



Original Article

Constructing Rapid Refresh System for Rainfall Nowcasting (0-6 h) at the Ho Chi Minh City

Truong Ba Kien, Vu Van Thang*, Tran Duy Thuc,
Nguyen Quang Trung, Pham Xuan Quan

*Vietnam Institute of Meteorology, Hydrology and Climate Change
No. 23/62 Nguyen Chi Thanh, Hanoi, Vietnam*

Received 16 September 2020

Revised 26 January 2021; Accepted 02 February 2021

Abstract: This study presents an hourly updated assimilation and model forecast system (Rapid Refresh - RAP) designed for rainfall nowcasting at Ho Chi Minh city (named HCM-RAP). The HCM-RAP implemented the Weather Research and Forecasting (WRF) model, driven by Global Forecast System (GFS) data at horizontal resolution of 0.25x0.25 degree, in combination with rapid update of radar data at Nha Be station. The HCM-RAP is evaluated during the heavy rainfall event of 25-26 November 2018 against observation data at 10 stations. Results show the advantage of data assimilation in the improvement of hourly rainfall forecast, in compared with the forecast from the experiment without assimilated data. However, the rainfall forecast amount was still underestimated by the HCM-RAP. This is the first attempt for heavy rainfall forecasting and warning for Ho Chi Minh city. In order to implementing the HCM-RAP for operational forecast, further study is recommended, for instance, more heavy rainfall events and in merger with quantitative precipitation estimation from radar and satellite data.

Keywords: Nowcasting, Rapid refresh, Ho Chi Minh city, WRF-DA.

* Corresponding author.

E-mail address: vvthang26@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4694>

Nghiên cứu xây dựng hệ thống đồng hóa với khả năng cập nhật nhanh dữ liệu ra-đa dự báo mưa lớn hạn cực ngắn (0-6 h) cho Thành phố Hồ Chí Minh

Trương Bá Kiên, Vũ Văn Thăng*, Trần Duy Thúc,
Nguyễn Quang Trung, Phạm Xuân Quân

*Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi Khí hậu
23/62 Nguyễn Chí Thanh, Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 16 tháng 9 năm 2020

Chỉnh sửa ngày 25 tháng 01 năm 2021; Chấp nhận đăng ngày 02 tháng 02 năm 2021

Tóm tắt: Bài báo này trình bày hệ thống đồng hóa và cập nhật nhanh dữ liệu (Rapid Refresh - RAP) dự báo mưa lớn hạn cực ngắn cho Thành phố Hồ Chí Minh (TPHCM) (HCM-RAP). Hệ thống HCM-RAP sử dụng mô hình WRF với số liệu đầu vào GFS ở độ phân giải 0.25×0.25 độ kinh vĩ, kết hợp với cập nhật nhanh dữ liệu quan trắc ra-đa Nhà Bè. Hệ thống được thử nghiệm với trường hợp mưa lớn ngày 25-26 tháng 11 năm 2018 tại TPHCM. Kết quả dự báo mưa lớn hạn cực ngắn cho đợt mưa này bằng hệ thống HCM-RAP cho thấy rằng dự báo mưa sử dụng đồng hóa và cập nhật nhanh dữ liệu ra-đa cải thiện hơn so với trường hợp không đồng hóa và cập nhật nhanh dữ liệu, tuy nhiên lượng mưa dự báo vẫn thấp hơn so với thực tế. Đây là kết quả bước đầu trong bài toán dự báo và cảnh báo mưa lớn hạn cực ngắn cho TPHCM. Để ứng dụng hệ thống HCM-RAP vào dự báo nghiệp vụ cần tiếp tục thử nghiệm cho nhiều trường hợp hơn và cần có sự kết hợp với kết quả ước lượng mưa từ số liệu ra-đa và vệ tinh.

Từ khóa: Mưa lớn hạn cực ngắn, RAP, TPHCM, WRF-DA.

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, dưới tác động của biến đổi khí hậu, những trận mưa lớn trong thời đoạn ngắn ở TPHCM có sự gia tăng về tần suất cũng như cường độ và trái với quy luật khí hậu, gây ra những thiệt hại lớn về kinh tế - xã hội. Mưa lớn gây ra ngập úng nghiêm trọng trên địa bàn thành phố, ví dụ như trận mưa lớn xảy ra vào chiều tối ngày 15/09/2015 với tổng lượng mưa trên 130 mm đã làm giao thông trên khu vực rối loạn do ngập úng. Trận mưa ngày 27/06/2016 đã làm đổ nhiều cây xanh, đe dọa trực tiếp đến tính

