



Original Article

Case Study of Using the Blending Radar-Numerical Weather Prediction Product in Nowcasting

Mai Van Khiem¹, Woo Wang-chun², Wong Wai-kin², Yeung Siu Lun²,
Du Duc Tien^{1,*}, Mai Khanh Hung¹, Dang Dinh Quan¹, Pham Thi Phuong Dung¹,
Nguyen Thi Nga¹, Chu Thi Huyen Trang¹

¹*National Center for Hydro-Meteorological Forecastings (NCHMF),
No. 8 Phao Dai Lang, Lang Thuong, Dong Da, Hanoi, Vietnam*

²*Hong Kong Observatory (HKO), 132 Nathan Road, Tsim Sha Tsui, Kowloon, Hongkong*

Received 15 September 2020

Revised 26 January 2021; Accepted 10 February 2021

Abstract: In the very short-range forecast (less than 12 hours) of heavy rain and severe thunderstorms, the main challenge is primarily on tracking and predicting growth and decay of significant convective systems. With the advances in nowcasting techniques, analysis and nowcasting of heavy rain and thunderstorm from radars and satellites have been improving progressively. The intensity changes of convective weather from direct output of numerical weather prediction (NWP) models would contain substantial errors due to data assimilation and spin-up issues of model physical processes. In this paper, we would introduce a new blending system being implemented in NCHMF to enhance nowcasting and forecasting services. The system includes: i) extrapolations of rain/convective systems of Vietnam's radar mosaic (or single radars) for first 1-6 hours based on radar based on the Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems (SWIRLS) developed by the Hong Kong Observatory (HKO), and ii) a rapidly update convective-permitting NWP system based on WRF-ARW in the convective scale to provide the forecast up to the next 12 hours. Firstly, 1-6 hours forecast from models are calibrated with radar-based quantitative precipitation estimates and nowcasts. The study will present some initial results of the blending system and discuss verification of the quantitative precipitation forecast.

Keywords: SWIRLS; nowcasting; radar extrapolation; high resolution numerical weather prediction.

* Corresponding author.

E-mail address: duductien@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4686>

Thử nghiệm ứng dụng radar kết hợp mô hình số trị trong dự báo mưa hạn cực ngắn

Mai Văn Khiêm¹, Woo Wang-chun², Wong Wai-kin², Yeung Siu Lun²,
Dư Đức Tiến^{1,*}, Mai Khánh Hưng¹, Đặng Đình Quân¹, Phạm Thị Phương Dung¹,
Nguyễn Thị Nga¹, Chu Thị Huyền Trang¹

¹Trung tâm Dự báo khí tượng Thủy văn Quốc gia (NCHMF),
Số 8 Pháo Đài Láng, Láng Thượng, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

²Cơ quan khí tượng Hồng Kông (HKO), 132 Đường Nathan, Tsim Sha Tsui, Kowloon, Hồng Kông

Nhận ngày 15 tháng 9 năm 2020

Chỉnh sửa ngày 26 tháng 01 năm 2021; Chấp nhận đăng ngày 10 tháng 02 năm 2021

Tóm tắt: Trong nghiệp vụ dự báo cực ngắn (hạn dự báo dưới 12h) cho mưa lớn và các hiện tượng dông lốc, những thách thức chính đến từ việc theo dõi và dự báo sự phát triển và tan rã của các hệ thống đối lưu nguy hiểm. Với những sự phát triển hiện nay của kỹ thuật dự báo cực ngắn, việc phân tích và dự báo hiện tượng mưa lớn và dông lốc từ radar và vệ tinh đã có những bước tiến vượt bậc. Những sự thay đổi về cường độ của các hệ thống đối lưu khi khai thác trực tiếp từ mô hình số (NWP) vẫn có chứa đựng các sai số do các quá trình đồng hoá số liệu và thời gian thích ứng của mô hình (spin-up) đối với các quá trình vật lý trong mô hình. Trong nghiên cứu này, chúng tôi muốn giới thiệu một hệ thống kết hợp (blending) đang được triển khai nghiệp vụ tại Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn quốc gia (NCHMF) nhằm tăng cường khả năng dự báo nói chung và trong lĩnh vực dự báo cực ngắn nói riêng. Hệ thống sẽ bao gồm: i) các sản phẩm ngoại suy cho 1-6h đối với mưa và hệ thống đối lưu dựa trên quan trắc radar thông qua hệ thống dự báo cực ngắn SWIRLS của Cơ quan khí tượng Hồng Kông (HKO) và ii) hệ thống dự báo số trị quy mô đối lưu dựa trên mô hình WRF-ARW cho các dự báo đến 12h tiếp theo. Sản phẩm từ 1-6h đầu dự báo từ mô hình sẽ được hiệu chỉnh dựa trên ước lượng mưa từ radar và các dự báo cực ngắn (ngoại suy) dựa trên quan trắc radar. Một số kết quả ban đầu sẽ được minh họa khi áp dụng với các dữ liệu quan trắc radar và kết hợp (blending) với sản phẩm mô hình khí tượng phân giải cao (NWP) để dự báo mưa định lượng hạn cực ngắn tại Việt Nam.

