TOPMODEL bằng ngôn ngữ Fortran IV. Mô hình thông số phân bố TOP là mô hình nhận thức mưa–dòng chảy. Mô hình hoạt động dựa trên các mô tả gần đúng về thủy văn, thủy lực.

Mô hình DIMOSOP (*Distributed hydrological MOdel for the Special Observing Period*) là mô hình thủy văn thông số phân bố tham số (khái niệm) được sử dụng nhiều ở các nước châu Âu như Ý, Pháp, Thụy Sĩ. Đầu vào của mô hình ngoài mưa phân bố theo không gian còn có bản đồ mô hình số độ cao, bản đồ hiện trạng sử dụng đất, bản đồ đất dưới dạng ô lưới. Các phần tử ô lưới có thể là thành phần của sườn dốc lưu vực, sông hoặc công trình hồ chứa.

Mô hình IFAS (*Integrate Flood Analysis System*) là một phần mềm tích hợp hệ thống phân tích lũ của Nhật Bản. Cốt lõi của phần mềm là mô hình thủy văn thông số phân bố tham số mô phỏng dòng chảy sườn dốc thông qua các lưới DEM dưới tác động của lớp phủ thực vật, lớp đất của bề mặt lưu vực. Mỗi lưới gồm một hệ thống các bể chứa phi tuyến sắp xếp theo chiều thẳng đứng, mỗi bể chứa có 1 hoặc 2 cửa bên, 1 cửa đáy (trừ bể chứa dưới cùng) cho phép mô phỏng các thành phần dòng chảy mặt, sát mặt và dòng ngầm.

Mô hình SWAT được xây dựng bởi Trung tâm phục vụ nghiên cứu nông nghiệp (*Agricultural Research Service*) thuộc Bộ Nông nghiệp Hoa Kỳ (*United States Department of Agriculture*) và Trung tâm nghiên cứu nông nghiệp (*Texas A&M AgriLife Research*) thuộc Đại học Texas A&M, Hoa Kỳ vào đầu những năm 1990 với mục đích dự báo những ảnh hưởng của thực hành quản lý sử dụng đất đến nước, sự bồi lắng và lượng hóa chất sinh ra từ hoạt động nông nghiệp trên những lưu vực rộng lớn và phức tạp trong khoảng thời gian dài. Một trong những module chính của mô hình này là mô phỏng dòng chảy từ mưa và các đặc trưng vật lý trên lưu vực. Điểm hạn chế lớn nhất khi triển khai ứng dụng mô hình thủy văn thông số phân bố vào thực tiễn để giải bài toán dự báo lũ phục vụ công tác giảm nhẹ thiên tai và quản lý rủi ro nguồn nước là vấn đề xác định bộ thông số tối ưu cho mô hình, bởi lẽ đây là vấn đề khó và có liên quan chặt chẽ tới chất lượng lời giải của bài toán.

Ở Việt Nam, công cụ mô hình toán thủy văn được sử dụng để giải bài toán dự báo lũ trong thực tiễn là không nhiều và không đa dạng, phổ biến sử dụng hiện nay là 2 mô hình thủy văn thông số tập trung (mô hình TANK và mô hình NAM). Mô hình Tank và mô hình Nam (Mike–Nam) khi triển khai ứng dụng trong thực tế đã đóng góp một phần không nhỏ trong công tác phòng chống, giảm nhẹ thiên tai, phục vụ lợi ích kinh tế xã hội, tuy nhiên chúng vẫn còn một số hạn chế có thể nghiên cứu khắc phục giúp nâng cao hơn nữa năng lực theo dõi và dự báo của các hệ thống theo dõi và dự báo lũ đang sử dụng hiện nay ở Việt Nam, các hạn chế của hai mô hình này có thể kể đến như: (1) Khai thác không hiệu quả số liệu mưa mặt đất và mưa vệ tinh dẫn đến lãng phí về tài nguyên, mạng lưới quan trắc mưa mặt đất ở nước ta hiện đang có trên 1000 trạm trong khi số liệu vào 2 mô hình chuỗi số liệu mưa trung bình lưu vực; (2) Cả hai mô hình đang được sử dụng phổ biến ở nước ta hiện nay đều là các mô hình có tham số tập trung, chưa xét đến vai trò điều tiết dòng chảy của mặt đệm lưu vực và sự phân bố của mưa theo không gian, 2 nhân tố có ảnh hưởng rất lớn đến quá trình hình thành dòng chảy trên lưu vực dẫn đến chất lượng còn nhiều hạn chế; (3) Mô hình MIKE–NAM phổ biến sử dụng trong các công nghệ dự báo lũ hiện nay là mô hình có bản quyền, việc can thiệp vào các cài đặt trong phần mềm để chỉnh sửa, thay đổi một số thuộc tính, thông số cho phù hợp với khu vực ứng dụng là điều không thể, hoặc nếu có thể thì cũng phải mất một khoản tiền khá lớn để mua lại bản quyền; (4) Mô hình thương mại không có mã nguồn mở, nên phương pháp tính và cơ sở khoa học của mô hình không được tường minh.

Với các điều kiện thuận lợi về tốc độ máy tính. Chất lượng dữ liệu phân bố theo không gian như: dữ liệu vệ tinh, địa hình, thảm phủ, radar, ... ngày một tốt lên, mật độ trạm đo mưa tự động và mạng lưới trạm radar ngày càng dày hơn, với tần suất truyền số liệu tiệm cận thời gian thực. Việc lựa chọn mô hình thủy văn thông số phân bố hiện đại để giải bài toán dự báo

lũ phục vụ công tác giảm nhẹ thiên tai và quản lý rủi ro nguồn nước là một hướng đi phù hợp với xu thế phát triển của các nước tiên tiến trên thế giới. Tổng cục KTTV hiện đang có 3 mô hình tham số phân bố hiện đại, thông qua quá trình hợp tác và chuyển giao công nghệ: mô hình WEB-DHM (Nhật Bản); mô hình MARINE (Pháp) và mô hình WETSPA (Bi). Tuy nhiên chưa có mô hình nào được phát triển và tích hợp tính năng điều khiển tối ưu thông số, nên việc nâng cao chất lượng dự đoán và mở rộng phạm vi ứng dụng sang các lưu vực khác đang còn gặp nhiều khó khăn.

