TẠP CHÍ
KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN

Check for updates

Bài báo khoa học

Nghiên cứu thử nghiệm đồng hóa số liệu trong dự báo sự thay đổi đột ngột của cường độ và quỹ đạo bão trên Biển Đông bằng mô hình HWRF

Nguyễn Đức Nam[1], Vũ Văn Thăng[1]*, Trần Duy Thức[1]

[1] Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu; ducnam.mi@gmail.com; vvthang26@gmail.com; tranduythuc1@gmail.com

*Tác giả liên hệ: vvthang26@gmail.com; Tel.: +84–986464599

Ban Biên tập nhận bài: 21/05/2024; Ngày phản biện xong: 28/06/2024; Ngày đăng bài: 25/12/2024

Tóm tắt: Trong bài báo này, tác giả trình bày kết quả thử nghiệm dự báo sự thay đổi đột ngột của cường độ và quỹ đạo bão trên khu vực Biển Đông bằng mô hình HWRF kết hợp đồng hoá số liệu. Mô hình HWRF được thiết kế thử nghiệm với số liệu điều kiện biên và điều kiện ban đầu là số liệu GFS độ phân giải 0,25×0,25 độ kinh vĩ, và số liệu đồng hóa được lấy từ hệ thống viễn thông khí tượng toàn cầu GTS (*Global Telecommunications Systems*). Kết quả thử nghiệm đồng hóa số liệu dự báo sự thay đổi cường độ đột ngột của cơn bão Noru (2022) và sự thay đổi quỹ đạo đột ngột của cơn bão Goni (2020) bằng mô hình HWRF đã cho thấy một số cải thiện về kết quả dự báo. Đối với trường hợp cơn bão Noru, trường hợp có đồng hoá số liệu cho kết quả dự báo đúng về sự thay đổi đột ngột cường độ bão ở hạn dự báo 42 giờ và không dự báo khống sự thay đổi cường độ đột ngột của bão ở các hạn dự báo sau như trường hợp không có đồng hoá số liệu. Với trường hợp cơn bão Goni, kết quả đánh giá quỹ đạo cho thấy sai số dự báo của trường hợp đồng hoá số liệu tốt hơn so với trường hợp không đồng hoá số liệu.

Từ khóa: Mô hình HWRF; Sự thay đổi đột ngột của cường độ bão; Đồng hoá số liệu.

1. Mở đầu

Đồng hoá số liệu là quá trình kết hợp nhiều nguồn số liệu, bao gồm số liệu quan trắc và số liệu từ mô hình số, giúp ước lượng tốt nhất trạng thái khí quyển để làm điều kiện ban đầu cho mô hình dự báo số trị. Kết hợp giữa số liệu quan trắc và số liệu từ mô hình lần đầu tiên được thực hiện thủ công [1, 2], sau đó được thực hiện với các thuật toán nội suy khách quan hơn [3, 4]. Sau nhiều thập kỉ phát triển, đồng hóa số liệu đã dần trở thành một bước cực kì quan trọng của dự báo thời tiết bằng mô hình số. Không chỉ được thực hiện bởi các mô hình toàn cầu, đồng hóa số liệu còn được thực hiện bởi các mô hình khu vực, nhằm tăng cường khả năng dự báo các hiện tượng thời tiết ở quy mô vừa và quy mô địa phương. Đặc biệt trong dự báo bão và áp thấp nhiệt đới, đồng hóa số liệu giúp cải thiện đáng kể khả năng dự báo quỹ đạo và cường độ bão.

Đối với bài toán dự báo cường độ và quỹ đạo bão, hệ thống mô hình HWRF là mô hình số được thiết kế chuyên biệt cho dự báo bão với sự hợp tác của các Trung tâm nghiên cứu lớn ở Hoa Kỳ, và được sử dụng để dự báo nghiệp vụ bão từ năm 2007 tại Mỹ. Mô hình HWRF với lõi WRF-NMM, cùng 3 miền tính, trong đó 2 miền có độ phân giải cao và di chuyển theo tâm bão giúp mô tả tốt cấu trúc bão và cho kết quả dự báo cường độ, quỹ đạo bão tốt hơn. Trong hệ thống mô hình HWRF, mô đun đồng hoá số liệu GSI được tích hợp, kết hợp với mô đun dịch chuyển xoáy. Những mô đun này đã được sử dụng trong hệ thống

mô hình HWRF ở nhiều nghiên cứu về đồng hoá các loại số liệu trong dự báo bão, giúp trường bão trong mô hình có vị trí và cấu trúc bão phù hợp với số liệu quan trắc hơn.

