

ÁP DỤNG MÔ HÌNH MẠNG NƠ-RON NHÂN TẠO TRONG TÍNH TOÁN CƯỜNG ĐỘ MƯA TỪ ĐỘ PHẢN HỒI RADAR TẠI TỈNH THỪA THIÊN - HUẾ

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

Tóm tắt

Tại Việt Nam, hệ thống radar thời tiết đã được đưa vào khai thác và sử dụng để theo dõi và dự báo mưa lớn gây lũ lụt, lũ quét từ những năm 2000 trên toàn quốc. Lượng mưa ước lượng từ độ phản hồi radar bằng các công thức thực nghiệm đã được nhiều tác giả áp dụng tính cho rất nhiều vùng khác nhau, tuy nhiên kết quả nhận được còn hạn chế do công thức thực nghiệm với các hệ số đơn giản chưa phản ánh được mối tương quan phi tuyến giữa 2 đại lượng này. Bài báo trình bày việc sử dụng mô hình mạng nơ-ron nhân tạo ANN để tìm mối quan hệ giữa lượng mưa và độ phản hồi radar và so sánh với phương pháp sử dụng công thức thực nghiệm. Kết quả đạt được cho thấy khả năng ứng dụng tốt của phương pháp này so với phương pháp sử dụng công thức thực nghiệm.

Từ khóa: Mạng thần kinh nhân tạo; Phản hồi radar; Lượng mưa.

Abstract

Applying artificial neural network model in calculating rainfall rate from radar reflectivity in Thua Thien - Hue province

In Viet Nam, the weather radar system has been put into operation and used to monitor and forecast rainfall since the 2000s across the country. Rainfall estimated from radar reflectivity by empirical formulas has been applied by many authors to many different regions, but the results obtained are limited due to the experimental formula with simple coefficients, does not reflect well the nonlinear relationship between these two quantities. This paper presents the use of artificial neural network model to find the relationship between rainfall rate and radar reflectivity and compares it with the method using the empirical formulas. The obtained results show the better applicability of this method compared to the method using the empirical formula.

Keywords: Artificial neural network; Radar reflectivity; Rainfall rate.

1. Đặt vấn đề

Trong dự báo thủy văn, số liệu mưa là yếu tố đầu vào quan trọng của hầu hết các mô hình tính toán, tuy nhiên, nguồn số liệu mưa được sử dụng phổ biến được lấy từ các trạm quan trắc tại mặt đất với ưu điểm là có độ tin cậy cao nhưng số lượng trạm quan trắc hiện nay còn thưa thớt, phân bố rải rác và không đồng đều giữa các vùng

miền dẫn đến không đáp ứng được các yêu cầu chi tiết theo không gian của các mô hình thủy văn hiện đại.

Hiện nay, trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu về việc khai thác dữ liệu mưa được ước lượng từ ảnh viễn thám. Trong đó việc sử dụng ảnh radar thời tiết để ước lượng lượng mưa đưa vào mô hình thủy văn tính toán cho các lưu vực sông

không có hoặc thiếu trạm đo mặt đất đã có nhiều kết quả khả quan, thêm ưu điểm về thời gian cập nhật ảnh radar thường ngắn (khoảng 5 - 10 phút).

Các nghiên cứu trên thế giới có thể kể đến trong việc khai thác hiệu quả nguồn dữ liệu ảnh radar như: Các nghiên cứu xây dựng mối quan hệ định lượng giữa lượng mưa và hệ số phản xạ với sự phân bố theo không gian trên khu vực lớn và tần suất thời gian cao (Wilson và Brandes, 1979 [7]; Krajewski và Smith, 2002 [4]); Smith và J. A, 1991 [5] đã chỉ ra độ chính xác của lượng mưa radar còn bị ảnh hưởng bởi địa hình và thảm thực vật vì chúng có thể che sóng điện từ do radar phát ra nên trước khi sử dụng dữ liệu mưa radar cho mô phỏng mưa - dòng chảy, cần thiết phải hiệu chỉnh dữ liệu mưa radar để giảm thiểu sai số; Seng Wang và ccs (2021) [6] sử dụng lượng mưa ước lượng từ radar và vệ tinh để dự đoán tích hợp các nguy cơ lũ lụt và sạt lở đất.

Ở Việt Nam, dữ liệu mưa ước lượng từ radar đã được các nhà khoa học quan tâm vì nhiều ưu điểm như lượng mưa radar thường chính xác hơn trong phạm vi quét hiệu quả của radar. Dựa trên các số liệu độ phản hồi của radar thời tiết đặt tại 4 trạm đo mưa đã đưa ra công thức thực nghiệm ước lượng mưa cho khu vực Đông Nam Bộ (Nguyễn Hướng Điền 2015) [1].

Tuy nhiên các công thức thực nghiệm phần lớn sử dụng “dạng Marshall-Palmer” $Z = a.R^b$ nên kết quả thu được còn hạn chế. Trong nghiên cứu này sẽ áp dụng phương pháp mới là sử dụng mô hình mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) để phân tích độ phản hồi vô tuyến ra lượng mưa tại tỉnh Thừa

Thiên - Huế. Trong những năm gần đây, mô hình ANN đã được nhóm tác giả nghiên cứu ứng dụng hiệu quả trong nhiều bài toán khác nhau.