Từ khóa: Hệ thống SWIRLS; Cảnh báo cực ngắn; Ngoại suy radar; Mô hình thời tiết phân giải cao

1. Mở đầu

Trong dự báo nghiệp vụ thời tiết, vấn đề dự báo mưa, đặc biệt dự báo định lượng mưa (Quantitative Precipitation Forecast) là một bài toán vô cùng phức tạp không chỉ ở Việt Nam, mà còn của nhiều nước có nền khoa học công nghệ

tiến tiến như Mỹ, Đức, Nhật Bản, Pháp, Canada,... Bên cạnh các phương pháp dự báo truyền thống như phương pháp Sy-nốp, phương pháp thống kê thì phương pháp số trị (hoặc phương pháp động lực sử dụng phương pháp số để giải xấp xỉ các phương trình toán, lý mô phỏng các quá trình chuyển động trong khí

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: duductien@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4686>

quyển) là phương pháp chính được áp dụng cho bài toán dự báo định lượng chi tiết mưa [1-5].

Trong dự báo hạn ngắn (<24 h), nếu chỉ ứng dụng các sản phẩm mô hình số trị đơn thuần sẽ gặp rất nhiều sai số do mô hình luôn cần có một thời gian thích ứng nhất định (spin-up time), thông thường cần từ 1-6 giờ để ổn định các nhiễu động ban đầu, khi đó các tác động yếu (weak forcing) vẫn có thể tạo ra các phát động (trigger) cho các ổ đối lưu gây mưa sẽ bị là đi nếu không được cập nhật, đồng hóa thông tin từ nguồn số liệu radar mật độ cao [6, 7].

Đối với bài toán dự báo mưa định lượng hạn cực ngắn từ 0-12 giờ (còn gọi là now-casting) chủ yếu liên quan đến các cảnh báo và dự báo các hiện tượng dông lốc nguy hiểm có kèm theo mưa và mưa lớn. Về phương pháp tiếp cận, dự báo hạn cực ngắn dựa trên số liệu radar và vệ tinh với thời gian cập nhật cao (5-10 phút một lần) để xác định các vùng mây đối lưu sâu và mây có khả năng gây mưa cao và ước lượng sự dịch chuyển (sử dụng số liệu liên tiếp theo thời gian bằng phương pháp biến phân VET- Variational Echo Tracking hoặc phương pháp tương quan cực đại cho độ phản hồi TREC - Tracking Radar Echoes by Correlation) [8]. Sau khi xây dựng được trường hướng và tốc độ dịch chuyển của các ổ đối lưu có khả năng gây mưa, dông lốc sẽ áp dụng phương pháp Lagrangian để ngoại suy độ phản hồi hoặc bức xạ vệ tinh theo thời gian để xác định các vùng ảnh hưởng trong hạn ngắn. Dựa vào các trường phản hồi radar hoặc bức xạ vệ tinh đã được ngoại suy, kết hợp với các thuật toán ước lượng mưa và hòa hợp với sản phẩm dự báo số (blending) để thu được trường mưa dự báo cực ngắn. Một số hệ thống điển hình áp dụng trong nghiệp vụ là hệ thống MAPPLE của Cục khí tượng Canada [9, 10] hoặc hệ thống mở rộng SWIRLS trong dự báo cực ngắn của cục khí tượng Hồng Kông [11]. Một trong những hạn chế của phương pháp này là vẫn giả định độ phản hồi hay bức xạ đo đạc từ vệ tinh là bảo toàn (các tracer) theo thời gian ngắn dẫn tới khi áp dụng cho các ổ đối lưu ở giai đoạn thoái trào (sắp sửa tan rã) có thể gặp sai số lớn. Để giảm thiểu sai số do giả thiết này, thông thường các số liệu mưa tự

động với mật độ theo không gian cao sẽ được bổ sung để hiệu chỉnh liên tục [10, 11]. Như vậy có thể thấy để triển khai trong nghiệp vụ dự báo định lượng mưa cực ngắn sẽ gồm hai phần chính: i) Hệ thống tính toán ngoại suy dự báo các vùng mây, mưa trong hạn 1-6 giờ từ sản phẩm radar, vệ tinh và mưa tự động; và ii) Hệ thống mô hình số quy mô đối lưu với độ phân giải từ 2-3 km và hạn dự báo đến 6-12 giờ có cập nhật đầy đủ các số liệu radar, quan trắc mưa truyền thống và mưa tự động bằng phương pháp đồng hóa số liệu. Ngoài ra dự báo từ mô hình quy mô đối lưu cũng sẽ được kết hợp để hiệu chỉnh với kết quả dự báo ngoại suy hạn 1-6 giờ.

Dựa trên hệ thống cảnh báo hạn ngắn mưa dông nguy hiểm (SWIRLS) của Cơ quan khí tượng Hồng Kông, nghiên cứu sẽ trình bày một số kết quả nghiên cứu ban đầu trong việc xây dựng hệ thống dự báo mưa định lượng cực ngắn dựa trên hệ thống quan trắc radar của Việt Nam được Tổng cục Khí tượng thủy văn đầu tư nâng cấp, đồng bộ trong những năm gần đây và sản phẩm mô hình số trị phân giải cao (3 km) đang chạy nghiệp vụ tại Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn quốc gia.