Số liệu được sử dụng để đồng hoá trong mô hình HWRF rất đa dạng, nhưng ảnh hưởng rõ nhất đến kết quả dự báo bão chủ yếu đến từ số liệu thám sát trên không và số liệu vệ tinh tập trung ở khu vực tâm bão. Nghiên cứu [5] ứng dụng đồng hoá dữ liệu radar Doppler cho thấy cải thiện đáng kể trong mô phỏng cấu trúc xoáy tổng thể, tuy nhiên sai số về cường độ thì chưa được cải thiện nhiều. Nghiên cứu [6] đã sử dụng đồng hóa số liệu radar cho mô hình HWRF, kết quả trong trường hợp sử dụng đồng hoá lai tổ hợp EnKF cho cải thiện dự báo quỹ đạo bão tốt hơn so với sử dụng đồng hoá lai tổ hợp GFS (*Hybrid-GENS*) và đồng hoá GSI 3DVar (*GSI3DVar*). Vai trò của việc đồng hóa các quan trắc thám sát trong lõi bão của mô hình HWRF cho cải thiện dự báo quỹ đạo và giảm sai số cường độ bão sau 18-24 giờ. Đối với các cơn bão yếu, kết quả nghiên cứu cho thấy có sự tác động tích cực đến dự báo cường độ, nguyên nhân do sự đồng hóa bên trong lõi tạo ra cấu trúc xoáy thuận nhiệt đới chính xác hơn, giúp giảm sai số về cường độ [7].

Nghiên cứu về việc đồng hóa dữ liệu bức xạ vệ tinh trong dự báo bão tương đối phổ biến và đã chứng minh được hiệu quả. Nghiên cứu [8] đã chỉ ra vai trò của đồng hóa bức xạ ATMS (*Advanced Technology Microwave Sounder*) trong hệ thống HWRF cho cải thiện đáng kể dự báo quỹ đạo và cường độ của các cơn bão ở Đại Tây Dương. Áp dụng mô hình HWRF với các cấu hình khác nhau dự báo bão trên Tây Bắc Thái Bình Dương, cho kết quả dự báo chính xác hơn [9]. Nghiên cứu [10] sử dụng đồng hóa trực tiếp dữ liệu bức xạ từ vệ tinh GOES-13 và GOES-15 trong HWRF không chỉ cải thiện chất lượng dự báo quỹ đạo và cường độ của cơn bão Debby mà còn làm nổi bật hiệu ứng tích cực của việc khởi tạo xoáy không đối xứng.

Các nghiên cứu gần đây việc ứng dụng công nghệ đồng hoá các loại dữ liệu quan trắc gió lidar Doppler, vectơ chuyển động khí quyển (AMV) từ vệ tinh GOES-16, GOES-17 và cấu hình 3DEnVar cho mô hình HWRF cho thấy cải thiện đáng kể trong bài toán dự báo bão [11–15]. Nghiên cứu [11] đã chỉ ra việc đồng hóa quan trắc gió lidar Doppler (DWL) từ thiết bị OAWL (*Optical Autocovariance Wind Lidar*) cho thấy cải thiện sai số dự báo gió nhiệt đới giảm dần theo thời gian dự báo. Nghiên cứu [12] cũng chỉ ra rằng việc đồng hóa AMV nâng cao cải thiện dự báo cường độ và quỹ đạo của bão Gonzalo (2014) và Joaquin (2015) trên Đại Tây Dương. Nghiên cứu [13] đã chứng minh đồng hóa AMV độ phân giải cao từ vệ tinh GOES-16 cho kết quả sai số dự báo quỹ đạo cải thiện đáng kể đối với cơn bão Irma (2017). Nghiên cứu [14] nhận thấy biến thể tổ hợp ba chiều hàng giờ (*3DEnVar*) vượt trội hơn cấu hình 3DEnVar trong khoảng thời gian 6 giờ khi không di chuyển xoáy (VR), và đồng hóa AMV cải thiện dự báo cường độ, mặc dù VR có thể gây sai số cho dự báo áp suất mực nước biển tối thiểu. Nghiên cứu [15] cũng khẳng định AMV từ GOES-16 và GOES-17 cải thiện dự báo bão nhiệt đới, giảm sai số về quỹ đạo, cường độ, áp suất cực tiểu và quy mô bão.