2. Phương pháp và thu thập số liệu

2.1. Phương pháp nghiên cứu

a) *Phương pháp sử dụng công thức thực nghiệm*

Phương pháp đo mưa bằng radar được sử dụng rộng rãi nhất là dựa trên quan hệ giữa độ phản hồi vô tuyến với cường độ mưa sử dụng công thức quan hệ cơ bản có dạng Marshall-Palmer.

Đổi $Z = a.R^b$ sang dạng $R = c.10^{d.Z'}$ (1)

Từ $Z = 10^{\frac{Z'}{10}} = a.R^b \rightarrow R = \frac{1}{\sqrt[b]{a}} 10^{\frac{Z'}{10.b}}$

$\rightarrow R = c.10^{d.Z'}$ với $c = \frac{1}{\sqrt[b]{a}}$; $d = \frac{1}{10.b}$

trong đó:

- Z là độ phản hồi vô tuyến, trong đó $Z = 10^{Z'/10}$ (Z' trong đơn vị dbZ);

- R là cường độ mưa;

- a, b, c, d là các hệ số thực nghiệm.

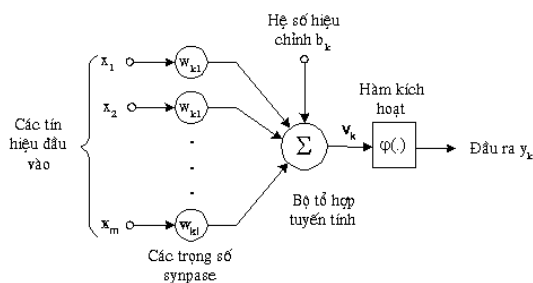
Để có thể ứng dụng vào dự báo nghiệp vụ thì các công thức thực nghiệm cần được hiệu chỉnh và kiểm định các hệ số thực nghiệm cho từng vùng.

Để dò tìm các hệ số thực nghiệm này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp tiến hóa xáo trộn phức hợp (Shuffled Complex Evolution - SCE) [2]. Phương pháp SCE được khởi tạo bằng cách chọn các tham số p và m với p là số phức hợp, m là số điểm trong mỗi phức hợp. Không gian mẫu s là mẫu lấy ngẫu nhiên trong không gian khả thi của thông số sử dụng một phân phối xác suất thống nhất và tính toán giá trị hàm mục tiêu tại mỗi điểm đó. Sau đó,

các điểm trong s đều được sắp xếp theo thứ tự giá trị của hàm mục tiêu tốt dần. Các điểm này sẽ được chia thành p phức hợp, mỗi phức hợp gồm m điểm. Mỗi phức hợp sẽ tiến hóa theo một cách độc lập theo phương pháp Downhill Simplex. Bước tiếp theo, xáo trộn, kết hợp các điểm trong các phức hợp đã phát triển thành một tập mẫu mới dựa trên thông tin của tập mẫu ban đầu. Sự phát triển và xáo trộn này sẽ được lặp đi lặp lại cho tới khi nào các tiêu chí hội tụ được thỏa mãn.

b) Phương pháp dùng mạng nơ-ron nhân tạo

Mạng nơ-ron nhân tạo (ANN) gọi tắt là mạng nơ-ron, là một mô hình xử lý thông tin phỏng theo cách thức xử lý thông tin của các hệ nơ-ron sinh học. Nó được tạo nên từ một số lượng lớn các phần tử (gọi là phần tử xử lý hay nơ-ron) kết nối với nhau thông qua các liên kết (gọi là trọng số liên kết) làm việc như một thể thống nhất để giải quyết một vấn đề cụ thể nào đó.



Hình 1: Cấu trúc của một nơ-ron nhân tạo trong đó:

+ x_i ($i = 1, m$): Tập các đầu vào là các tín hiệu vào (input signals) của nơ-ron.

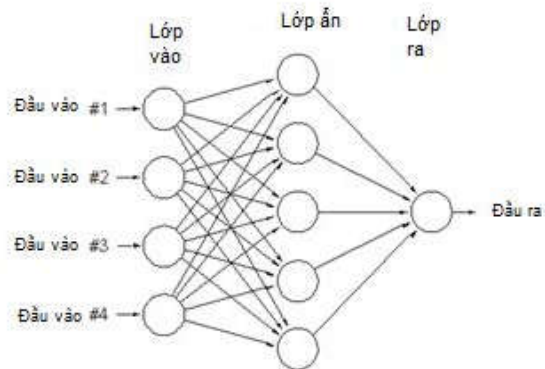
+ w_{jk} : Tập các liên kết, mỗi liên kết giữa tín hiệu vào thứ j với nơ-ron k được thể hiện bởi một trọng số, được khởi tạo một cách ngẫu nhiên ở thời điểm khởi tạo mạng và được cập nhật liên tục trong quá trình học mạng.