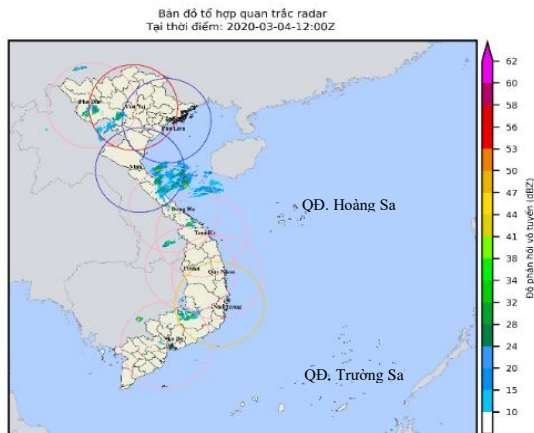
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Quan trắc radar, dự báo mô hình khí tượng phân giải cao

2.1.1. Quan trắc radar và ước lượng mưa từ độ phản hồi quan trắc của radar

Hiện tại, mạng lưới ra đa thời tiết của Việt Nam có 10 trạm radar gồm 04 loại ra đa chính, cụ thể là ra đa JMA-272 của Nhật Bản (đặt tại Phù Liên và Vinh); radar WRC200 từ Phần Lan (đặt tại Pha Đin, Đông Hà, Tam Kỳ, Pleiku, Quy Nhơn và Nhà Bè); ra đa TRS2730 từ Pháp (ở Việt Trì) và DWRS2500C từ Mỹ (ở Nha Trang). Trong đó, radar thời tiết tại các trạm Phù Liên, Vinh, Đông Hà, Tam Kỳ, Nha Trang là các ra đa Dopple phân cực đơn; hệ thống tại các trạm Pha Đin, Pleiku và Quy Nhơn là radar thời tiết Dopple phân cực kép. Hình 1 minh họa mạng lưới quan trắc radar hiện tại của Việt Nam.

Sau khi có được quan trắc độ phản hồi radar, sử dụng quan hệ thực nghiệm dựa độ phản hồi quan trắc từ radar và tốc độ mưa của Marshall-Palmer [12, 13] ta có thể ước lượng được cường độ mưa R (mm/h) từ độ phản hồi vô tuyến của mục tiêu Z (mm^6/m^3) của radar như sau $Z = AR^B$ trong đó A, B là các tham số thực nghiệm, giá trị điển hình là $A=200$ và $B=1,6$. Sử dụng quan hệ giữa $Z'=10\lg Z$ với Z' (dBZ) là độ phản hồi của radar ta có phương trình cho ước lượng cường độ mưa như sau $R = C10^{DZ}$.



Hình 1. Mạng lưới ra đa thời tiết tại Việt Nam

2.1.2. Mô hình khí tượng phân giải cao và mô phỏng độ phản hồi radar

Trong nghiên cứu sử dụng hệ thống mô hình khu vực WRF với nhân động lực ARW phiên bản 3.9.1.1 do Trung tâm dự báo môi trường quốc gia Mỹ (NCEP) phát triển (gọi tắt là WRF-ARW). Đây là hệ thống mô hình khu vực được áp dụng trong nghiên cứu và nghiệp vụ với các ứng dụng đa dạng từ mô phỏng lý tưởng xoáy, sóng núi đến áp dụng các bài toán dự báo thời tiết hoặc các điều kiện thời tiết nguy hiểm như mưa, bão/xoáy thuận nhiệt đới và được cộng đồng khoa học hỗ trợ và phát triển. Chi tiết hơn về mô hình WRF-ARW có thể tham khảo trong [14, 15] và các ứng dụng tại Việt Nam trong [16-19]. Từ năm 2018, mô hình WRF-ARW được thiết lập với độ phân giải 3km cho miền tính bao phủ toàn bộ Việt Nam và Biển Đông và sử dụng trường điều kiện biên từ mô hình IFS của Trung tâm dự báo khí tượng hạn vừa Châu

Âu (ECMWF), hạn dự báo đến 72h cập nhật 2 lần/ngày.

Bên cạnh việc sử dụng sản phẩm mưa dự báo từ mô hình WRF-ARW, để thực hiện việc hiệu chỉnh trường mưa của mô hình ở thời đoạn trước 6 h, từ các thông tin dự báo nhiệt, ẩm của mô hình WRF-ARW, trường mô phỏng độ phản hồi radar (simulated radar reflectivity) sẽ được tính toán để thực hiện việc hòa hợp (blending) với độ phản hồi thực tế từ radar và độ phản hồi ngoại suy cục ngắn từ radar (extrapolated reflectivity). Dựa theo công thức liên hệ với lượng nước trong mưa q_r (của mô hình) và độ phản hồi từ radar Z_{model} của Marshall-Palmer [14] và với giả thiết phân bố của kích thước hạt mưa là $8 \times 10^6 \text{mm}^{-4}$ ta có:

$$Z_{\text{model}} = 2,04 \times 10^4 (\rho q_r)^{1,75}$$

Hoặc dưới dạng logarit:

$$H_z = 43,1 + 17,5 \log \left(\frac{\rho q_r}{1 \text{kg/m}^3} \right)$$

Trong đó: ρ là mật độ không khí và q_r là hàm lượng nước mưa. Đơn vị của H_z là dbz. Trong phương pháp đồng hóa số liệu, H_z còn được gọi là toán tử mô phỏng độ phản hồi của radar từ mật độ không khí và hàm lượng nước mưa cho trước [13, 16].