Trong quá trình nghiên cứu ứng dụng và dựng mô hình MARINE trong thực tế cho thấy, mô hình có nhiều ưu điểm và dễ triển khai rộng rãi hơn so với các mô hình thủy văn thông số phân bố khác, do cấu trúc mô hình không quá đơn giản và cũng không quá phức tạp, mô hình đòi hỏi số liệu đầu vào và năng lực tính toán phù hợp với bối cảnh và điều kiện hiện nay ở nước ta.

Năm 2005, mô hình thủy văn thông số phân bố MARINE đã được Viện Cơ học Việt Nam và Trung tâm Dự báo KTTV Trung ương nghiên cứu ứng dụng để dự báo lũ cho lưu vực sông Đà. Kết quả dự báo tác nghiệp đến nay cho thấy mô hình MARINE có nhiều ưu điểm vượt trội hơn nhiều về khả năng mô phỏng lũ so với các mô hình khác, mô hình lại được chuyển giao có mã nguồn mở, tạo điều kiện thuận lợi để có thể lựa chọn và phát triển mở rộng thêm các tính năng mới phù hợp hơn với điều kiện cơ sở hạ tầng dự báo tại Việt Nam, nâng cao chất lượng dự báo và mở rộng ứng dụng cho nhiều lưu vực khác.

Năm 2014, mô hình MARINE tiếp tục được nghiên cứu, ứng dụng và trở thành một thành phần cốt lõi trong hệ thống theo dõi và dự báo lũ cho 6 hồ chứa lớn trên lưu vực sông Hồng. Tuy nhiên, ở Việt Nam việc nâng cao chất lượng dự báo lũ của mô hình và mở rộng phạm vi ứng dụng sang các lưu vực khác đang còn gặp nhiều khó khăn do mô hình MARINE không có chức năng ước tính tối ưu thông số. Công việc dò tìm thông số theo phương pháp thử sai (thủ công) trên một tập lớn các tham số theo không gian của mô hình sẽ tiêu tốn một lượng lớn thời gian và công sức. Hơn nữa mức độ thành công của bộ thông số tìm được lại bị phụ thuộc lớn vào yếu tố chủ quan của người hiệu chỉnh, phụ thuộc vào mức độ hiểu biết sâu về hệ thống của người thiết lập mô hình (điều mà rất ít dự báo viên có thể đạt được).

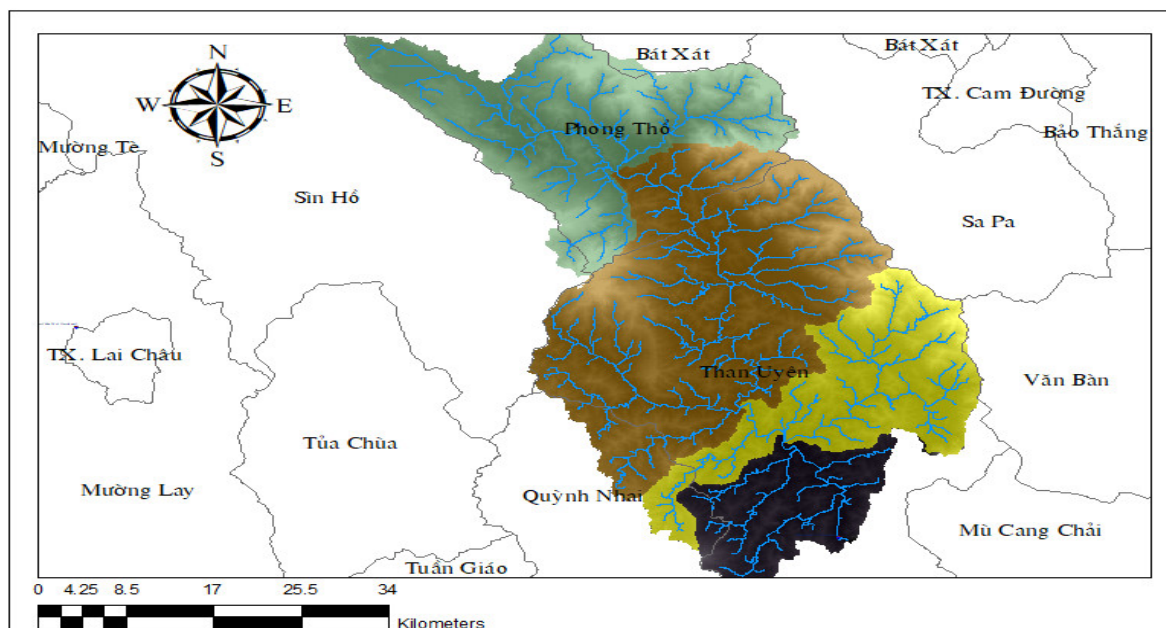
Nghiên cứu này sẽ trình bày các kết quả đạt được trong phát triển công cụ mô hình toán thủy văn hiện đại MARINE để giải bài toán dự báo lũ nhằm khắc phục được các tồn tại, hạn chế nêu trên.