+ $\sum$: Bộ tổng dùng để tính tổng của tích các đầu vào với trọng số liên kết của nó.

+ b_k : Ngưỡng (còn gọi là một độ lệch - bias), được đưa vào như một thành phần của hàm truyền.

+ $\varphi(.)$: Hàm truyền còn gọi là hàm kích hoạt. Hàm này được dùng để giới hạn phạm vi đầu ra của mỗi nơ-ron. Nó nhận đầu vào là kết quả của hàm tổng và ngưỡng đã cho.

Mặc dù mỗi nơ-ron đơn lẻ có thể thực hiện những chức năng xử lý thông tin nhất định, sức mạnh của tính toán nơ-ron chủ yếu có được nhờ sự kết hợp các nơ-ron trong một kiến trúc thống nhất. Hình 2 thể hiện mô hình mạng truyền thẳng nhiều lớp được sử dụng rộng rãi nhất trong các mô hình ANN hiện nay.



Hình 2: Mạng nơ-ron lan truyền thẳng

Ưu điểm của một mạng nơ-ron nhân tạo là nó cho phép xây dựng một mô hình tính toán có khả năng học dữ liệu rất cao.

Quá trình huấn luyện mạng nơ-ron dựa trên sai số hồi quy giữa giá trị tính toán và giá trị thực đo, giải thuật huấn luyện sẽ điều chỉnh các trọng số kết nối của mạng nơ-ron nhằm cực tiểu hóa sai số hồi quy trên các mẫu huấn luyện. Sau khi mạng được huấn luyện thành công, bộ ma

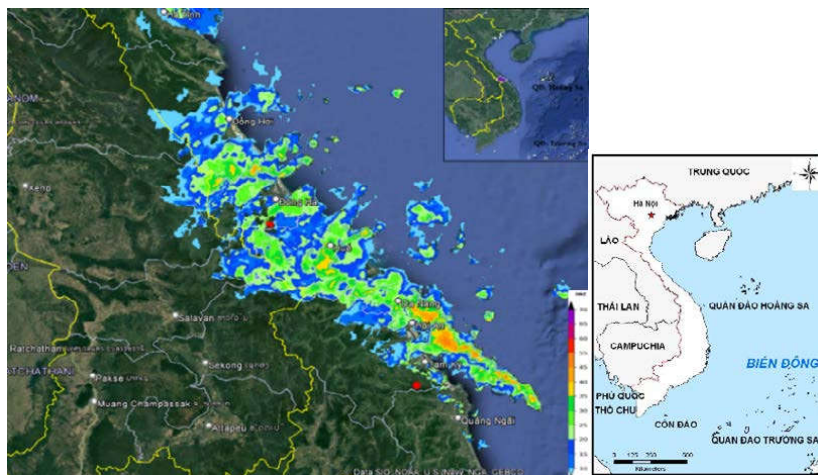
trận trọng số sẽ được cập nhật để sử dụng trong quá trình dự báo.

2.2. Thu thập số liệu

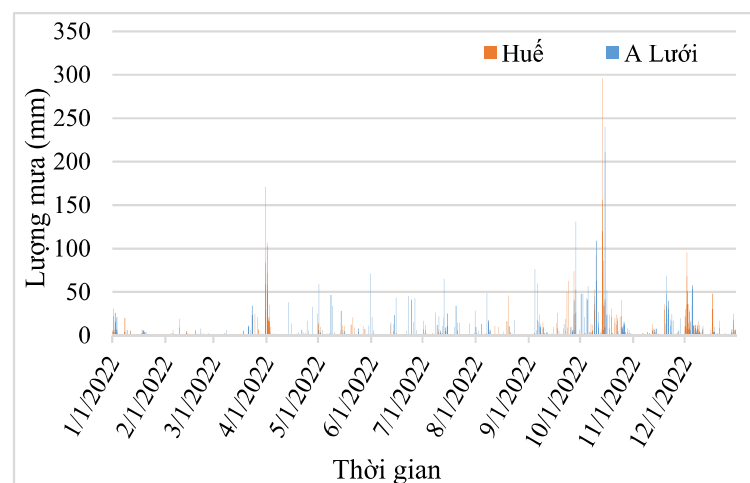
Thừa Thiên - Huế là một trong các tỉnh nằm ở phía Đông dãy Trường Sơn của miền Duyên hải Trung Bộ nên chế độ mưa, lượng mưa ở đây vừa chịu sự chi phối của cơ chế hoàn lưu gió mùa Đông Nam Á, vừa bị tác động mạnh mẽ của vị trí địa lý (địa thế) và điều kiện địa hình. Trong năm 2022, Thừa Thiên - Huế có nhiều đợt mưa lớn diễn ra, điển hình là ngày 14 - 15/10 và ngày 2 - 3/12, Thừa

Thiên - Huế xảy ra mưa lớn gây ngập lụt và chia cắt giao thông nghiêm trọng. Do vậy, nhóm tác giả lựa chọn sử dụng số liệu năm 2022 để hiệu chỉnh và kiểm định cho phương pháp tính lượng mưa từ độ phản hồi radar bằng mô hình ANN.