2.2. Hệ thống cảnh báo hạn ngắn mưa dông nguy hiểm (SWIRLS)

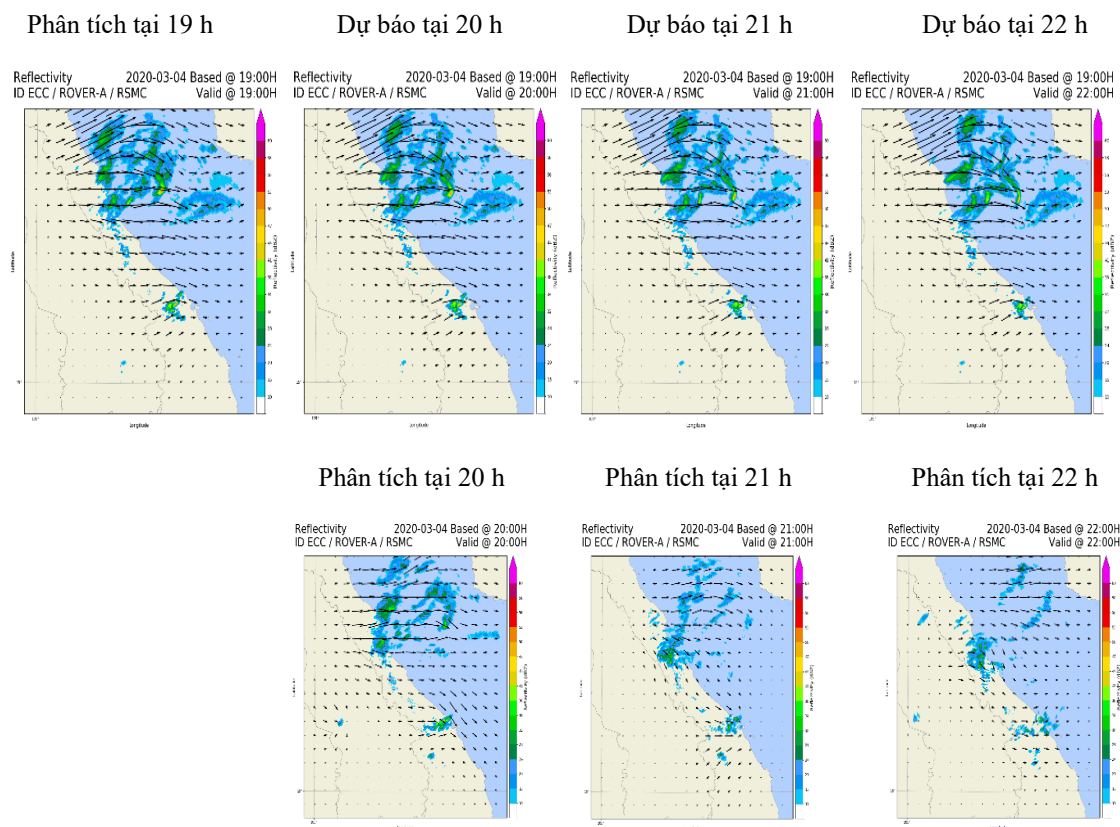
SWIRLS (Short-range Warning of Intense Rainstorms in Localized Systems) là hệ thống cảnh báo hạn ngắn mưa dông nguy hiểm do Cơ quan khí tượng Hồng Kông phát triển [11, 20]. SWIRLS áp dụng thuật toán optical flow (dòng quang học) đối với số liệu quan trắc radar liên tiếp theo thời gian để xây dựng được trường hướng và tốc độ dịch chuyển của các ô đối lưu có khả năng gây mưa, dông lốc và sau đó áp dụng phương pháp Lagrangian để ngoại suy độ phản hồi hoặc bức xạ vệ tinh theo thời gian (đến 3 tiếng) để xác định các vùng ảnh hưởng trong hạn ngắn.

Phương pháp dòng quang học là một kỹ thuật thuộc lĩnh vực xử lý ảnh, thuật toán dựa trên đặc tính và giả thiết liên tục về mặt thời gian của các object/pattern (vật thể/mẫu dạng) và phân tích từ dữ liệu chụp quang học (thể hiện cho việc quan

sát liên tục bằng mắt người). Chuyển động ảnh của một vật thể/mẫu dạng có đặc tính thể hiện quan sát được là một dạng bề mặt cụ thể và thay đổi theo thời gian (nên còn gọi là chuyển động từ frame (khung ảnh) đến frame).

Hình 2 minh họa kết quả tính toán trường chuyển động cho radar Đông Hà từ lúc 18h đến

19h ngày 3 tháng 4 năm 2020 để dự báo đến 3 tiếng cùng ngày sau đó. Trong Hình 2 cũng cho thấy mặc dù trường chuyển động được dự báo khá phù hợp, tuy nhiên do giả thiết không tiêu tán trong quá trình dịch chuyển nên dẫn tới những hệ thống đông trong quá trình tan giã (decay) sẽ ít được đánh giá phù hợp.



Hình 2. Minh họa kết quả tính toán trường chuyển động cho radar Đông Hà vào lúc 19h ngày 3 tháng 4 năm 2020 và dự báo đến 3 tiếng sau đó. Trường phân tích là quan trắc từ radar, trường dự báo là tính toán ngoại suy bằng hệ thống SWIRLS.