2. Phương pháp nghiên cứu và số liệu thu thập

2.1. Giới thiệu về khu vực nghiên cứu

Để thử nghiệm mô hình Marine sau khi phát triển mới, nghiên cứu lựa chọn lưu vực sông Nậm Mu (đến hồ Bản Chát) trên sông Đà làm lưu vực thử nghiệm. Sơ lược về lưu vực thử nghiệm được mô tả như sau:

Lưu vực hồ Bản Chát bao phủ gần như toàn bộ lưu vực sông Nậm Mu, bắt nguồn từ các dãy núi cao 1.500–3.300 m ở phía Bắc huyện Tam Đường giáp với ranh giới tỉnh Lào Cai chảy xuyên suốt qua hai huyện Tân Uyên, Thuận Uyên và thoát khỏi ranh giới Lai Châu tại bản Tàng Khế, xã Khoen On, huyện Thuận Uyên, với tổng chiều dài 150 km. Diện tích lưu vực khoảng 2.300 km². Chiều rộng lòng sông chủ yếu 30–50 m, lưu lượng đạt mức trung bình và thường thường thay đổi lớn trong mùa mưa. Công trình thủy điện Bản Chát đã được xây dựng hoàn thành vào năm 2011, đây là một trong bốn công trình thủy điện lớn trên hệ thống thủy điện bậc thang trên lưu vực sông Đà. Với dung tích chứa 1,702 tỷ m³, công trình thủy điện Bản Chát đóng vai trò quan trọng trong việc tham gia cắt lũ và điều tiết dòng chảy cho hệ thống sông Đà và hạ lưu sông Hồng. Chính vì vậy việc dự báo lũ đến hồ Bản Chát rất quan trọng. Hình 1 là bản đồ mạng sông trên lưu vực nghiên cứu.



Hình 1. Bản đồ mạng lưới sông đến hồ Bản Chát trên lưu vực sông Nậm Mu.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phát triển kỹ thuật tối ưu tham số đa mục tiêu cho mô hình MARINE

Trong nội dung này nghiên cứu đã lựa chọn phương pháp tích hợp trực tiếp giải thuật ước tính thông số tối ưu đa mục tiêu MSCE-UA được phát triển bởi [11] để phát triển mô hình Marine.

Kỹ thuật tối ưu đa mục tiêu MSCE-UA được xây dựng trên nền tảng kết hợp các thành tựu đã đạt được của thuật toán tối ưu đơn mục tiêu trong lĩnh vực thủy văn và tài nguyên nước SCE-UA [12–13] và thuật toán tối ưu đa mục tiêu SPEA/R [14]. Cụ thể giải thuật tối ưu được xây dựng trên nền tảng ứng dụng các khái niệm sau: (1) Tiếp cận kết hợp tất định, ngẫu nhiên; (2) Tiến hóa phức hợp; (3) Tiến hóa cạnh tranh; (4) Xáo trộn phức hợp; (5) Phân rã không gian dựa trên hướng tham chiếu; (6) Đánh giá cá thể dựa trên hướng tham chiếu.

Hai khái niệm cuối được kế thừa từ giải thuật SPEA/R: Giải thuật SPEA/R được đề xuất năm 2017 có năng lực khắc phục được các tồn tại của các giải thuật tối ưu sử dụng trong lĩnh vực thủy văn và tài nguyên nước đang sử dụng hiện nay. Giải thuật SPEA/R được phát triển trên nền tảng thuật toán gốc SPEA [15], được kiểm định và so sánh với các thuật toán như HypE [16], PICEA-g [17], MOEA/D [18], NSGA-III [19], SPEA2+SDE [20] trên nhiều bài toán test khác nhau. Kết quả thực nghiệm đã cho thấy SPEA/R rất hiệu quả đối với các bài toán kiểm định, đặc biệt thuật toán có khả năng tối ưu lên tới 40 mục tiêu đồng thời.

Ngôn ngữ lập trình Fortran và C++ đã được sử dụng để thực hiện phương pháp này. Chương trình được thiết kế và mã hóa dựa trên nền tảng và ý tưởng của thuật toán gốc SCE-UA, được phát triển bởi [12] tại trường đại học Arizona, Tucson, USA.

Nghiên cứu đã bổ sung 4 mô đun chức năng chính vào mô hình Marine nhằm mục đích tích hợp thuật toán vào mô hình, cụ thể:

a) Mô đun Control_SCEUA làm nhiệm vụ khởi động và kiểm soát các biến

Trong đó var1_ETA; var2_SF; var3_KGA và var4_ODS là các tham số chuẩn hóa var1opt; var2opt; var3opt; var4opt là các biến logic giúp chương trình nhận biết thông số cần tối ưu; MAXN là số lớn nhất của phép thử được cho phép trước khi dừng tiến trình tối ưu; KSTOP là số vòng lặp xáo trộn tối đa để giá trị mục tiêu phải thay đổi nhỏ hơn hoặc bằng PECNTO trước khi kết thúc tối ưu hóa; PECNTO là tỷ lệ phần trăm theo đó giá trị mục tiêu phải thay đổi trong vòng lặp xáo trộn KSTOP; NGS là số phức trong một quần thể mẫu; NPG là số điểm trong mỗi phức hợp; NPT là số điểm trong toàn bộ mẫu tiến hóa, $NPT = NGS \times$

NPG; NPS là số điểm trong mỗi phức hợp con; NSPL là số bước tiến hóa được phép cho mỗi phức hợp trước khi thủ tục xáo trộn phức hợp được thực hiện.

b) Mô đun MSCEUA(a) làm nhiệm vụ tiến hóa mẫu hướng tới vùng tối ưu toàn cục

Trong đó các biến: Xobjs(2000,30) là các điểm trong không gian mục tiêu của toàn bộ mẫu tiến hóa; xf(2000) là giá trị của hàm véc tơ Fitness của toàn bộ mẫu; sobjs(2000,30) là các điểm trong không gian mục tiêu của mỗi phức hợp; sf(2000) là giá trị của hàm véc tơ Fitness trong mỗi phức hợp; Cobjs(2000,30) là các điểm trong không gian mục tiêu của mỗi phức hợp con; cf(2000) là giá trị của hàm véc tơ Fitness trong mỗi phức hợp con.

c) Mô đun RunMODEL(xvar,xvarmin,xvarmax,PointObj,idObj) làm nhiệm vụ vận hành mô hình Marine ứng với điểm tham số tiến hóa và trả về véc tơ hàm mục tiêu tương ứng

Trong đó các biến Nash là chỉ số thống kê “*Nash–Sutcliffe Measure*” tương ứng với điểm tham số tiến hóa; RMSE là chỉ số thống kê (*Root Mean Squared Error*) tương ứng với điểm tham số tiến hóa; APD là chỉ số thống kê (*Absolute Peak Difference*) tương ứng với điểm tham số tiến hóa; PointObj(2000,30) là giá trị của véc tơ hàm mục tiêu ứng với điểm tham số tiến hóa.

d) Mô đun SetPara() làm nhiệm vụ ánh xạ điểm véc tơ trong không gian véc tơ thông số thành bản đồ thông số dựa theo thành phần đất và thành phần thảm phủ, làm đầu vào cho mô hình Marine.