mạng của những người tham gia giao thông, gây ngập úng cục bộ, làm cuốn trôi các phương tiện giao thông xuống các cống thoát nước hay hố ga. Ngày 26/09/2016, mưa kéo dài gần 2 tiếng với tổng lượng mưa trên 200 mm, đã gây ngập úng tại 59 điểm, bao gồm cả sân bay Tân Sơn Nhất. Nhiều đợt mưa lớn gây hậu quả nghiêm trọng khác có thể kể đến như đợt mưa vào rạng sáng ngày 03/10/2016, chiều 21/06/2017, chiều 14/09/2019. Đặc biệt, trận mưa lớn kỷ lục trong 40 năm qua ở TPHCM xảy ra vào chiều ngày 25/09/2018 với lượng mưa ngày đo được ở các trạm thuộc các quận/huyện đều ở mức cao:

* Tác giả liên hệ.

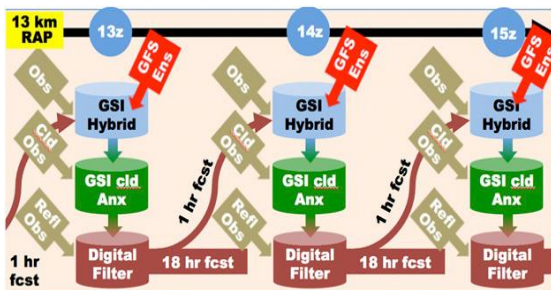
Địa chỉ email: vvthang26@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4694>

Quận 1 (301 mm), Nhà Bè (345 mm), Cần Giò (293 mm), Tân Bình (407 mm).

Hiện nay, bài toán dự báo định lượng mưa vẫn là một thách thức lớn đối với các trung tâm dự báo nghiệp vụ trên thế giới cũng như tại Việt Nam, đặc biệt là đối với bài toán dự báo, cảnh báo mưa lớn trong thời đoạn ngắn [1]. Để giải quyết bài toán dự báo mưa lớn hạn cực ngắn cho các khu vực nhỏ, các trung tâm dự báo trên thế giới đã ứng dụng đồng hóa số liệu với đa dạng các nguồn số liệu quan trắc (ví dụ như quan trắc mưa tự động tại trạm, số liệu ra-đa, số liệu vệ tinh) cho các mô hình số trị dự báo thời tiết độ phân giải cao (< 5 km) với các sản phẩm dự báo tất định và dự báo tổ hợp, xác suất [2, 3]. Đặc biệt, một trong những cách tiếp cận hiện nay là đồng hóa “cập nhật nhanh” số liệu quan trắc, cả truyền thống và phi truyền thống vào hệ thống mô hình số trị độ phân giải cao nhằm mô phỏng chính xác hơn các quá trình vật lý ở quy mô mây và các quá trình tương tác địa hình, vốn là các quá trình quan trọng trong dự báo mưa [4-6].

Về các hệ thống dự báo “cập nhật nhanh”, có thể kể đến hệ thống của cơ quan khí tượng Hàn Quốc, hiện đang cập nhật số liệu liên tục hàng giờ, trên cơ sở mô hình số trị Unified Model, kết hợp đồng hóa 3D/4D-Var các số liệu bề mặt, thám không, vệ tinh, độ phân hồi và gió xuyên tâm của ra-đa, cường độ mưa [7]. Hệ thống này đã phục vụ cho dự báo mưa hạn cực ngắn tại thể vận hội mùa đông 2018 ở Hàn Quốc. Cục khí tượng Đài Loan sử dụng mô hình WRF ở độ phân giải 2 km kết hợp đồng hóa số liệu độ phân hồi và tốc độ gió xuyên tâm từ ra-đa, được cập nhật liên tục từng giờ hỗ trợ dự báo hạn cực ngắn [8].



Hình 1. Sơ đồ mô tả hệ thống RAP/HRRR theo Benjamin và nnk., (2016) [5].

Tuy vậy tiêu biểu nhất phải kể đến hệ thống mô hình độ phân giải cao (3 km) cập nhật số liệu từng giờ của Hoa Kỳ có tên High Resolution Rapid Refresh (HRRR) [5]. Hệ thống này vận hành với điều kiện biên và điều kiện ban đầu từ hệ thống Rapid Refresh (RAP) mà tiền thân là hệ thống Rapid Update Cycle (RUC) được ứng dụng nghiệp vụ tại Trung tâm Dự báo Môi trường của Hoa Kỳ (National Centers for Environmental Prediction - NCEP) từ 1998 [4]. Một số nghiên cứu ứng dụng hệ thống RAP đã chỉ ra những đánh giá tích cực đối với hệ thống này, đặc biệt là dự báo mưa lớn hạn ngắn được cải thiện rõ rệt [5, 9].