Ở Việt Nam, nghiên cứu về đồng hoá số liệu để cải thiện trường ban đầu của mô hình số trị trong bài toán dự báo thời tiết nói chung và dự báo bão nói chung đã thu hút được nhiều nhà khoa học [16–20]. Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy văn Quốc gia đã ứng dụng sơ đồ đồng hóa 3DVAR cho mô hình HRM từ năm 2007, dựa trên số liệu quan trắc và vệ tinh MTSAT [16]. Nghiên cứu công nghệ đồng hóa 3DVAR trong mô hình WRF với số liệu vệ tinh quỹ đạo cực, trường gió từ radar Doppler cho thấy dự báo tốt cả lượng mưa và diện mưa ở thời gian 24h đầu [17, 18]. Sử dụng đồng hóa số liệu radar Đông Hà để nâng cao chất lượng dự báo mưa lớn cho khu vực miền Trung, sử dụng số liệu gió vệ tinh và phương pháp lọc Kalman tổ hợp để cải thiện trường ban đầu của mô hình WRF [19, 20]. Nghiên cứu [21] đã sử dụng mô hình WRF kết hợp phương pháp đồng hóa 3DVAR và lọc Kalman tổ hợp địa phương LETKF cho kết quả cải thiện trường phân tích và dự báo bão ở Tây Bắc Thái Bình Dương và Biển Đông. Vai trò của đồng hóa trường ban đầu với số liệu Radar đã cho dự báo mưa lớn ở Thành phố Hồ Chí Minh và Tây Nguyên cho thấy đồng hóa với trường hợp chạy

"warm start" tốt hơn "cold start" [22, 23]. Nghiên cứu [24] sử dụng phương pháp đồng hóa 3DVAR để cải thiện điều kiện ban đầu của mô hình, nâng cao chất lượng dự báo nhiệt độ, độ ẩm, và lượng mưa.

Đối với nghiên cứu để cải thiện trường ban đầu của mô hình HWRF ở Việt Nam [25] đã ứng dụng ban đầu hóa xoáy trong mô hình HWRF trong dự báo bão trên Biển Đông, mô phỏng 53 trường hợp chạy dự báo 7 cơn bão trên Biển Đông trong mùa bão năm 2009. Kết quả đánh giá dự báo cho thấy, sử dụng sơ đồ ban đầu hóa xoáy đã cho những cải thiện rõ rệt trong dự báo quỹ đạo bão hạn 72 giờ, và dự báo cường độ bão hạn 54 giờ. Ứng dụng phương pháp ban đầu hóa xoáy trong mô hình HWRF nghiên cứu vai trò của ban đầu hóa xoáy đối với mô phỏng cấu trúc cơn bão Ketsana (2009) cho thấy cải thiện đáng kể cấu trúc bão mô phỏng tại thời điểm ban đầu cũng như trong quá trình tích phân. Xoáy được tạo ra bằng sơ đồ ban đầu hóa xoáy của mô hình HWRF là phù hợp với mô hình, thể hiện qua sự ổn định động lực của xoáy bão trong các giờ đầu tích phân [26].

Các nghiên cứu cải thiện trường ban đầu này đều dựa vào sơ đồ ban đầu hoá xoáy bão của HWRF, chưa bổ sung các thông tin quan trắc vào trường ban đầu của mô hình. Vì vậy, trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ sử dụng kết hợp ban đầu hoá xoáy và phương pháp đồng hoá số liệu trong mô hình HWRF để bổ sung thêm các thông tin quan trắc nhằm cải thiện trường ban đầu của mô hình. Từ đó, sẽ đánh giá ảnh hưởng của việc đồng hoá số liệu nhằm dự báo sự thay đổi đột ngột của cường độ và quỹ đạo bão trên Biển Đông.