Dữ liệu độ phản hồi radar được trích xuất tại các điểm lân cận vị trí trạm khí tượng Huế, trạm khí tượng A Lưới thuộc tỉnh Thừa Thiên - Huế với bán kính khoảng 8 km được lấy từ trang web cung cấp miễn phí của Đài Khí tượng cao không - Bộ Tài nguyên và Môi trường [8].



Hình 3: Ảnh độ phản hồi radar lúc 15h30 ngày 15/10/2022



Hình 4: Lượng mưa thực đo tại trạm Huế và A Lưới được sử dụng để hiệu chỉnh, kiểm định mô hình

Nghiên cứu

Chuỗi số liệu phục vụ phương án hiệu chỉnh mô hình trong thời gian từ 07h00 ngày 01/01/2022 đến 19h00 ngày 30/11/2022, chuỗi số liệu trong thời gian từ 07h00 ngày 01/12/2022 đến 19h00 ngày 31/12/2022 để kiểm định mô hình. Dữ liệu mưa tại Trạm Khí tượng Huế và A Lưới sau khi thu thập, cần chuẩn hóa dữ liệu và loại bỏ các giá trị cực đoan (số liệu âm, sai số khách quan,...) và đồng bộ thời gian với số liệu độ phản hồi radar.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Kết quả phương pháp công thức thực nghiệm

Từ công thức quan hệ cơ bản có dạng Marshall-Palmer, nhóm tác giả sử dụng nguồn số liệu đầu vào là độ phản hồi radar (dbZ) và lượng mưa thực đo đã thu thập được để đo tìm các hệ số thực nghiệm cho Trạm Khí tượng Huế và A Lưới. Sử dụng phương pháp tiên hóa xáo trộn phức hợp SCE để tự động dò tìm thông số c và d trong công thức (1).

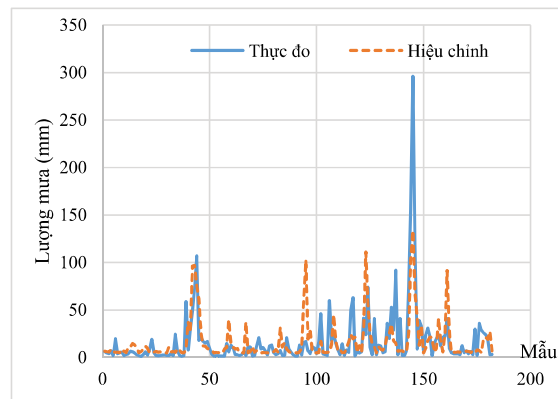
Kết quả dò tìm hệ số c và d cho công thức cơ bản được xác định cho từng trạm Huế, A Lưới và sau đó cho chung 2 trạm được liệt kê theo Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả dò tìm hệ số c , d cho từng trạm và chung 2 trạm

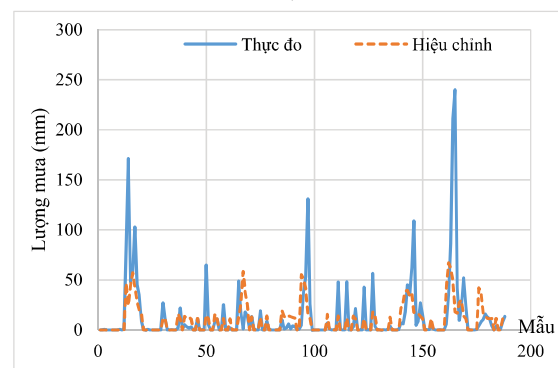
Tên trạm	c	d
Huế	4,837	0,055
A Lưới	11,113	0,029
Chung 2 trạm	8,876	0,038

a) Hiệu chỉnh

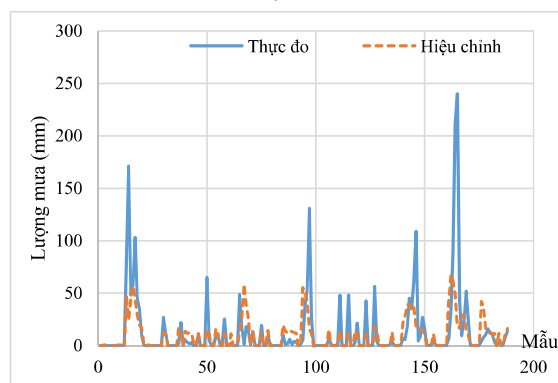
Sử dụng chuỗi số liệu hiệu chỉnh mô hình thay vào công thức thực nghiệm mà nhóm tác giả đã xây dựng, kết quả lượng mưa tương ứng với trạm Huế, trạm A Lưới và chung 2 trạm được thể hiện trong Hình 5, 6 và 7.