Hệ thống RAP cải thiện đáng kể kết quả dự báo cho hạn dự báo 1-3 h đối với các biến bề mặt, trên cao và vùng đối lưu [5]. Hệ thống RAP đồng hóa độ phân hồi của ra-đa thông qua ảnh nhiệt của ra-đa. Bên cạnh đó, quy trình ban đầu hóa bằng lọc nhiễu (Digital Filter Initialization - DFI) được áp dụng trong hệ thống này, theo đề xuất của Lynch và Huang, (1992) [10]. DFI giảm nhiễu số trong trường ban đầu, khi mô hình bắt đầu mô phỏng, giúp cải thiện hiệu suất dự báo hạn ngắn của các biến khí tượng [4, 5, 11].

Ở Việt Nam, bài toán dự báo mưa định lượng đã nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu, đặc biệt trong ứng dụng mô hình dự báo thời tiết số trị và đã đạt được những thành công nhất định [12-18]. Bên cạnh đó, dự báo mưa hạn cực ngắn dựa trên số liệu ra-đa, ảnh viễn thám hoặc mô hình số trị cũng đã từng bước hỗ trợ cho công tác nghiệp vụ [13, 19, 20]. Tuy nhiên, các nghiên cứu trên mới dừng lại trong việc sử dụng đơn lẻ một công cụ dự báo (ví dụ như chỉ sử dụng số liệu ra-đa hoặc ảnh vệ tinh) mà chưa áp dụng mô hình số trị ở độ phân giải cao cũng như công nghệ đồng hóa số liệu.

Nghiên cứu này sẽ giới thiệu một hệ thống đồng hóa “cập nhật nhanh” dữ liệu ra-đa, lần đầu tiên được thiết kế cho bài toán dự báo mưa lớn hạn cực ngắn tại TPHCM. Mục 2 sẽ trình bày chi tiết về thiết kế hệ thống RAP cho TPHCM (HCM-RAP) trên cơ sở tham khảo hệ thống RAP của Hoa Kỳ- “hệ thống cập nhật nhanh tiêu biểu” hiện nay. Mục 3 sẽ cung cấp thông tin về nguồn

số liệu và kết quả thử nghiệm sẽ được trình bày trong mục 4. Một số kết luận được rút ra ở mục 5.

2. Hệ thống HCM-RAP

2.1. Hệ thống RAP của NCEP

Hệ thống RAP/HRRR là hệ thống mô hình dự báo thời tiết cập nhật sản phẩm dự báo hàng giờ được đưa vào sử dụng trong nghiệp vụ tại NCEP từ tháng 05 năm 2012. Hệ thống RAP sử dụng lõi động lực học của WRF-ARW (Advanced Research WRF) làm thành phần chính với lưới ngoài cùng ở độ phân giải 13 km bao phủ Bắc Mỹ, cung cấp điều kiện biên và điều kiện ban đầu cho miền 3 km bao phủ Hoa Kỳ. Hệ thống RAP đồng hóa số liệu thông qua hệ thống đồng hóa GSI (Gridpoint Statistical Interpolation), với phương pháp đồng hóa biến phân tổ hợp lai (hybrid ensemble-variational) [5].

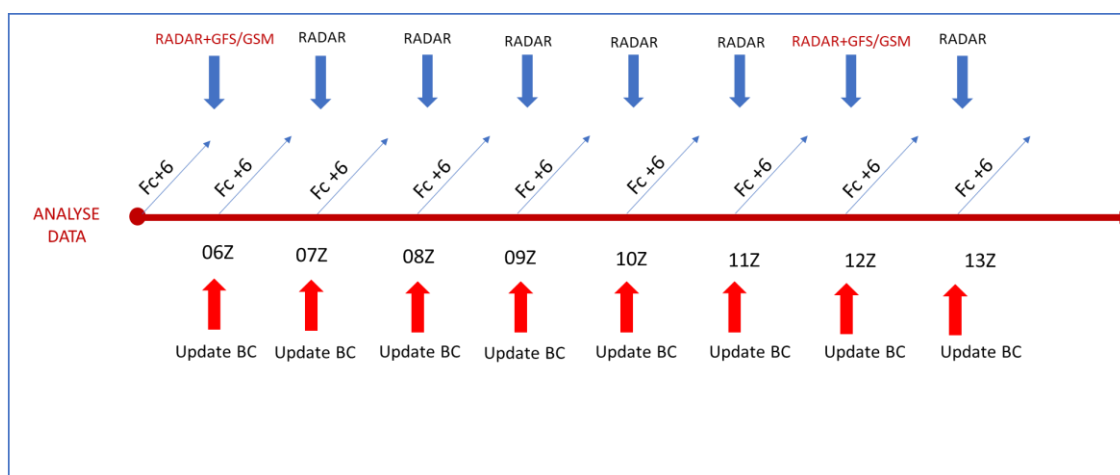
Hình 1 biểu diễn sơ đồ khối việc vận hành hệ thống RAP với trường nền của mỗi bước đồng hóa số liệu, sử dụng GSI được lấy từ dự báo 1 h trước đó. Trên hình này, những thành phần biểu thị bằng màu nâu chính là thành phần sử dụng mô hình WRF và phương pháp lọc số DFI. Các hộp màu nâu thể hiện các loại số liệu được đồng hóa, bao gồm độ phân hồi, lượng mây và các hạt băng ngưng tạo mưa (các loại số liệu khác, xem thêm trong Bảng 4 của [5]). Ba bước đồng hóa cũng