2.3. Quá trình kết hợp (blending) giữa radar và mô hình khí tượng phân giải cao

Sau khi có được độ phản hồi ngoại suy (1-6 h) và độ phản hồi mô phỏng từ mô hình WRF-ARW, với giả định rằng dữ liệu từ mô hình số có cùng đặc trưng thống kê là hàm Phân bố xác suất tích lũy Weibull (Cumulative Probability Distribution CPDF) với quan trắc radar [11], độ phản hồi mô hình và độ phản hồi

ngoại suy được kết hợp (blending) dựa trên hàm trọng số dạng đường cong hyperbolic [4, 5, 21]:

$$w(t) = g \times \alpha \times \frac{(\beta - \alpha)}{2} [1 + \tanh(\gamma(t - 9))]]$$

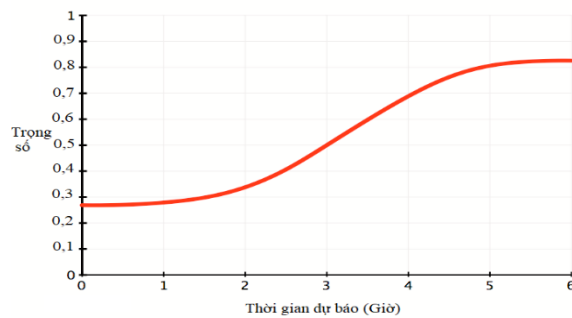
Trong đó: t là thời gian, các tham số g, α, β và γ có giá trị tương ứng là 145, 0,01, 0,65 và 0,24 được sử dụng trong nghiên cứu này. Các đánh giá trao đổi về các hệ số này sẽ được đề cập trong nghiên cứu tiếp theo. Minh họa hàm trọng

số được đưa ra trong Hình 3 ứng dụng tại HKO đối với mô hình NHM cho hạn đến 6 tiếng [4].

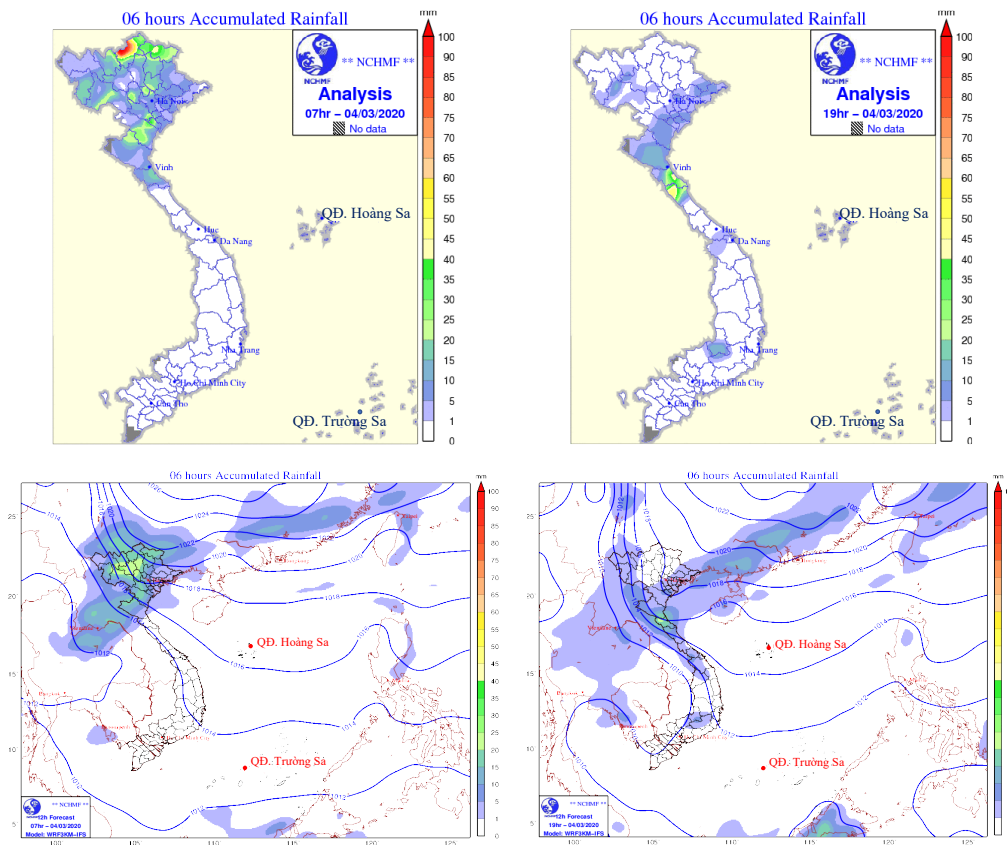
Khi đó, với các vùng có giá trị phản hồi ngoại suy radar (QPF_{SWIRLS}) sẽ được kết hợp với mô hình số (QPF_{WRF}) theo công thức:

$$QPF_{RAINS} = (1 - w(t)) \times QPF_{SWIRLS} + w(t) \times QPF_{WRF}$$

Sau đó giá trị QPF_{RAINS} sẽ được chuyển đổi sang giá trị mưa trong phần 2.1.1.



Hình 3. Minh họa giá trị hàm trọng số khi kết hợp (blending) giữa trường độ phản hồi radar mô phỏng từ mô hình và trường phản hồi ngoại suy từ radar [4].