2. Số liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Xác định thay đổi đột ngột của cường độ và quỹ đạo bão

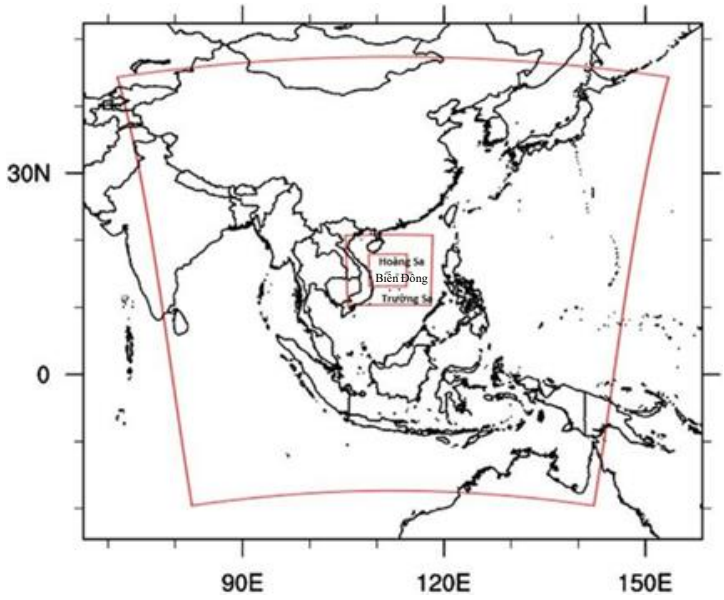
Để lựa chọn được các cơn bão có sự thay đổi đột ngột về quỹ đạo và cường độ cần phải xác định được các ngưỡng giá trị thay đổi về quỹ đạo và cường độ của cơn bão. Đối với cường độ, sự thay đổi của tốc độ gió cực đại V trong 24 giờ được sử dụng để làm thước đo có hay không sự thay đổi cường độ đột ngột của bão. Theo [27], nhóm tác giả đã sử dụng ngưỡng 25 kts (12,86 m/s) thay đổi ΔV trong 24 giờ để xác định sự thay đổi cường độ đột ngột của bão. Với sự thay đổi đột ngột của quỹ đạo bão, nghiên cứu sử dụng ngưỡng góc lệch để xác định, đã được tính toán ở nghiên cứu [28], kết quả thu được ngưỡng góc lệch 23,38 độ (khoảng thời gian 06 giờ) và 27,47 độ (khoảng thời gian 12 giờ).

2.2. Thiết kế cấu hình miền tính

Mô hình HWRF được thiết kế với 3 miền tính: Miền tính mẹ có độ phân giải 18km, là miền tính cố định, có số điểm lưới là 288×576. Miền 2 và miền 3 di chuyển theo tâm bão, độ phân giải là 6km và 2km, số điểm lưới lần lượt là 157×280, 208×382. Số mực theo chiều thẳng đứng là 75 mực, mực trên là 10mb.Các tùy chọn tham số vật lý sử dụng để chạy mô hình HWRF là bộ tham số đã được đánh giá và đang được dùng để chạy dự báo nghiệm vụ HWRF tại NCEP. Cụ thể các tham số thể hiện ở bảng 1.

Bảng 1. Các tùy chọn vật lý được sử dụng trong mô hình HWRF.

Tùy chọn vật lý	Số tham chiếu	Tên tùy chọn
mp_physics	5	Ferrier-Aligo
ra_lw_physics	4	RRTMG
ra_lw_physics	4	RRTMG
sf_sfcla_physics	88	HWRF surface layer scheme
sf_surface_physics	2	Noah Land Surface
bl_pbl_physics	3	GFS Hybrid-EDMF pbl scheme
cu_physics	4	SASAS scheme



Hình 1. Miền tính của mô hình HWRF.

2.3. Phương pháp đồng hoá số liệu

Mô hình HWRF và thuật toán đồng hoá biến phân ba chiều (3D-Var). Đồng hoá biến phân ba chiều (3D-Var) sẽ đi tìm trạng thái khí quyển x phù hợp nhất với quan trắc y hay chính là việc tìm trạng thái khí quyển x có xác suất cực đại khi biết quan trắc. Theo công thức Bayes, xác suất có điều kiện của x khi biết trước y được tính như sau:

$$\mathrm{P}(\mathrm{y}) = \frac{\mathrm{P}(\mathrm{x})\mathrm{P}(\mathrm{y}|\mathrm{x})}{\mathrm{P}(\mathrm{y})} \tag{1}$$