được chỉ ra bao gồm: i) Đồng hóa biến phân tổ hợp lai bằng GSI - màu xanh da trời; ii) Đồng hóa sử dụng 80 thành phần tổ hợp của GFS - màu đỏ; và iii) Đồng hóa mây và băng ngưng - màu xanh lá cây. Các phương pháp đồng hóa được phát triển ban đầu cho hệ thống RUC [4] và dần được cải thiện.

Ba điểm khác biệt giữa RAP với hệ thống cũ là RUC bao gồm: i) Miền tính dự báo lớn hơn; ii) Sử dụng phiên bản cập nhật hơn của WRF-ARW; và iii) Sử dụng hệ thống phân tích nội suy thống kê điểm lưới GSI, thay vì đồng hóa dữ liệu biến phân ba chiều 3D-Var. Cùng với sự phát triển của RAP, các điều chỉnh đã được thực hiện cho WRF-ARW (đặc biệt là sơ đồ mô hình vật lý) và các hệ thống đồng hóa GSI, dựa trên mô hình trước đó trong RUC và đổi mới thiết kế. Nhìn chung, RAP tạo sự dự báo vượt trội hơn so với RUC, và kỹ năng của nó đã tiếp tục tăng từ năm 2012 lên đến RAP phiên bản 3 kể từ năm 2015 [5].

2.2. Thiết kế hệ thống HCM-RAP

Hình 2 mô tả quy trình vận hành hệ thống đồng hóa và cập nhật nhanh dữ liệu ra-đa dự báo mưa lớn hạn cực ngắn (0-6 h) cho TPHCM (sau đây gọi là HCM-RAP). Trong hệ thống này, mô hình WRF với mô-đun đồng hóa số liệu WRF-DA được sử dụng để đồng hóa số liệu ra-đa.



Hình 2. Sơ đồ mô tả quy trình vận hành hệ thống HCM-RAP cập nhật số liệu ra-đa từng giờ.