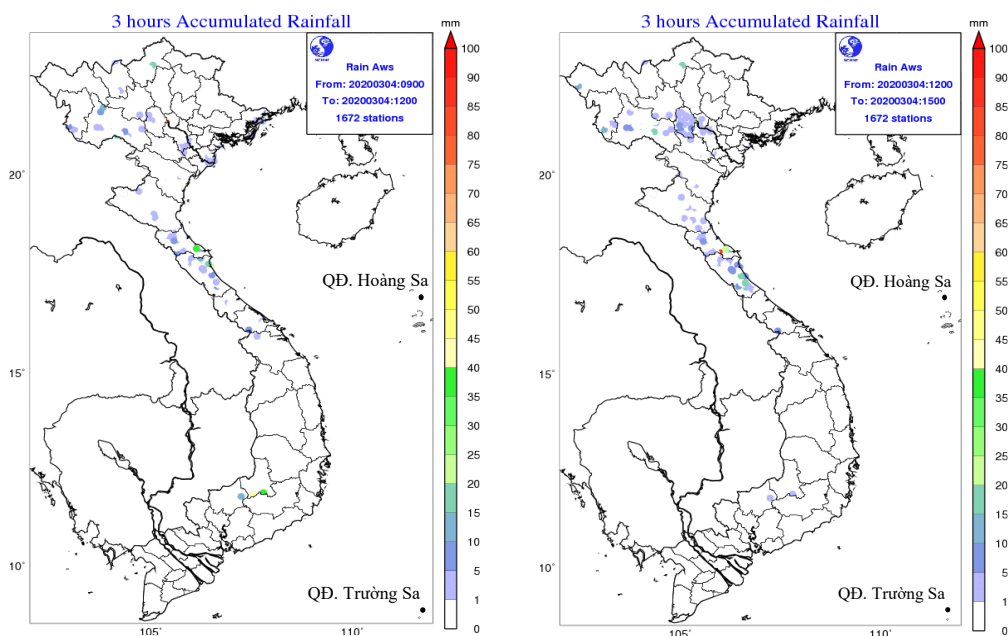
Hình 4. Quan trắc mưa tích lũy trong 6h và dự báo từ mô hình WRF-ARW tương ứng từ 00UTC-06UTC (trái) và 06UTC-12UTC (phải) ngày 4 tháng 3 năm 2020.

3. Thử nghiệm

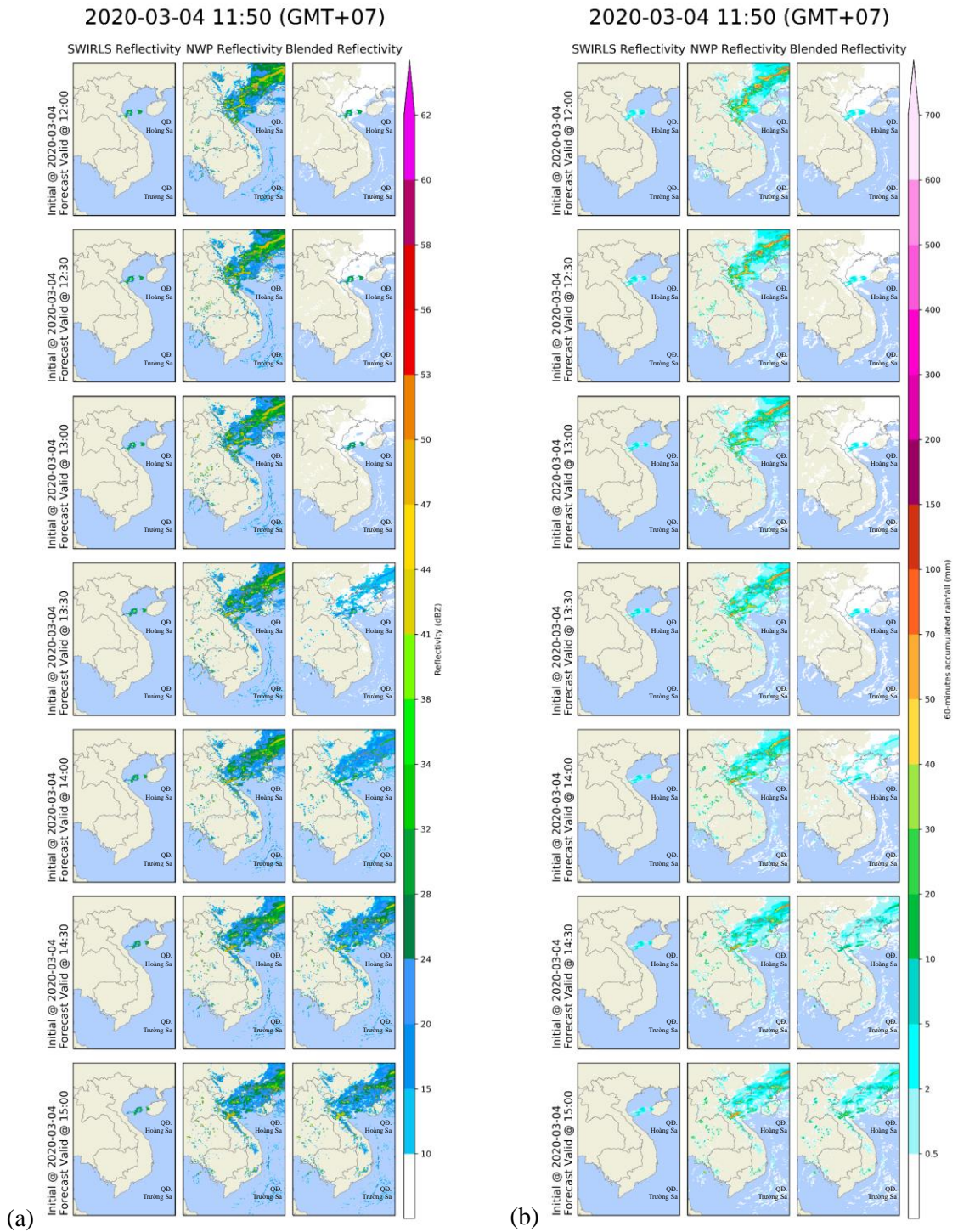
Nghiên cứu trình bày kết quả thử nghiệm hệ thống SWIRLS với các số liệu quan trắc và mô hình đang sử dụng trong nghiệp vụ dự báo tại Việt Nam tại thời điểm 12 UTC (19 giờ địa phương) ngày 4 tháng 3 năm 2020. Các sản phẩm dự báo từ mô hình WRF-ARW được trích xuất ra 10 phút một lần dùng để mô phỏng độ phản hồi radar.