Vì P(y) không phụ thuộc vào x nên:

$$\mathrm{P}(\mathrm{y}) \sim \mathrm{P}(\mathrm{x})\mathrm{P}(\mathrm{x}) \tag{2}$$

trong đó, x được giả định có phân bố Gauss,

$$\mathrm{P}(\mathrm{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}\mathrm{B}^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathrm{x}-\mathrm{x_b})^{\mathrm{T}}\mathrm{B}^{-1}(\mathrm{x}-\mathrm{x_b})]\right\} \tag{3}$$

với B là ma trận tương quan sai số nền (gọi tắt là ma trận sai số nền), $\mathrm{x_b}$ là giá trị trường nền. Tương tự ta có

$$\mathrm{P}(\mathrm{y}|\mathrm{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2}\mathrm{R}^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathrm{H}(\mathrm{x})-\mathrm{y})^{\mathrm{T}}\mathrm{R}^{-1}(\mathrm{H}(\mathrm{x})-\mathrm{y})]\right\} \tag{4}$$

với R là ma trận tương quan sai số quan trắc (gọi tắt là ma trận sai số quan trắc), y là giá trị trường thám sát. Thay thế P(x) và P(y|x) trở lại vào (2.1.2) ta được:

$$\mathrm{P}(\mathrm{y}) \sim \frac{1}{(2\pi)^{n/2}\mathrm{B}^{1/2}} \frac{1}{(2\pi)^{p/2}\mathrm{R}^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[(\mathrm{x}-\mathrm{x_b})^{\mathrm{T}}\mathrm{B}^{-1}(\mathrm{x}-\mathrm{x_b})] - \frac{1}{2}[(\mathrm{H}(\mathrm{x})-\mathrm{y})^{\mathrm{T}}\mathrm{R}^{-1}(\mathrm{H}(\mathrm{x})-\mathrm{y})]\right\} \tag{5}$$

Hay $\mathrm{P}(\mathrm{x}|\mathrm{y}) \propto \frac{1}{(2\pi)^{n/2}\mathrm{B}^{1/2}} \frac{1}{(2\pi)^{p/2}\mathrm{R}^{1/2}} \exp\{-\mathrm{J}(\mathrm{x})\}$ với

$$\mathrm{J}(\mathrm{x}) = \frac{1}{2}[(\mathrm{x}-\mathrm{x_b})^{\mathrm{T}}\mathrm{B}^{-1}(\mathrm{x}-\mathrm{x_b}) + \frac{1}{2}[(\mathrm{H}(\mathrm{x})-\mathrm{y})^{\mathrm{T}}\mathrm{R}^{-1}(\mathrm{H}(\mathrm{x})-\mathrm{y})] \tag{6}$$

và gradient đối với x là:

$$\nabla\mathrm{J}(\mathrm{x}) = 2\mathrm{B}^{-1}(\mathrm{x}-\mathrm{x_b}) - 2\mathrm{H}(\mathrm{x})^{\mathrm{T}}\mathrm{R}^{-1}(\mathrm{y}-\mathrm{H}(\mathrm{x})) \tag{7}$$

Xác suất P(x|y) cực đại khi J(x) cực tiểu. Trường phân tích mà ở đó hàm J đạt giá trị cực tiểu sẽ được xem là trường phân tích tối ưu nhất. Về mặt tính toán thực tế, việc cực tiểu hóa hàm J gặp hết sức khó khăn do B có kích thước rất lớn nên người ta thường cực tiểu hóa hàm J bằng phương pháp lặp.

2.4. Phương pháp đánh giá sai số

Trong nghiên cứu này thực hiện đánh giá sai số quỹ đạo bão bằng sai số vị trí (PE). PE đặc trưng cho mức độ sai lệch về mặt không gian giữa vị trí tâm bão dự báo và vị trí tâm bão quan trắc, là khoảng cách giữa tâm bão thực tế và tâm bão dự báo:

$$d_{AB} = R_e \cos^{-1}\left[\sin\varphi_1 \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\left(\lambda_2 - \lambda_1\right)\right] \quad (8)$$

Trong đó R_e là bán kính trái đất R_e = 6378,16 km.