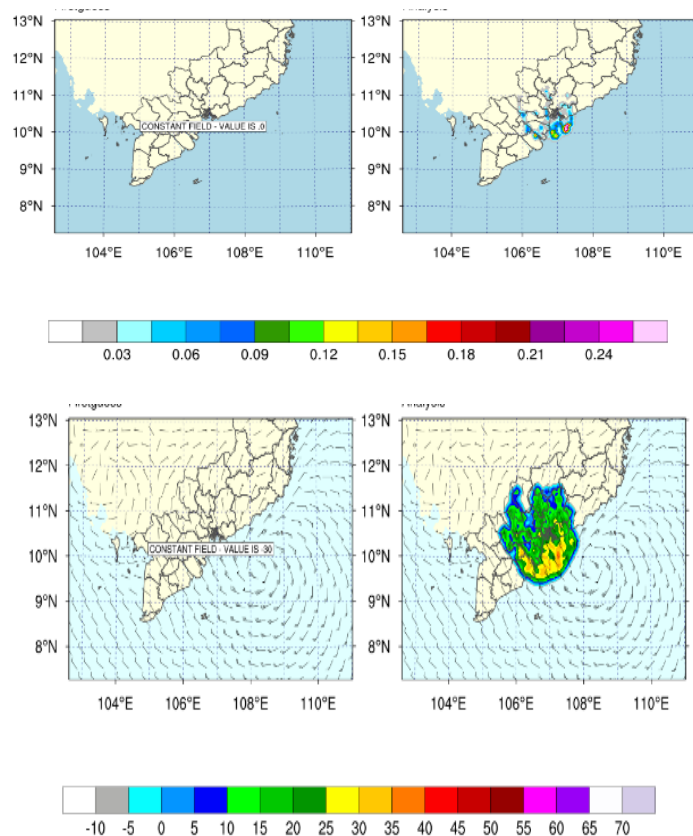
4. Kết quả và thảo luận

Trong bài báo này, chúng tôi thiết lập dự báo mưa lớn hạn cực ngắn (0-6 h) cho TP. HCM thử nghiệm đối với đợt mưa lớn xảy ra trong ngày 25-26 tháng 11 năm 2018 do ảnh hưởng trực tiếp của bão số 9 (tên quốc tế là Usagi) bằng hệ thống HCM-RAP với 4 phương án được thiết lập như sau: i) Dự báo không đồng hóa từ thời điểm 18Z ngày 25/11/2018 đến 00Z ngày 26/11/2018 và chạy từ 06 h trước đó phục vụ cho việc cân bằng và thích ứng động lực của mô hình (CTL); ii) Tương tự phương án 1 nhưng đồng hóa độ phản hồi và gió xuyên tâm tại thời điểm ban đầu 18Z ngày 25/11/2018 (RAP+0); iii) Tương tự phương án 2 nhưng tiếp tục cập nhật 1 h số liệu ra-đa và dự báo đến 00Z ngày 26/11/2018 (RAP+1); iv) Tương tự phương án 3 nhưng tiếp tục cập nhật số liệu ra-đa cho giờ thứ 2 (RAP+2); và v) Tương

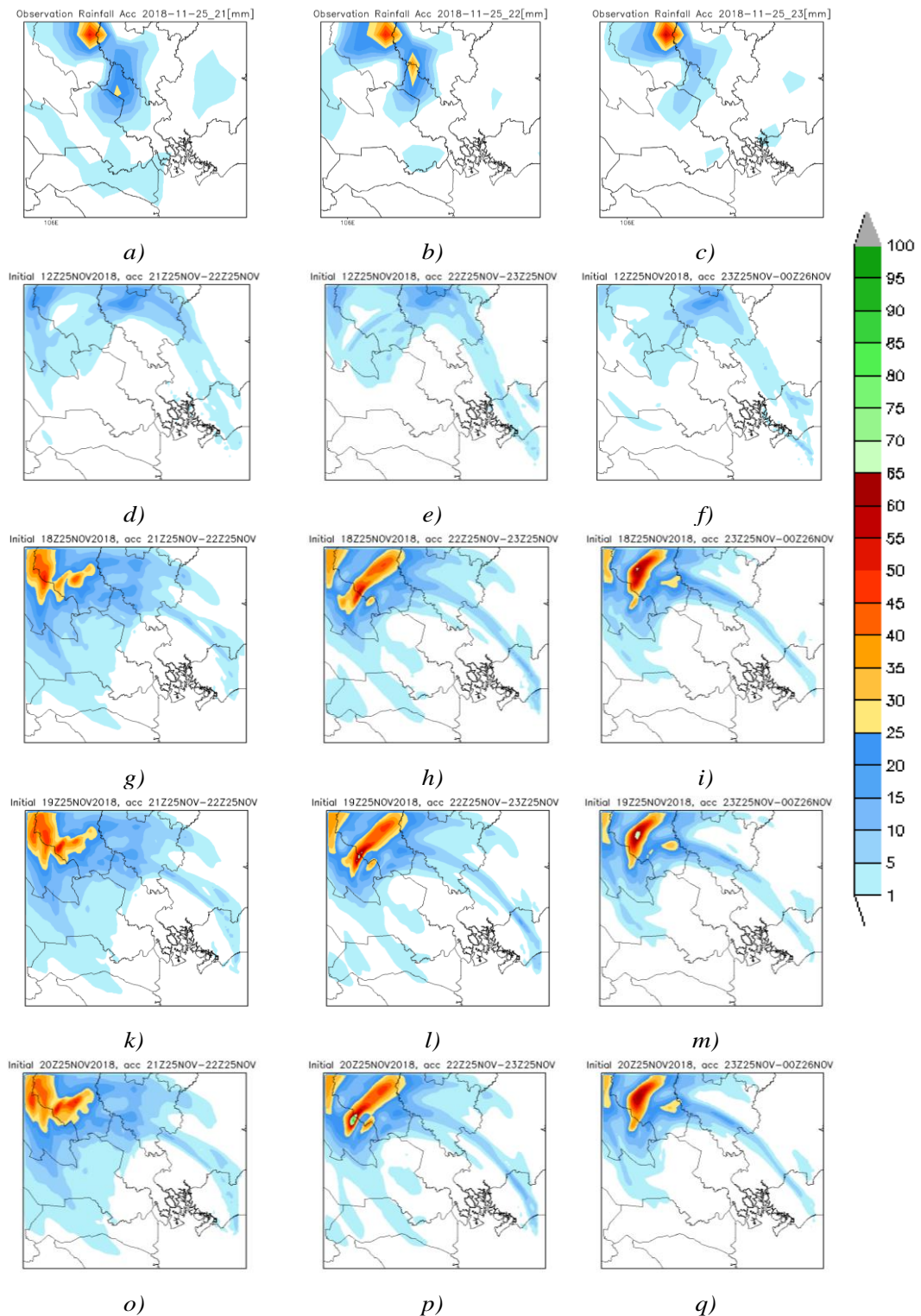
tự nhưng tiếp tục cập nhật số liệu ra-đa tại giờ tiếp theo và dự báo đến 00Z ngày 26/11/2018 (RAP+3).