Về điều kiện thời tiết trong ngày 4 tháng 3 năm 2020, do chịu ảnh hưởng của rìa Tây Nam lười áp cao lục địa kết hợp với vùng hội tụ gió phát triển từ mực 1500 m đến 5000 m nên gây ra mưa vừa đến mưa to và trên khu vực Bắc Bộ và Bắc Trung Bộ. Hình 4 minh họa mưa quan trắc tích lũy trong 6h và dự báo từ mô hình WRF-ARW tương ứng. Về cơ bản, kết quả ở Hình 4 cũng cho thấy tính phù hợp của dự báo mô hình ở các thời đoạn mưa tích lũy 6 tiếng. Tuy nhiên trong dự báo cực ngắn ứng với các giờ quan trắc khác nhau, mô hình có nhiều hạn chế như đã đề cập trong phần 1. Cụ thể trong Hình 6 là kết quả minh họa kết quả dự báo độ phản hồi bằng phương pháp ngoại suy từ thời điểm 12 UTC đến

15 UTC ngày 4/3/2020 (cột bên trái), độ phản hồi mô phỏng từ mô hình WRF-ARW cùng thời điểm tương ứng (cột giữa) và kết quả kết hợp cuối cùng giữa mô hình và ngoại suy (cột bên phải). Ta thấy rằng trên thực tế mưa ở khu vực Bắc Bộ đã giảm thông qua quan trắc radar cũng như sản phẩm ngoại suy từ 12 UTC đến 13 UTC, tuy nhiên mô hình cho mưa khá nhiều ở khu vực này và trong 1,5 giờ đầu, sản phẩm hiệu chỉnh đã loại bỏ đi được các vùng mưa không từ mô hình một cách hiệu quả. Các giờ tiếp theo, hầu hết giá trị dự báo ngoại suy đều không cho mưa trên toàn bộ Bắc Bộ và Trung Bộ (thể hiện qua các quan trắc mưa tự động trong Hình 5) kéo tới việc hiệu chỉnh giảm đi độ phản hồi mô phỏng khá lớn từ mô hình đều trên 50 dBZ xuống còn khoảng 30-40 dBZ. Tương ứng với các giá trị độ phản hồi đã hiệu chỉnh, cường độ mưa dự báo giảm so với mô hình dự báo ban đầu từ phổ biến 30-50 mm/h xuống 20-30 mm/h và vẫn giữ được dự báo vùng tâm mưa chính ở khu vực Hà Tĩnh và Quảng Bình, hay nói cách khác đã giảm được giá trị dự báo không của mô hình so với thực tế trong trường hợp thử nghiệm.



Hình 5. Quan trắc mưa tích lũy 3 tiếng từ 9-12 UTC (trái) và từ 12-15 UTC (phải) tại các trạm quan trắc tự động ngày 4/3/2020.



Hình 6. Minh họa kết quả dự báo độ phản hồi bằng phương pháp ngoại suy từ thời điểm 12 UTC đến 15 UTC ngày 4/3/2020 tại Hình a: (cột bên trái), độ phản hồi mô phỏng từ mô hình WRF-ARW cùng thời điểm tương ứng (cột giữa) và kết quả kết hợp cuối cùng giữa mô hình và ngoại suy (cột bên phải). Tương tự nhưng Hình b ứng với giá trị lượng mưa (mm/h).

4. Kết luận

Những kết quả thử nghiệm bước đầu của nghiên cứu cho thấy khả năng ứng dụng cao của hệ thống cảnh báo hạn ngắn mưa dông nguy hiểm (SWIRLS) do Cơ quan khí tượng Hồng Kông (HKO) phát triển dựa trên các dữ liệu quan trắc radar và kết hợp (blending) với sản phẩm mô hình khí tượng phân giải cao (NWP) để có được sản phẩm dự báo mưa định lượng - khách quan hạn cực ngắn tại Việt Nam. Để tiếp tục ứng dụng trong nghiệp vụ, cần thiết có những thử nghiệm nhiều trường hợp hơn, đánh giá chất lượng hiệu chỉnh với quan trắc thực tế để qua đó xác định được các thông số hàm kết hợp phù hợp cho Việt Nam nói chung và cho từng khu vực nói riêng.