2.2.2. Phát triển kỹ thuật gom nước và diễn toán lũ trong sông cho mô hình MARINE

Hiện nay, trên thế giới các nước tiên tiến như Anh, Mỹ, Pháp, Thụy Điển và Nhật Bản đều đang ứng dụng các mô hình thủy văn thông số phân bố để tính toán, dự báo dòng chảy lũ trên lưu vực phục vụ công tác phòng chống thiên tai, đặc biệt là trong công tác theo dõi và cảnh báo nguy cơ lũ quét có thể xảy ra trên các sông suối nhỏ. Ở Việt Nam, trước sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ thông tin và hệ thống thông tin địa lý GIS, các mô hình thủy văn thông số phân bố cũng ngày càng được nghiên cứu và triển khai ứng dụng nhiều trong thực tế.

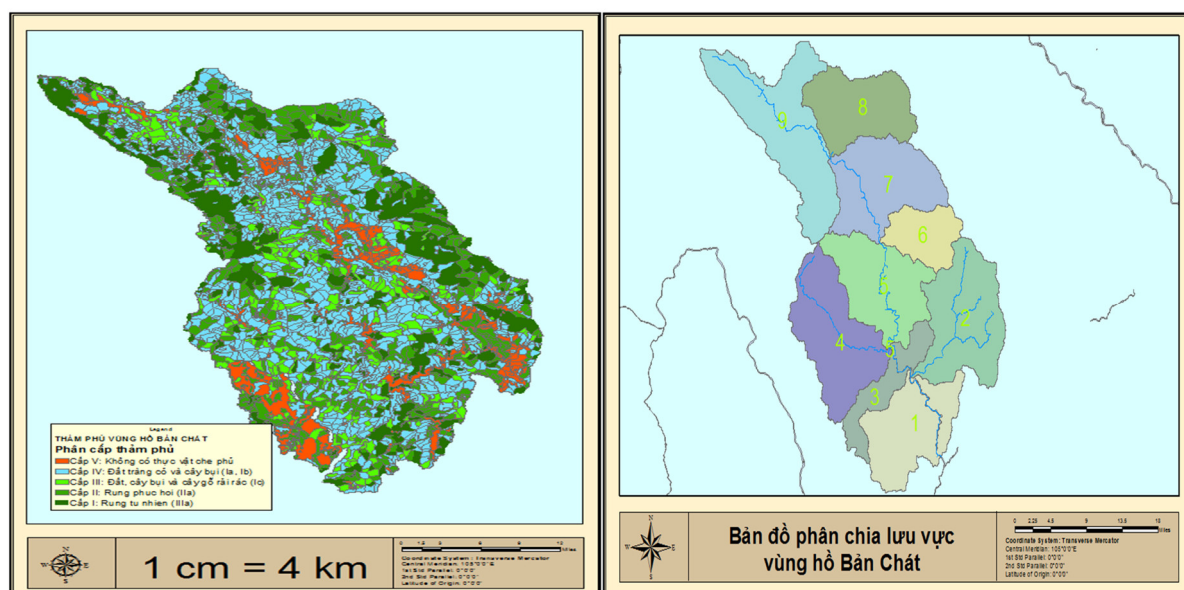
Trong quá trình triển khai ứng dụng mô hình, để giảm thiểu tác động theo không gian của các yếu tố đầu vào như thành phần đất, thành phần thảm phủ và sự biến động của phân bố mưa theo không gian..., hầu hết các mô hình toán thủy văn hiện đại hiện nay, đều đòi hỏi phải chia nhỏ lưu vực lớn thành các tiểu lưu vực nhỏ hơn, trước khi có thể thực hiện được các mô phỏng thủy văn. Việc phân chia lưu vực không theo quy luật (phụ thuộc vào yếu tố chủ quan của người thiết lập mô hình) đã gây ra những khó khăn, thách thức không nhỏ trong quá trình phát triển kỹ thuật gom nước cho mô hình toán. Rất nhiều mô hình toán thủy văn trong quá trình thiết kế, xây dựng đã không phát triển tính năng này trong hệ thống (trong đó có mô hình Marine), điều này đã gây ảnh hưởng lớn và là một cản trở không nhỏ đến khả năng mở rộng ứng dụng diện rộng trên nhiều lưu vực khác nhau. Để khắc phục vấn đề này, chúng tôi đã nghiên cứu và phát triển thành công kỹ thuật gom nước và diễn toán lũ trong sông cho mô hình Marine dựa trên kỹ thuật đánh số lưu vực Pfafstetter kết hợp với kỹ thuật diễn toán lũ theo phương pháp sóng động học. Kỹ thuật này đã được triển khai trên lưu vực sông Nậm Mu nhằm thử nghiệm mô hình Marine sau khi đã được tích hợp bổ sung kỹ thuật tối ưu tham số đa mục tiêu MSCE-UA cho mô hình.

Ngôn ngữ AML (*ARC/INFO Macro Language*) và ngôn ngữ lập trình Fortran là hai công cụ chính được sử dụng để hiện thực hóa phương pháp đánh số lưu vực Pfafstetter và ứng dụng cho hồ chứa Bản Chát trên lưu vực sông Nậm Mu. Theo đó công tác phân tách lưu vực bộ phận được thực hiện tuần tự theo tiến trình dưới đây:

Trong tiến trình phân tách, đầu tiên các hàm chức năng thủy văn trong môi trường ARC/INFO được sử dụng để xác định lưu vực phân nước từ bản đồ DEM và cắt tách thành lưu vực độc lập để chuyển bị đánh số lưu vực theo phương pháp Pfafstetter. Tiếp theo các bản đồ hội tụ dòng chảy và bản đồ xác định khoảng cách dòng chảy tại các ô lưới đến mặt cắt cửa ra của lưu vực lần lượt được tạo ra thông qua 2 hàm chức năng *Flowaccumulation* và

Flowlength trong môi trường ARC/INFO. Các kết quả đạt được trong môi trường ARC/INFO sẽ được chuyển đổi sang định dạng ASCII thông qua lệnh UNGENERATION.