Hình 5 thể hiện sự so sánh độ phản hồi cực đại (trên) và tỉ lệ xáo trộn hơi nước (dưới) trong hai trường hợp không (trái) và có đồng hóa ra-đa (phải) tại thời điểm 18Z ngày 25/11/2018 thấy rằng vai trò của số liệu ra-đa được đồng hóa vào mô hình trong việc cải thiện đánh kể trường ban đầu so với không đồng hóa.

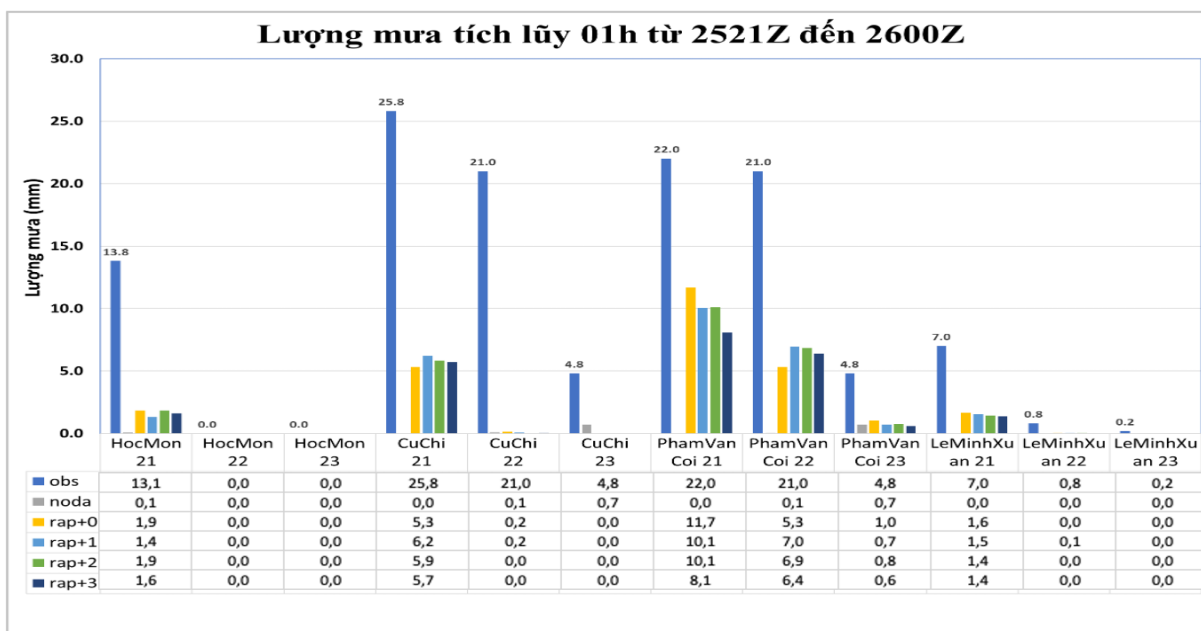
So sánh các bản tin dự báo mưa ở hạn dự báo từ 0 đến 3 h thông qua cập nhật nhanh từng giờ (Hình 6k-x) thấy rằng, các bản tin dự báo ở các hạn dự báo khác nhau sử dụng hệ thống HCM-RAP cập nhật từng giờ đã cho thấy khả năng mô phỏng diện mưa và lượng mưa khá tốt và không có sự khác biệt đáng kể trong dự báo lượng mưa giữa các hạn dự báo.



Hình 5. So sánh độ phản hồi cực đại (trên) và tỉ lệ xáo trộn hơi nước (dưới) trong hai trường hợp không (trái) và có đồng hóa ra-đa (phải) tại thời điểm 2018112518Z.



Hình 6. Kết quả mô phỏng mưa từng giờ 2521Z-2600Z/11/2018 của phương án CTL (d,e,f) và rap + 0(g,h,i), rap + 1(k,l,m), rap + 2(o,p,q), rap + 3 (s,t,x) và quan trắc (a,b,c).