Hình 5: Kết quả lượng mưa tính từ công thức thực nghiệm với chuỗi số liệu hiệu chỉnh trạm Huế



Hình 6: Kết quả lượng mưa tính từ công thức thực nghiệm với chuỗi số liệu hiệu chỉnh trạm A Lưới



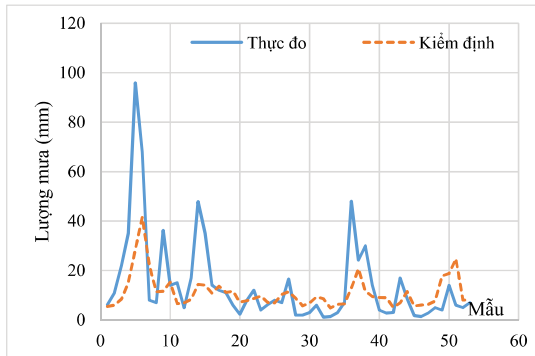
Hình 7: Kết quả lượng mưa tính từ công thức thực nghiệm với chuỗi số liệu hiệu chỉnh chung 2 trạm

Chỉ số đánh giá hiệu quả Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) với phương pháp ước lượng lượng mưa bằng công thức thực nghiệm sau khi dò tìm hệ số c , d thu được tại trạm Huế là $NSE = 0,53$; Tại

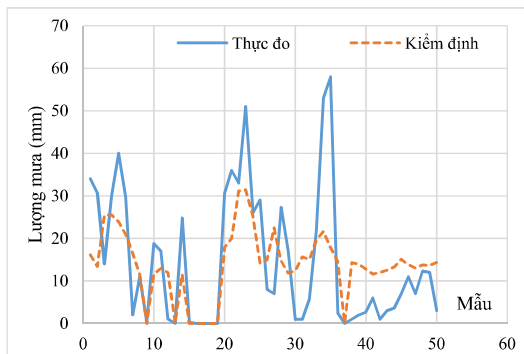
trạm A Lưới là $NSE = 0,3$ và chung 2 trạm là $NSE = 0,33$.

b) Kiểm định

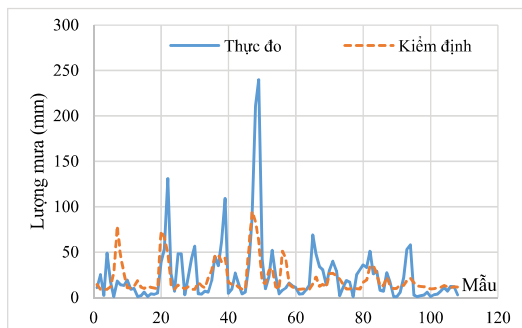
Sử dụng chuỗi số liệu kiểm định mô hình thay vào công thức thực nghiệm với hệ số c, d đã tìm được ở bước hiệu chỉnh, kết quả lượng mưa trạm Huế, trạm A Lưới và chung 2 trạm tương ứng được thể hiện trong Hình 8, 9 và 10.



Hình 8: Kết quả lượng mưa tính từ công thức thực nghiệm với chuỗi số liệu kiểm định trạm Huế



Hình 9: Kết quả lượng mưa tính từ công thức thực nghiệm với chuỗi số liệu kiểm định trạm A Lưới



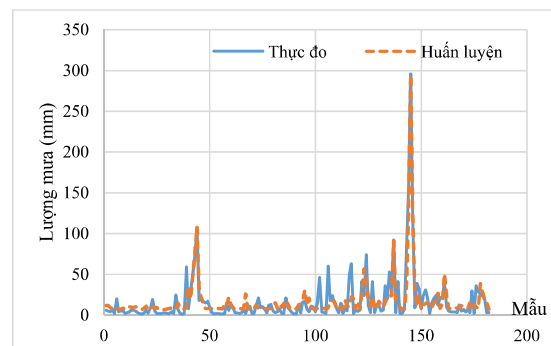
Hình 10: Kết quả lượng mưa tính từ công thức thực nghiệm với chuỗi số liệu kiểm định chung 2 trạm

Chỉ số (NSE) của phương án kiểm định với phương pháp ước lượng lượng mưa bằng công thức thực nghiệm tại trạm Huế là $NSE = 0,33$; Tại trạm A Lưới là $NSE = 0,24$ và chung 2 trạm là $NSE = 0,3$.