Một chương trình mã hóa bằng ngôn ngữ lập trình Fortran được sử dụng để làm nhiệm vụ xác định tọa độ xuất nước của 9 lưu vực theo phương pháp Pfafstetter từ các thông tin thu được trong môi trường ARC/INFO dưới định dạng ASCII. Cuối cùng 9 tiểu lưu vực mức 1 sẽ được tạo ra thông qua các lệnh phân tách lưu vực trong môi trường ARC/INFO dựa trên các kết quả về tọa độ xuất nước thu được. Tiến trình trên có thể được thực hiện lặp lại cho các tiểu lưu vực mức 2 hoặc mức 3, cho đến khi các tiểu lưu vực được phân chia có diện tích lưu vực nhỏ hơn diện tích lớn nhất cho phép để có thể đáp ứng được điều kiện ứng dụng trong mô hình thủy văn (lưu vực nghiên cứu diện tích cho phép là $< 3000 \text{ km}^2$). Hình 2 là kết quả ứng dụng hệ thống đánh số lưu vực Pfafstetter cho lưu vực hồ Bản Chát, theo đó 9 lưu vực từ lưu vực lớn đã được đánh số và tách rời để có thể sẵn sàng ứng dụng mô hình Marine vào tính toán dòng chảy từ mưa.



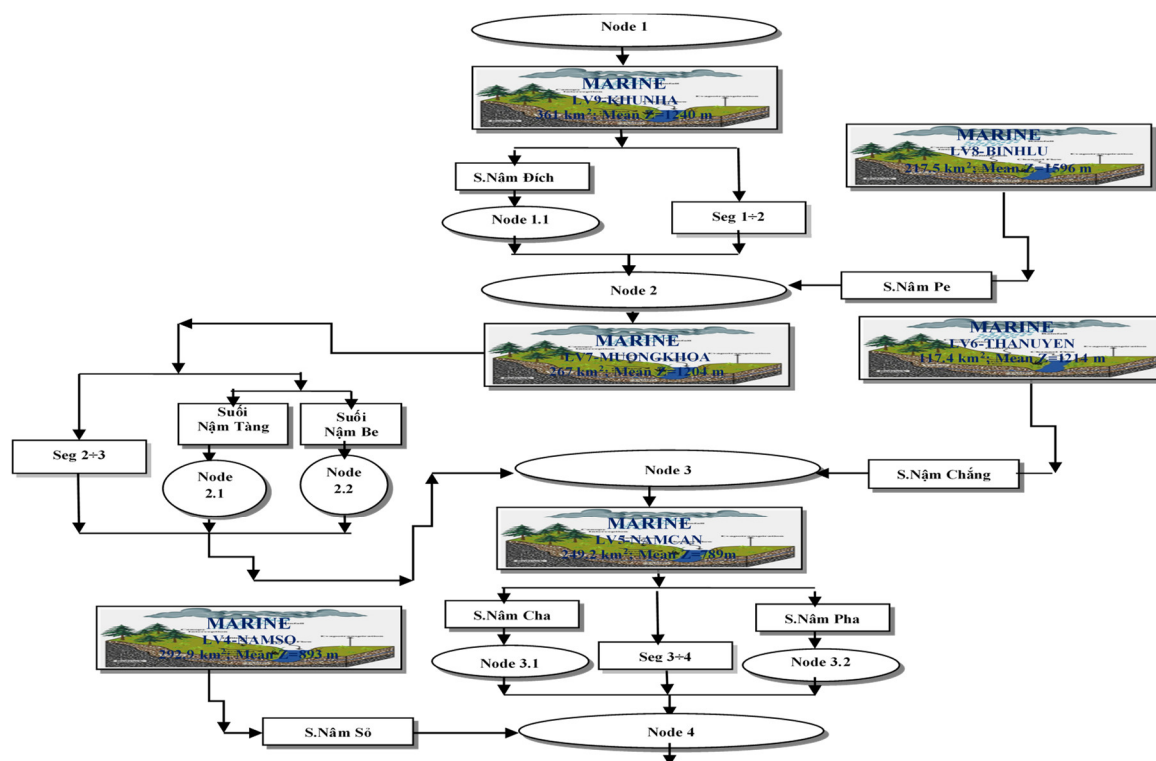
Hình 2. Bản đồ tham phủ và kết quả ứng dụng kỹ thuật Pfafstetter phục vụ bài toán gom nước và diễn toán lũ trong sông cho mô hình thử nghiệm.

Sơ đồ gom nước và diễn toán lũ trong sông được xây dựng dựa trên quá trình phân tích hiện trạng về tình hình: mạng lưới sông suối; hệ thống hồ chứa thủy điện vừa và nhỏ; sự phân bố địa hình; và cơ sở hạ tầng hệ thống trạm quan trắc mưa, lũ hiện có trên lưu vực.

Hình 3 là kết quả thiết lập sơ đồ tính mưa~dòng chảy cho lưu vực phục vụ gom nước trên hệ thống mô hình Marine, có tổng số 12 node gom nước và 4 segment tham gia trực tiếp vào quá trình tính toán dòng chảy đến hồ Bản Chát.

+ Bốn nhánh sông lớn đổ trực tiếp vào lưu vực sông Nậm Mu bao gồm sông Nậm Pe, sông Nậm Cháng, sông Nậm Sỏ và sông Nậm Mít được hệ thống phân ra thành bốn lưu vực kín và được tính toán trực tiếp từ 4 mô hình Marine tương ứng là mô hình Marine–BinhLu, Marine–ThanUyen, Marine–NamSo và Marine–MuongThan.