Hình 7. Lượng mưa tích lũy từng giờ từ 2521Z-2600Z/11/2018.

Hình 7 so sánh lượng mưa tích lũy từng giờ từ 21Z ngày 25/11 đến 00Z ngày 26/11/2018 giữa quan trắc với các trường hợp dự báo tại một số điểm trạm xảy ra mưa lớn trong thời điểm trên. Kết quả cho thấy, ở các trạm phía bắc TPHCM trường hợp có đồng hóa cho dự báo tốt hơn so với trường hợp không đồng hóa, tuy lượng mưa dự báo từ hệ thống HCM-RAP còn thấp hơn so với thực tế. Tác động của việc cập nhật nhanh và đồng hóa số liệu thấy rõ trong dự báo lượng mưa giờ tích lũy lúc 21Z ngày 25/11/2018, tại một số trạm phía bắc. Tuy vậy, không có xu thế rõ ràng hay đồng nhất về sự cải thiện này tại các trạm và tại 2 giờ dự báo sau.

5. Kết luận

Hệ thống đồng hóa cập nhật nhanh từng giờ số liệu ra-đa nhằm cảnh báo mưa lớn hạn cực ngắn cho TPHCM (HCM-RAP) đã được thiết lập và thử nghiệm. Hệ thống sử dụng mô hình WRF-DA, cập nhật số liệu ra-đa Nhà Bè từng giờ. Kết quả thử nghiệm đối với đợt mưa lớn ngày 25 và 26/11/2018 cho thấy việc cập nhật từng giờ số liệu phản hồi và gió xuyên tâm của ra-đa đã cải

thiện được khả năng dự báo mưa từng giờ hạn ngắn cho TPHCM. Hệ thống HCM-RAP độ phân giải cao cho kết quả dự báo diễn biến mưa giờ cũng như lượng mưa từng giờ gần với thực tế hơn so với trường hợp không đồng hóa số liệu ra-đa. Tuy nhiên, lượng mưa dự báo vẫn thấp hơn so với thực tế.

Để hoàn thiện và đưa hệ thống HCM-RAP vào dự báo nghiệp vụ cần có nhiều thử nghiệm hơn trong việc cập nhật các số liệu quan trắc khác bên cạnh ra-đa, thử nghiệm với các hình thể và đợt mưa khác. Bên cạnh đó, cũng cần nghiên cứu thêm trong việc lựa chọn cấu hình, độ phân giải, số liệu đầu vào, bước cập nhật, trường nền sai số nhằm cải thiện tốt hơn sản phẩm cảnh báo mưa lớn hạn cực ngắn. Một điểm cần lưu ý khác là thời gian trễ trong việc truy cập số liệu GFS cho các ớp 00, 06, 12 và 18Z. Điều này có thể được khắc phục bằng việc xem xét chạy dự báo, tại các ớp này, sử dụng số liệu điều kiện biên từ dự báo của 06 giờ trước đó. Đối với bài toán nghiệp vụ cũng cần nghiên cứu phương thức tổ hợp thông tin từ dự báo số, trạm quan trắc tự động, ước lượng mưa từ ra-đa, vệ tinh nhằm đưa ra sản phẩm cảnh báo mưa hạn ngắn tốt nhất cho TPHCM.

Lời cảm ơn

Bài báo là một phần kết quả của Đề tài cấp quốc gia, mã số KC08.14/16-20.