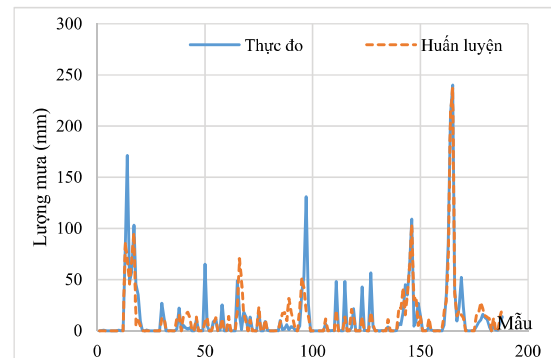
3.2. Kết quả phương pháp ANN

a) Hiệu chỉnh

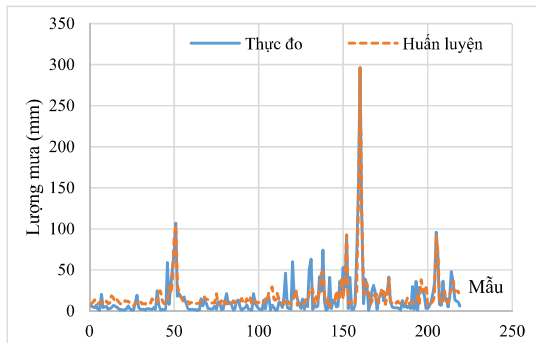
Sử dụng các dữ liệu đầu vào bao gồm các dữ liệu ảnh radar và lượng mưa thực đo tương ứng với khoảng thời gian hiệu chỉnh để huấn luyện mô hình ANN. Các kết quả lượng mưa tính toán được từ mô hình thể hiện cùng với các dữ liệu thực đo tại các trạm Huế, A Lưới và chung 2 trạm như Hình 11, 12 và 13.



Hình 11: Kết quả lượng mưa tính bằng phương pháp ANN với chuỗi số liệu hiệu chỉnh tại trạm Huế



Hình 12: Kết quả lượng mưa tính bằng phương pháp ANN với chuỗi số liệu hiệu chỉnh tại trạm A Lưới



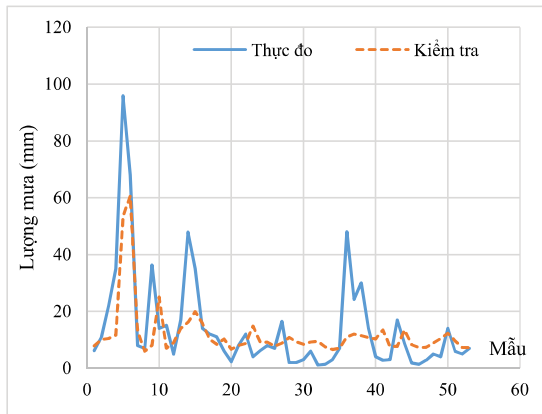
Hình 13: Kết quả hiệu chỉnh của phương pháp ước lượng lượng mưa từ ảnh radar bằng phương pháp ANN chung 2 trạm

Kết quả hiệu chỉnh với lượng mưa được trích xuất từ ảnh radar cho hệ số $NSE = 0,82$ đối với trạm Huế, $NSE = 0,57$ với trạm A Lưới và $NSE = 0,8$ với chuỗi kết hợp cả hai trạm. Với chỉ số NSE đạt ($0,5 < NSE \leq 0,65$) ở trạm A Lưới và ở mức độ rất tốt ($0,75 < NSE \leq 1,0$) của trạm Huế và chung 02 trạm, cho thấy đủ độ tin cậy để lấy bộ ma trận trọng số đã huấn luyện để sử dụng cho kiểm định mô hình.

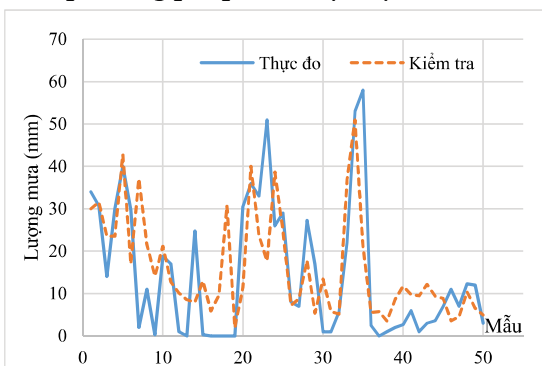
b) Kiểm định

Sử dụng bộ ma trận trọng số thu được từ kết quả hiệu chỉnh với các dữ liệu đầu vào bao gồm các dữ liệu ảnh radar và lượng mưa thực đo tương ứng với khoảng thời gian kiểm định để kiểm tra mô hình ANN. Các kết quả lượng mưa tính toán được từ mô hình thể hiện cùng với các dữ liệu thực đo tại các trạm Huế, A Lưới và chung hai trạm như Hình 14, 15 và 16.

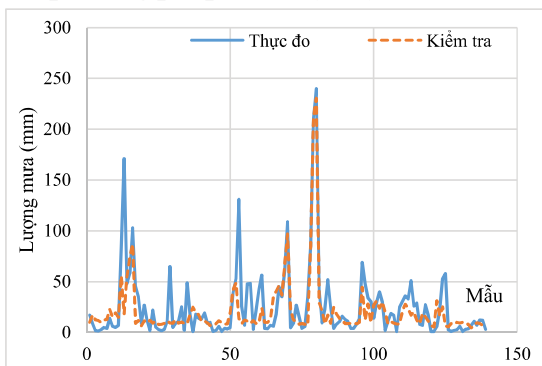
Chỉ số NSE được tính giữa giá trị lượng mưa trong phương án kiểm định với giá trị lượng mưa thực đo tương ứng là $NSE = 0,54$ tại Huế, $NSE = 0,34$ tại A Lưới và $NSE = 0,6$ chung cả hai trạm. Chỉ số NSE của kết quả kiểm định có mức độ tin cậy đạt.