+ Phần nhập lưu khu giữa từ thượng lưu về hạ lưu được chia ra làm 5 đoạn, các quá trình nhập lưu trong 5 đoạn được thực hiện thông qua 5 mô hình Marine tương ứng bao gồm mô hình Marine–KhunHa, Marine–MuongKhoa, Marine–NamCan, Marine–PhaMu và Marine–MuongKim, trong các đoạn nhập lưu các suối nhỏ sẽ được xem xét tính toán lượng nhập lưu thông qua tỷ lệ diện tích giữa diện tích gom nước thực tế của suối trên tổng diện tích lưới tính của mô hình của khu giữa đó.



Hình 3. Sơ đồ gom nước và diễn toán lũ trong sông cho mô hình thử nghiệm.

2.3. Số liệu và hàm mục tiêu thử nghiệm

2.3.1. Số liệu thử nghiệm

Để thử nghiệm mô hình Marine sau khi tích hợp thuật toán đề xuất MSCE-UA, chúng tôi sử dụng 19 năm (2001–2019) số liệu quan trắc để đánh giá khả năng mô phỏng của mô hình phát triển mới, trong đó số liệu mưa được thu thập từ 8 trạm đo mưa và phân phối tới lưới tính theo phương pháp đa giác Thiessen, riêng năm 2018, 2019 sử dụng số liệu mưa vệ tinh GsMap sau khi hiệu chỉnh với số liệu mưa mặt đất. Sử dụng số liệu lũ ứng với mùa lũ các năm điển hình lũ lớn, lũ trung bình và lũ nhỏ trên lưu vực để hiệu chỉnh thông số mô hình, bao gồm các năm 1969, 1971, 1999, 2001–2009, 2012–2019 (15/6–15/10). Các năm trước 2009 lấy số liệu lưu lượng tại trạm Bản Củng để kiểm định hiệu chỉnh thông số. Các năm sau 2012 sử dụng trực tiếp số liệu lưu lượng đến hồ Bản Chát để kiểm định, hiệu chỉnh thông số. Đường quan hệ H-Q nhiều năm của các trạm Bản Củng (Tà Gia).

2.3.2. Hàm mục tiêu thử nghiệm

Nghiên cứu lựa chọn 04 tham số để thử nghiệm thuật toán đề xuất tối ưu MSCE-UA cho mô hình Marine bao gồm: tham số sức cản bề mặt K_m ; η độ rỗng đất; Ψ Cột nước mao dẫn của mặt ướt (mm); K Độ dẫn thủy lực (mm/hr). Các tham số khác được cố định hoặc tính toán nội suy từ dữ liệu bản đồ DEM, giới hạn biên và ký hiệu biến của các tham số ước tính được chỉ ra trong Bảng 1.

Bảng 1. Các tham số tối ưu và giới hạn biên của chúng trong mô hình Marine.

Các tham số tối ưu	Ký hiệu biến	Biên dưới	Biên trên
K_m	var4_ODS	0,01	0,3
η	var1_ETA	0,05	0,5
Ψ (mm)	var2_SF	20	320
K (mm/hr)	var3_KGA	0,3	120

Nghiên cứu này lựa chọn 03 hàm mục tiêu có tính xung đột cao tham gia đồng thời vào bài toán tối ưu, các hàm mục tiêu được chỉ ra trong bảng 2.

Bảng 2. Danh sách các hàm mục tiêu tham gia vào bài toán thử nghiệm.

Tên hàm mục tiêu	Ký hiệu biến	Công thức toán
Nash–Sutcliffe Measure	NASH	$1 - \frac{\sum_{t=1}^n (O_t - S_t(\theta))^2}{\sum_{t=1}^n (O_t - \bar{O})^2}$
Root Mean Squared Error	RMSE	$\frac{1}{M_l} \sum_{j=1}^{M_l} \sqrt{\frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (O_i - S_i(\theta))^2}$
Absolute Peak Difference	APD	$ \max_{1 \leq t \leq n} \{O_t\} - \max_{1 \leq t \leq n} \{S_t(\theta)\} $

Trong đó O_t là lưu lượng thực đo tại thời điểm quan trắc t ($t=1, \dots, n$); M_l là số sự kiện dòng chảy thấp, n_j là số bước trong mỗi sự kiện; $S_t(\theta)$ giá trị lưu lượng mô phỏng đạt được của mô hình Marine tại thời điểm t ; \bar{O} là giá trị trung bình lưu lượng thực đo của chuỗi quan trắc.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả đánh giá khả năng mô phỏng dòng chảy lũ của hệ thống thông qua các chuỗi số liệu hiệu chỉnh, lưu lượng đến hồ Bản Chát

Bảng 3 tính trong điều kiện lưu lượng đến hồ Bản Chát được nội suy từ trạm Bản Củng theo tỷ lệ diện tích. Các kết quả đạt được trong Bảng 3 cho thấy mô hình Marine sau khi được phát triển tích hợp thuật toán đề xuất MSCE-UA cho kết quả khá tốt, các chỉ tiêu đánh giá chất lượng S/σ và Nash qua các năm đều đạt chỉ tiêu cho phép theo quy phạm số 94 TCN 7–91, điều đó cho thấy giải thuật đề xuất mới có thể ứng dụng để tối ưu thông số cho mô hình Marine. Đối với quá trình lũ, sai số về đỉnh lũ và thời gian xuất hiện đỉnh là hợp lý, tuy nhiên vẫn còn một số đợt lũ nhỏ hệ thống chưa mô phỏng được, nguyên nhân có thể là do mạng lưới quan trắc mưa chưa đủ để phản ánh không gian mưa trên lưu vực, một số đợt mưa số liệu quan trắc thu được từ các trạm có mưa vừa, nhưng thực tế dữ liệu quan trắc trên lưu vực lại không có lũ dẫn đến mô hình không thể mô phỏng được trong những trường hợp này.

Bảng 3. Kết quả đánh giá chỉ tiêu mô phỏng mùa lũ các năm thông qua lưu lượng đến hồ Bản Chát.