Tài liệu tham khảo

- [1] K. Stephan, S. Klink, C. Schraff, Assimilation of Radar-Derived Rain Rates into the Convective-Scale Model COSMO-DE at DWD, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 134, 2008, pp. 1315–1326, <https://doi.org/10.1002/qj.269>.
- [2] A. Walsler, D. Lüthi, C. Schär, Predictability of Precipitation in a Cloud-Resolving Model, Monthly Weather Review, Vol. 132, 2004, pp. 560-577, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132%3C0560:POPIAC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132%3C0560:POPIAC%3E2.0.CO;2).
- [3] L. Cuo, T. C. Pagano, Q. J. Wang, A Review of Quantitative Precipitation Forecasts and Their Use in Short- to Medium-Range Streamflow Forecasting, Journal of Hydrometeorology, Vol. 12, 2011, pp. 713-728, <https://doi.org/10.1175/2011JHM1347.1>.
- [4] W. K. Wong, L. Yeung, Y. C. Wang, M. X. Chen, Towards The Blending of NWP with Nowcast: Operation Experience in B08FDP World Weather Research Program Symposium on Nowcasting, Whistler, BC, Canada, 2009.
- [5] G. Wang, W. K. Wong, Y. Hong, L. Liu, J. Dong, M. Xue, Improvement of Forecast Skill for Severe Weather by Merging Radar-Based Extrapolation and Storm-Scale NWP Corrected Forecast, Atmospheric Research, Vol 154, 2015, pp. 14-24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.10.021>.
- [6] X. Li, J. R. Mecikalski, Assimilation of The Dual-Polarization Doppler Radar Data for a Convective Storm with a Warm-Rain Radar Forward Operator, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, Vol. 115, 2010, <https://doi.org/10.1029/2009JD013666>.
- [7] M. Lindskog, K. Salonen, H. Järvinen, D. B. Michelson, Doppler Radar Wind Data Assimilation with HIRLAM 3DVAR. Monthly Weather Review, Vol. 132, 2004, pp. 1081-1092, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<1081:DRWDAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<1081:DRWDAW>2.0.CO;2).
- [8] M. Dixon, G. Wiener, TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting-A Radar-based Methodology, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 10, 1993, pp. 785-797, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1993\)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2).
- [9] A. Bellon, I. Zawadzki, A. Kilambi et al., McGill Algorithm for Precipitation Nowcasting by Lagrangian Extrapolation (MAPLE) Applied to the South Korean Radar Network. Part I: Sensitivity Studies of the Variational Echo Tracking (VET) Technique, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 46, 2010, pp. 369-381, <https://doi.org/10.1007/s13143-010-1008-x>.
- [10] B. J. Turner, I. Zawadzki, U. Germann, Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. Part III: Operational Nowcasting Implementation (MAPLE), Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 43, 2004, pp. 231-248, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043%3C0231:POPFGR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043%3C0231:POPFGR%3E2.0.CO;2).
- [11] M. C. Wong, E. S. T. Lai, P. W. Li, Applications of Nowcasting Products to Real-time Warning of Hazardous Weather in Hong Kong, WMO PWS Workshop on Warnings of Real-time Hazards by Using Nowcasting Technology, Sydney, Australia, 2006.
- [12] N. H. Dien, Empirical Formulas for Calculating Rainrate from Radar Reflectivity for the Mid-Central Vietnam. VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology, Vol. 25, No. 3S, 2009, pp. 390-396 (in Vietnamese).
- [13] J. Sun, N. A. Crook, Dynamical and Microphysical Retrieval from Doppler Radar Observations Using a Cloud Model and Its Adjoint. Part I: Model Development and Simulated Data Experiments, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 54, 1997, pp. 1642-1661, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054%3C1642:DAMRFD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054%3C1642:DAMRFD%3E2.0.CO;2).
- [14] J. Michalakes, J. Dudhia, D. Gill, T. Henderson, J. Klemp, W. Skamarock, W. Wang, The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance, Proceedings of the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High-

- Performance Computing in Meteorology, World Scientific, 2005, pp. 156-168, https://doi.org/10.1142/9789812701831_0012.
- [15] W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, J. G. Powers, A Description of the Advanced Research WRF Version 3, University Corporation for Atmospheric Research, 2008, <http://dx.doi.org/10.5065/D68S4MVH>.
- [16] D. D. Tien, B. M. Tang, V. V. Hoa, P. T. Vui, T. A. Duc, N. T. Tung, Assimilating Dong Ha Radar to Improve the Quality of Heavy Rainfall Forecast Over the Middle Vietnam, Vietnam Journal of Hydrometeorology, No. 632, 2013, pp. 12-19 (in Vietnamese).
- [17] K. Q. Chanh, Overview of the Ensemble Kalman Filter and Its Application to the Weather Research and Forecasting (WRF) Model, VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology, No. 1S, pp. 17-28 (in Vietnamese).
- [18] V. V. Hoa, Skill Validations of Tropical Cyclone Track Forecast of the WRF Model, Vietnam Journal of Hydrometeorology, No. 3, 2008, pp. 37-46 (in Vietnamese).
- [19] T. T. Tien, C. Thanh, N. T. Phuong, Forecasting Hurricane Intensity Over on Eastern Sea of Viet Nam Using WRF Model for 5-day Term, VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology, Vol. 28, No. 3S, 2012, pp. 155-160 (in Vietnamese).
- [20] D. J. Yik, Y. W. Sang, N. K. Chang, F. J. Fakaruddin, A. Dindang, M. H. Abdullah, Analysis of the Cyclonic Vortex and Evaluation of the Performance of the Radar Integrated Nowcasting System (RaINS) During the Heavy Rainfall Episode which Caused Flooding in Penang, Malaysia on 5 November 2017, Tropical Cyclone Research and Review, Vol. 7, No. 4, 2018, pp. 217-229, <https://doi.org/10.6057/2018TCRR04.03>.
- [21] D. Yang, S. Shen, L. Shao, A study on Blending Radar and Numerical Weather Prediction Model Products in Very Short-range Forecast and Nowcasting, Proceedings of SPIE, Vol. 7498, 2009, <https://doi.org/10.1117/12.832627>.