Hình 14: Kết quả kiểm định tính bằng phương pháp ANN tại trạm Huế



Hình 15: Kết quả kiểm định tính bằng phương pháp ANN tại trạm A Lưới

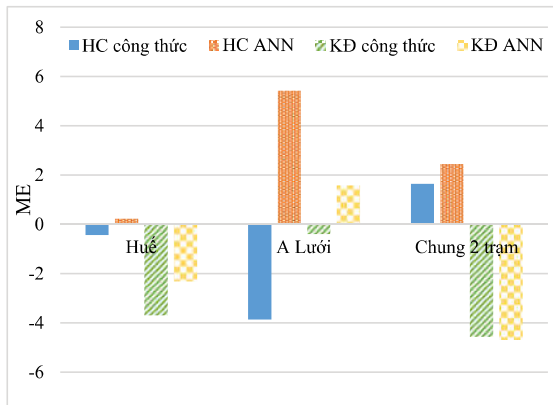


Hình 16: Kết quả kiểm định tính bằng phương pháp ANN chung 2 trạm

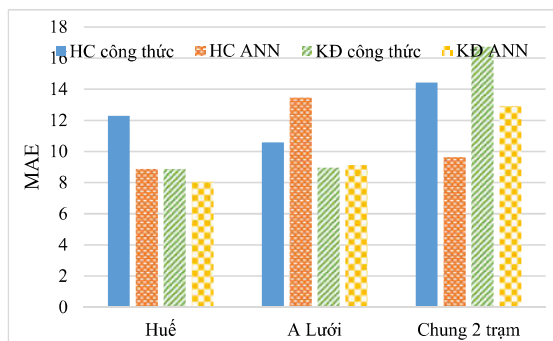
3.3. Tổng hợp kết quả

Dưới đây là thống kê các sai số: Sai số trung bình ME, sai số trung bình tuyệt đối MAE, sai số quân phương RMSE và hệ số hiệu quả NSE để đánh giá độ chính xác giữa kết quả tính toán và giá trị thực đo của các phương pháp sử dụng công thức thực nghiệm hay phương pháp ANN.

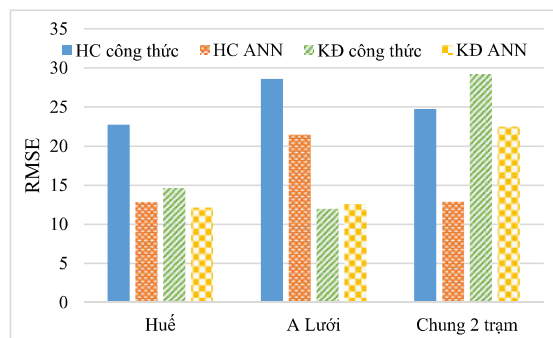
Mỗi phương pháp đều có hai kết quả hiệu chỉnh (HC) và kiểm định (KD) so sánh giữa các trạm riêng lẻ và trường hợp gộp chung hai trạm.



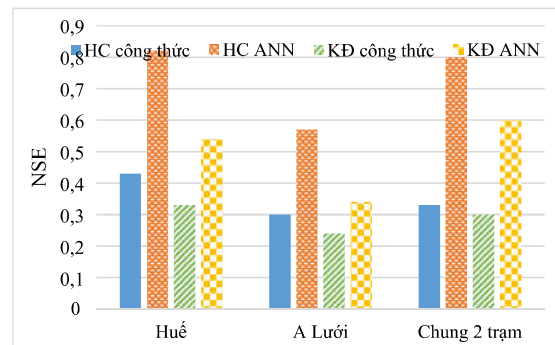
Hình 17: Biểu đồ so sánh sai số trung bình ME giữa phương pháp sử dụng công thức thực nghiệm và phương pháp ANN



Hình 18: Biểu đồ so sánh sai số tuyệt đối MAE giữa phương pháp sử dụng công thức thực nghiệm và phương pháp ANN



Hình 19: Biểu đồ so sánh sai số quân phương RMSE giữa phương pháp sử dụng công thức thực nghiệm và phương pháp ANN



Hình 20: Biểu đồ so sánh về chỉ số hiệu quả NSE giữa phương pháp sử dụng công thức thực nghiệm và phương pháp ANN

Một vài giá trị mưa lớn tính toán từ thời đoạn hiệu chỉnh mô hình đã được so sánh tương đương với giá trị thực đo, như lượng mưa lớn nhất trong chuỗi giá trị hiệu chỉnh tại Huế là 296 mm trong khi kết quả tính toán bằng ANN đạt 294,7 mm, sai số là 1,2 mm (tương đương 0,4 %), kết quả tính toán từ công thức thực nghiệm là 134 mm chênh lệch 162 mm (tương đương 55 %) vào lúc 13h00 ngày 14/10/2022. Thời điểm 07h00 ngày 15/10/2022 giá trị mưa thực đo tại trạm A Lưới là 240 mm và giá trị mưa tính toán là 237,5 mm, sai số giữa giá trị mưa tính toán và giá trị mưa thực đo là 2,5 mm (tương đương 1 %).