Năm	Q đến Bản Chát	
	S/σ	Nash
2001	0,65	0,58
2002	0,56	0,69
2003	0,57	0,68
2004	0,57	0,68
2005	0,67	0,55
2006	0,54	0,71
2007	0,51	0,74
2008	0,64	0,59
2009	0,54	0,71
Trung bình	0,58	0,66
Max	0,67	0,74
Min	0,51	0,55

3.2. Kết quả đánh giá khả năng ứng dụng trong thực tế của hệ thống thông qua các chuỗi số liệu kiểm định

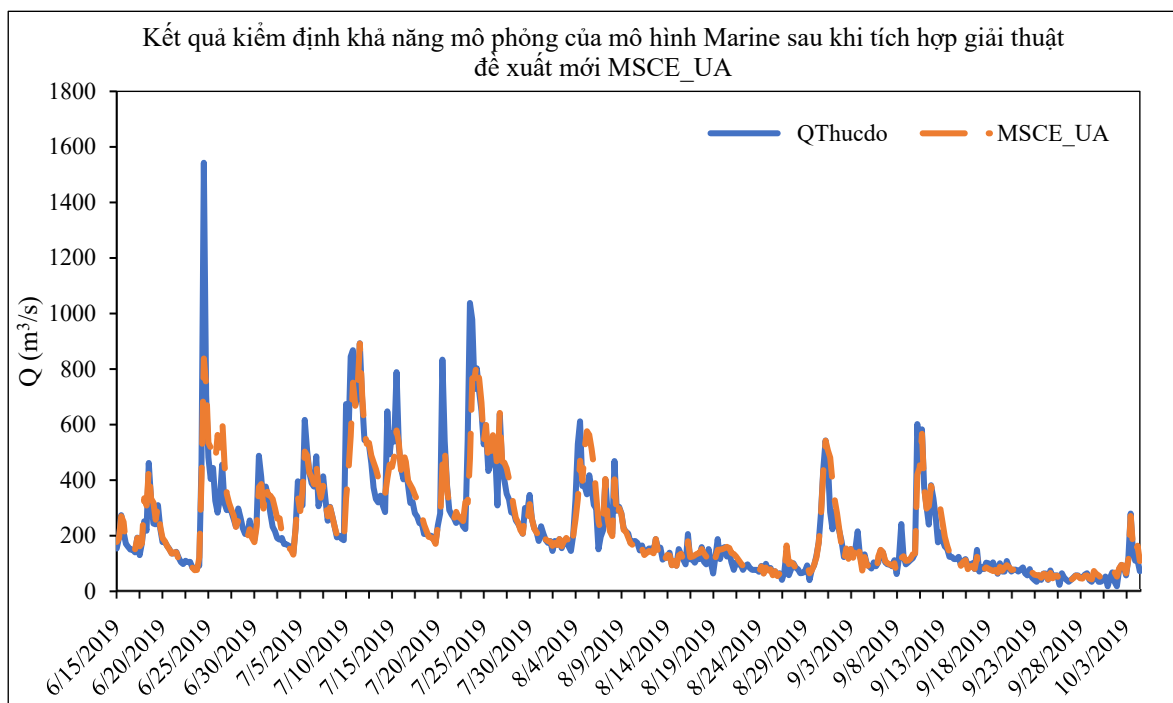
Trong hệ thống thủy văn (mô phỏng mưa~dòng chảy), việc kiểm định năng lực mô phỏng của hệ thống trên tập số liệu độc lập là chìa khóa quan trọng nhằm đánh giá tính ứng dụng

của bộ tham số tìm được trong thực tế. Để đánh giá khả năng ứng dụng trong thực tế của hệ thống trên tập tham số tối ưu tìm được. Nghiên cứu này đã sử dụng số liệu của 4 năm mùa lũ 2016 đến 2019 để tiến hành kiểm định. Kết quả đạt được cho thấy chất lượng mô phỏng của hệ thống trên tập số liệu kiểm định độc lập là khá ổn định qua các năm, chỉ tiêu Nash trung bình đạt mức 0,67 và không biến động nhiều qua các năm kiểm định (Bảng 4). Như vậy, có thể thấy bộ vectơ tham số tìm được bằng kỹ thuật tối ưu tham số đa mục tiêu MSCE-UA đã tiệm cận vùng tối ưu toàn cục.

Bảng 4. Kết quả kiểm định dòng chảy đến hồ Bản Chát mùa lũ các năm đối với hệ thống dự báo dòng chảy lũ đến hồ Bản Chát.

Năm	Q đến hồ	
	S/ σ	Nash
2016	0,58	0,66
2017	0,61	0,63
2018	0,62	0,62
2019	0,49	0,76
Trung bình	0,58	0,67
Max	0,62	0,76
Min	0,49	0,62

Cuối cùng, đường quá trình mô phỏng đạt được từ hệ thống (đường gạch dài) so sánh với quá trình thực đo (đường liền đậm) cho thấy đường mô phỏng MSCE-UA cũng khá phù hợp với thực đo (Hình 4). Các đặc trưng trên đường quá trình như đỉnh lũ, quá trình lên, xuống và dòng ngầm khá phù hợp với thực tế. Đợt lũ kiểm định từ ngày 22/7–01/8/2019 hệ thống mô phỏng đỉnh lũ đạt mức 826 m³/s (sai số 20% so với đỉnh lũ thực tế), đợt từ ngày 29/8 đến 8/9/2019 đỉnh lũ sai số 1% so với thực tế.



Hình 4. Đường quá trình giữa lưu lượng đến hồ Bản Chát tính toán và thực tế năm 2019.

4. Kết luận

Các kết quả thử nghiệm đạt được trên lưu vực thử nghiệm đã cho thấy: mô hình Marine sau khi được phát triển mới đã cho kết quả mô phỏng khá tốt, hệ thống mô phỏng đường quá trình lũ, sai số đỉnh lũ và thời gian xuất hiện đỉnh là khá hợp lý; kỹ thuật điều khiển tham số

tối ưu đa mục tiêu MSCE-UA đã giúp cải thiện đáng kể chất lượng mô phỏng hệ thống của mô hình Marine, chỉ số NASH kiểm định trung bình qua các năm hiệu đạt mức 67% (mức có thể triển khai được trong nghiệp vụ dự báo theo tiêu chuẩn ngành).