Sai số cường độ được đánh giá thông qua giá trị chênh lệch giữa vận tốc gió cực đại (V_{max}) quan trắc so với kết quả từ mô hình:

$$V_{maxerr} = | V_{maxmodel} - V_{maxobs} | \quad (9)$$

2.5. Số liệu

Số liệu GFS với độ phân giải ngang 0,25×0,25 độ kinh vĩ, độ phân giải thời gian 06h được sử dụng làm trường ban đầu và điều kiện biên cho mô hình HWRF [29].

Số liệu quan trắc bão được lấy từ Trung tâm cảnh báo bão Hoa Kỳ (*Joint Typhoon Warning Center*).

Số liệu sử dụng để đồng hoá bao gồm: SOUND, SONDE_SFC, SYNOP, GEOAMV, METAR, AIREP, SHIPS, BUOY, PILOT từ Hệ thống viễn thông Khí tượng toàn cầu (*GTS - Global Telecommunications Systems*). Các số liệu này phần nào đã được đồng hoá thông qua mô hình toàn cầu vào số liệu GFS. Tuy nhiên, việc đồng hoá các số liệu này vào mô hình HWRF với độ phân giải cao hơn sẽ mang lại hiệu quả đối với các điểm số liệu bị lọt lưới hoặc bị loại bỏ bởi quá trình đồng hoá của mô hình toàn cầu.

Bảng 2. Các dữ liệu sử dụng để đồng hoá.

Nguồn dữ liệu	Mô tả
SYNOP	Dữ liệu quan trắc từ các trạm bề mặt
SOUND	Dữ liệu quan trắc từ trạm cao không
GEOAMV	Dữ liệu gió vệ tinh
METAR/AIREP	Dữ liệu quan trắc sân bay/ tàu bay
SHIPS	Quan trắc bề mặt biển tại các tàu trên biển
BUOY	Quan trắc tại phao
PILOT	Dữ liệu gió khinh khí cầu
QSCAT	Dữ liệu gió trên bề mặt biển

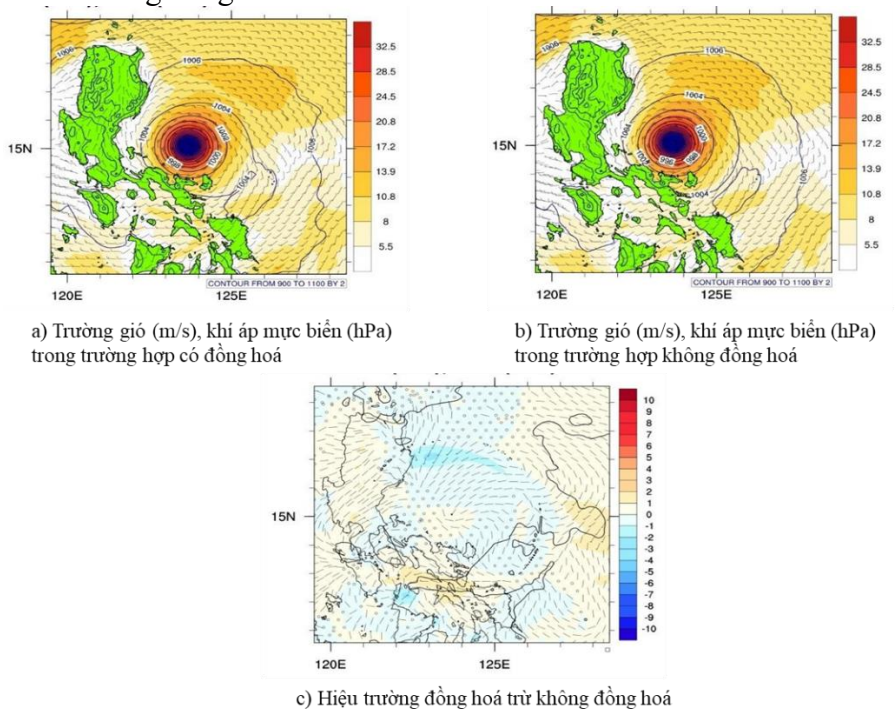
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đánh giá kết quả đồng hoá số liệu trong mô hình HWRF với cơn bão Noru năm 2022

Nghiên cứu tiến hành chạy thử nghiệm đồng hoá số liệu với mô hình HWRF với trường hợp cơn bão Noru năm 2022, là cơn bão mạnh có sự thay đổi cường độ đột ngột hai lần trong quá trình hoạt động. Lần thứ nhất là khi bão ở ngoài khơi Philippine, sau khi đi qua Philippine bão giảm cường độ, và sau khi vào Biển Đông bão tiếp tục có sự tăng cường độ đột ngột.