Tài liệu tham khảo

- [1] JMA, Outline of the Operational Numerical Weather Prediction at the Japan Meteorological Agency, Japan Meteorological Agency Rep, 2013, pp. 201.
- [2] N. Gustafsson et al., Survey of Data Assimilation Methods for Convective-Scale Numerical Weather Prediction at Operational Centres, Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 144, 2018, pp. 1218-1256, <https://doi.org/10.1002/qj.3179>.
- [3] J. A. Milbrandt, S. Bélair, M. Faucher, M. Vallee, M. L. Carrera, A. Glazar, The Pan-Canadian High Resolution, 2.5 Km, Deterministic Prediction System, Wea. Forecasting, Vol. 3, 2016, pp. 1791-1816, <https://doi.org/10.1175/waf-d-16-0035.1>.
- [4] S. G. Benjamin et al., An Hourly Assimilation Forecast Cycle: The Ruc, Mon. Wea. Rev., Vol. 132, 2014, pp. 495-518.
- [5] S. G. Benjamin et al., A North American Hourly Assimilation and Model Forecast Cycle: The Rapid Refresh, Mon. Wea. Rev., Vol. 144, 2016, pp. 1669-1694, <https://doi.org/10.1175/mwr-d-15-0242.1>.
- [6] P. Brousseau, Y. Seity, D. Ricard, J. Léger, Improvement of the Forecast of Convective Activity from the Arome France System, Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 142, 2016, pp. 2231-2243, <https://doi.org/10.1002/qj.2822>.
- [7] D. J. Kim, Recent Progresses in Convective-Scale and Next Generation Global Modeling at KMA, Wgnc-31 Pretoria, South Africa, 26-29 April 2016.
- [8] The CWB NWP Overview, https://www.cwb.gov.tw/V7/climate/climate_info/information/seminars/0507-1/03.pdf/ (accessed on: March 20th, 2020).
- [9] J. O. Pinto, J. A. Grim, M. Steiner, Assessment of the High-Resolution Rapid Refresh Model's Ability to Predict Mesoscale Convective Systems Using Object-Based Evaluation, Wea. Forecasting Vol. 30, No. 4, 2015, pp. 892-913, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00118.1>.
- [10] P. Lynch, X. Y. Huang, Initialization of the HIRLAM Model Using a Digital Filter, Mon. Wea. Rev., Vol. 120, 1992, pp. 1019-1034, <https://doi.org/10.1175/1520-493>.
- [11] S. E. Peckham, T. G. Smirnova, S. G. Benjamin, J. M. Brown, J. S. Kenyon, Implementation of a Digital Filter Initialization in the WRF Model and Its Application in the Rapid Refresh, Mon. Wea. Rev., Vol. 144, No. 1, 2016, pp. 99-106, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0219.1>.
- [12] B. M. Tang et al., Developing an Operational Heavy Rainfall Forecast System with 3-Day Leadtime in Reducing and Preventing Flooding-Related Disaster Over Central, Vietnam, the National Project KHDL-2014 Synthesis Report Funded by the Vietnamese Ministry of Science and Technology, 2014 (in Vietnamese).
- [13] C. Thanh, T. D. Thuc, Radar Data Assimilation in WRF Model to Forecast Heavy Rainfall at Ho Chi Minh City, Journal of Science: Earth and Environmental Sciences, Vol. 34, No. 1S, 2018, pp. 59-70 (in Vietnamese).
- [14] D. D. Tien et al., Assimilation of Dong Ha Radar Data for Improving Heavy Rainfall Forecast over the Central of Vietnam, Vietnam Journal of Hydrometeorology, No. 617, 2014, pp. 22-30 (in Vietnamese).
- [15] H. D. Cuong et al., Developing an Operational Heavy Rainfall Forecast System for the Northern Part of Vietnam, The KC.08.06/16-20 Project Synthesis Report Funded by the Vietnamese Ministry of Science and Technology, 2019 (in Vietnamese).
- [16] K. T. Xin et al., Study on the Prediction of the Large-Scale Heavy Rainfall for Flooding Prevention in Vietnam Using High Technology, the National Project KHDL-02/2002 Synthesis Report Funded by the Vietnamese Ministry of Science And Technology, 2005 (in Vietnamese).
- [17] T. T. Tien, N. M. Truong, C. Thanh, K. Q. Chanh, RAMS's Application to Simulate Heavy Rainfall in the Central Vietnam in September 2002, VNU Journal of Science, No. 3S, 2004, pp. 51-60 (in Vietnamese).
- [18] V. T. Hang, K. T. Xin, Forecasting Heavy Rainfall in the Central Vietnam Using Heise Convective Parameterization Scheme for HRM Model, Vietnam Journal of Hydrometeorology, No. 560, 2007, pp. 49-54 (in Vietnamese).
- [19] H. M. Hien, N. V. Thu, The Application of GMS-5 Products for Rainfall Validation. Vietnam Journal of Hydrometeorology, No. 479, 2000, pp. 30-35 (in Vietnamese).
- [20] N. T. T. Thanh et al., The Study on the Very Short-Range Precipitation Forecasting and Thunderstorms Warning, The Ministerial-Level Report, Funded

- by Ministry of Natural Resources and Environment, 2010 (in Vietnamese).
- [21] W. C. Skamarock et al., A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech, Note NCAR/TN-4751STR, 2008, pp. 113.
- [22] T. Schwitalla, W. Volker, Radar Data Assimilation Experiments Using the IPM WRF Rapid Update Cycle, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 23, No. 1, 2014, pp. 79-102, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2014/0513>.
- [23] D. F. Parrish, J. C. Derber, The National Meteorological Center's Spectral Statistical-Interpolation Analysis System, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 120, 1992, pp. 1747-1763.
- [24] National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, 2015. NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO, <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>.