Trong chuỗi số liệu kiểm định, tại thời điểm 13h00 ngày 02/12/2022 có lượng mưa lớn nhất tại trạm Huế là 68 mm kết quả phương pháp ANN là 60,6 mm, sai số là 7,4 mm (tương đương là 10,8 %), còn kết quả của phương pháp công thức thực nghiệm là 42 mm (sai số là 38,8 %). Tại trạm A Lưới thực đo 58 mm trong khi kết quả kiểm định phương pháp ANN đạt 21 mm, sai số là 63 %, trong khi kết quả tương đương của công thức thực nghiệm là 17,9 mm.

4. Kết luận

Việc tính cường độ mưa từ độ phản hồi radar tại Thừa Thiên - Huế (cụ thể tại 2

trạm khí tượng là Huế và A Lưới) đã được thử nghiệm với công thức thực nghiệm và mô hình mạng nơ-ron nhân tạo. Kết quả thu được:

- Tính được các hệ số thực nghiệm hay bộ ma trận trọng số mạng nơ-ron cho từng trạm Huế, A Lưới cũng như chung 2 trạm;

- Kết quả cho thấy khả năng áp dụng tốt hơn của mô hình mạng nơ-ron nhân tạo so với phương pháp sử dụng công thức thực nghiệm;

- Kết quả cho thấy tính mưa tại trạm Huế cho kết quả tốt hơn tại trạm A Lưới, điều này có thể giải thích do trạm Huế nằm ở vùng địa hình bằng phẳng, thảm thực vật ít ảnh hưởng đến độ phản hồi radar như tại trạm A Lưới tại địa hình núi cao;

- Cũng do tính không đồng đều về địa hình và thảm thực vật nên sai số khi ghép chung 2 trạm thường lớn hơn từng trạm riêng lẻ;

- Do việc dữ liệu độ phản hồi radar được tái phân tích từ ảnh radar thu thập được theo bảng giá trị màu nên độ chính xác chưa cao (không phải là số liệu gốc) nên kết quả tính toán còn chưa tốt. Ngoài ra, với việc chỉ sử dụng số liệu 01 năm để làm đầu vào nên kết quả có được từ mô hình phân tích dữ liệu vẫn còn hạn chế, có thể chưa phản ánh chính xác mối quan hệ giữa lượng mưa và độ phản hồi radar, cần tiếp tục thu thập số liệu quá khứ cũng như cập nhật số liệu hiện tại và tương lai để làm đầu vào cho việc phân tích, huấn luyện mô hình.

Bài báo đã minh chứng được khả năng áp dụng của phương pháp ANN bước đầu có triển vọng khả quan hơn so với phương pháp ước lượng lượng mưa từ radar theo các công thức thực nghiệm, hoàn toàn có thể sử dụng kết quả để tham khảo trong các nghiệp vụ dự báo mưa hiện nay.

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của đề tài cơ sở chọn lọc cấp Viện Cơ học “Nghiên cứu áp dụng các kỹ thuật phân tích dữ liệu lớn (big data analysis) và học máy (machine learning) trong dự báo khai thác mỏ dầu khí, dự báo ô nhiễm môi trường không khí và phân tích ảnh vệ tinh”. Mã số CSCL03.01/22-23 trong việc thực hiện và công bố nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Nguyễn Hương Điền (2015). *Công thức thực nghiệm tính toán cường độ mưa từ độ phản hồi radar cho khu vực Đông Nam Bộ*. Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, tập 31, số 3S, tr.66 - 70.

[2]. Nguyễn Thị Hằng, Nguyễn Chính Kiên, Dương Thị Thanh Hương (2022). *Ứng dụng một số phương pháp ước tính thông số tối ưu cho mô hình thủy văn phân bố IMECHTV2*. Tạp chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường. ISSN: 0866-7608, số 42, tr.113 - 123.

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

[4]. Krajewski, W. F. and Smith, J. A. (2002). *Radar hydrology: Rainfall estimation*. Advances in Water Resources, 25, 1387 - 1394.

[5]. Smith, J. A. and Krajewski, W. F. (1991). *Estimation of mean field bias of radar rainfall estimates*. Journal of Applied meteorology, 30, 397 - 412.

[6]. Sheng Wang (2021). *Exploring the utility of radar and satellite-sensed precipitation and their dynamic bias correction for integrated prediction of flood and landslide hazards*. Journal of Hydrology, volume 603, part B, December 2021.

[7]. Wilson, J. and Brandes, E. (1979). *Radar measurement of rainfall - A summary*. Bulletin of the American meteorological society, 60, 1048 - 1058.

[8]. Web dữ liệu ảnh radar của Đài Khí tượng cao không: <http://amo.gov.vn/radar/>.

BBT nhận bài: 02/8/2023; Phản biện xong: 16/8/2023; Chấp nhận đăng: 26/9/2023