Sự thành công của công trình nghiên cứu này đã giúp nâng cao chất lượng dự báo lũ cho mô hình Marine và cải thiện đáng kể tính khả thi khi triển khai ứng dụng trên diện rộng cho nhiều lưu vực khác nhau trên lãnh thổ Việt Nam.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: B.Đ.L., T.H.T., P.T.H.L.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: B.Đ.L., T.H.T., P.T.H.L.; Xử lý số liệu: B.Đ.L.; Lấy mẫu: B.Đ.L., T.H.T., P.T.H.L.; Viết bản thảo bài báo: B.Đ.L., T.H.T., P.T.H.L.; Chỉnh sửa bài báo: B.Đ.L., T.H.T., P.T.H.L.

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của đề tài khoa học “Nghiên cứu phát triển mô hình thủy văn thông số phân bố trong dự báo lũ cho các lưu vực sông ở Việt Nam”, mã số: TNMT.2021.562.06 trong việc thực hiện và công bố nghiên cứu này.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Nystrom, E.; Burns, D. TOPMODEL Simulations of Streamflow and Depth to Water Table in Fishing Brook Watershed. U.S. Geological Survey, 2007.
2. Graham, D.N.; Butts, M. Flexible, integrated watershed modelling with MIKE SHE in Watershed Models. DHI Water & Environment, 2005.
3. Yang, D.; Herath, S.; Musiak, K. Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability. *Hydrol. Processes* **2000**, *14*, 403–416.
4. Wang, L. Development of a Distributed Runoff Model coupled with a Land Surface Scheme, 2007.
5. Garambois, P.; Roux, H.; Larnier, K.; Labat, D.; Dartus, D. Characterization of catchment behaviour and rainfall selection for flash flood hydrological model calibration. *Hydrol. Sci. J.* **2015**, *60*, 424–447.
6. Tsuda, M.; Iwami, Y. Application of Flood Forecasting and Analysis Model (IFAS) for Wadi Flash Flood. Proceedings of the Second International Symposium on FlashFloods in Wadi Systems, 2016.
7. Ranzi, R.; Bacchi, B.; Grossi, G. Runoff measurements and hydrological modelling for the estimation of rainfall volumes in an alpine basin. *J. Royal Meteorol.* **2003**, *129*, 653–672.
8. Liu, Y.B.; De Smedt, F. WetSpa Extension, A GIS-based Hydrologic Model for Flood Prediction and Watershed Management, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering Vrije Universiteit Brussel, 2004.
9. Tachikawa, Y.; Shiiba, M. Development of a Basin Runoff Simulation System Based on a New Digital Topographic Model. *Doboku Gakkai Ronbunshu* **2001**, *691/II*–57, 43–52.
10. Neitsch, S.; Arnold, J.; Kiniry, J.; Williams, J.; King, K. Soil Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas Water Resources Institute, 2002.
11. Lập, B.Đ. Nghiên cứu phát triển mô hình thủy văn thông số phân bố trong dự báo lũ cho các lưu vực sông ở Việt Nam.
12. Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V.K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *J. Hydrol.* **1994**, *158*, 265–284.

13. Duan, Q. A Global Optimization Strategy for Efficient and Effective Calibration of Hydrologic Models, The University of Arizona, 1991.
14. Jiang, S.; Yang, S. A Strength Pareto Evolutionary Algorithm Based on Reference Direction for Multiobjective and Many-Objective Optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.* **2017**, *21*, 329–346. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2016.2592479>.
15. Zitzler, E.; Laumanns, M.; Thiele, L. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for multiobjective optimization. Proceedings of the EUROGEN'2001. Athens. Greece, September 19–21, 2001.
16. Bader, J.; Zitzler, E. HypE: An Algorithm for Fast Hypervolume-Based Many-Objective Optimization. *Evol. Comput.* **2011**, *19*, 45–76. https://doi.org/10.1162/EVCO_a_00009.
17. Wang, R. Preference-inspired Co-evolutionary Algorithms. University of Sheffield, 2013.
18. Zhang, Q.; Li, H. MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Trans. Evol. Comput.* **2008**, *11*, 712–731. <https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.892759>.
19. Deb, K.; Jain, H. An Evolutionary Many-Objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Nondominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems With Box Constraints. *IEEE Trans. Evol. Comput.* **2014**, *18*, 577–601.
20. Li, M.; Liu, X.; Yang, S. Shift-Based Density Estimation for Pareto-Based Algorithms in Many-Objective Optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.* **2014**, *18*, 348–365.

Development of the distributed hydrological model MARINE in flood forecasting problem, pilot application for Nam Mu river basin

Bui Dinh Lap^{1*}, Tran Hong Thai², Pham Thi Huong Lan³

¹ National Centre for Hydro-Meteorological Forecasting; PhD student of Thuyloi University; lapbuidinh@gmail.com

² Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration; tranthai.vkttv@gmail.com

³ Thuyloi University; lanpth@wru.vn

Abstract: The problem of flood forecasting for disaster mitigation and water risk management is an increasingly urgent task due to the increasingly scarce water resources in Vietnam, while tools, calculation models, and flood forecasting technologies in our country are still limited. This paper will present the results achieved in the research and development of a modern distributed hydrological a mathematical model tool (MARINE) to solve the flood forecasting problem. The results achieved when implementing the pilot application to the Nam Mu River basin, with a 19-year data set, showed that the MARINE model after being developed has produced quite good simulation results, the system has simulated the hydrograph of flood, the error of flood peaks and the time of peak appearance is quite reasonable. The optimal parameters control technique (MSCE-UA) has significantly improved the system simulation quality of the MARINE model, with the NASH index is 0.67. The success of this research has significantly improved the feasibility of the MARINE model when deploying large-scale applications to various basins in the territory of Vietnam.

Keywords: Multiobjective optimization; Distributed hydrological model; Parameter estimation.