Kết quả thử nghiệm đồng hoá số liệu với mô hình HWRF sẽ làm thay đổi trường ban đầu so với không đồng hoá số liệu. Phân tích sự thay đổi này sẽ thấy được sự tác động của đồng hoá số liệu làm thay đổi các trường hoàn lưu của bão. Hình 2 thể hiện sự khác biệt của trường gió (wind bar, màu) và khí áp mực biển (đường contour) trong điều kiện ban đầu của mô hình ở trường hợp có đồng hoá (Hình 2a) và không có đồng hoá số liệu (Hình 2b). Trên hình có thể thấy ở trường hợp đồng hoá số liệu trường gió xung quanh cơn bão được tăng

cường tốc độ hơn khoảng 1-2 m/s so với trường hợp không đồng hoá số liệu. Đồng hoá số liệu cũng làm giảm tốc độ gió mực 10 m ở phía bắc cơn bão với vệt màu xanh thể hiện trên hình 2c. Với trường khí áp, các đường đẳng áp không có nhiều sự khác biệt giữa hai trường hợp đồng hoá và không đồng hoá.

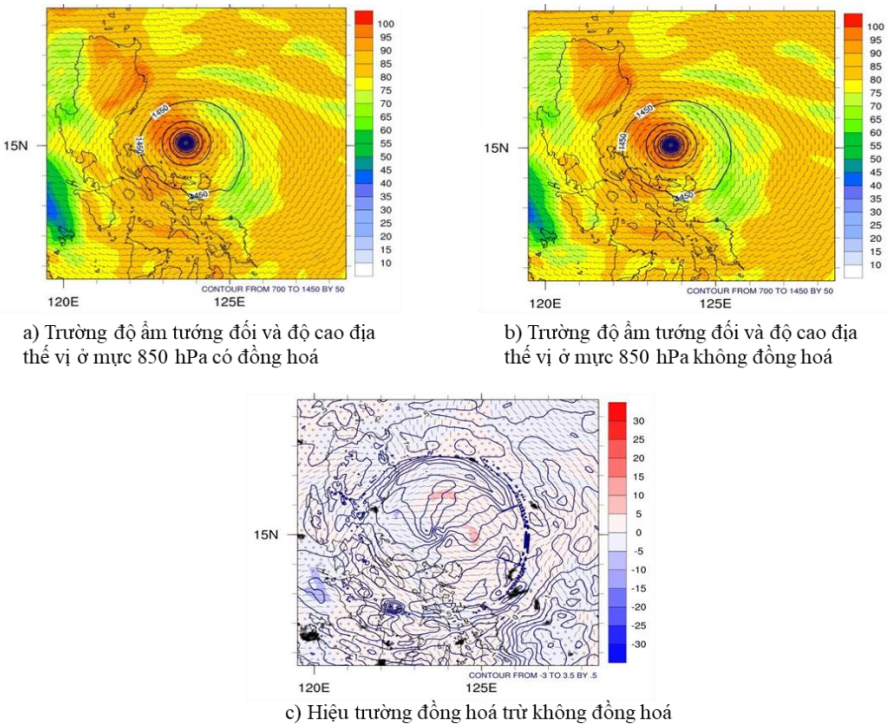


a) Trường gió (m/s), khí áp mực biển (hPa) trong trường hợp có đồng hoá

b) Trường gió (m/s), khí áp mực biển (hPa) trong trường hợp không đồng hoá

c) Hiệu trường đồng hoá trừ không đồng hoá

Hình 2. So sánh trường ban đầu tại bề mặt của trường hợp có đồng hoá và không đồng hoá số liệu với cơn bão Noru tại 00z ngày 25/09/2022.



a) Trường độ ẩm tướng đối và độ cao địa thế vị ở mực 850 hPa có đồng hoá

b) Trường độ ẩm tướng đối và độ cao địa thế vị ở mực 850 hPa không đồng hoá

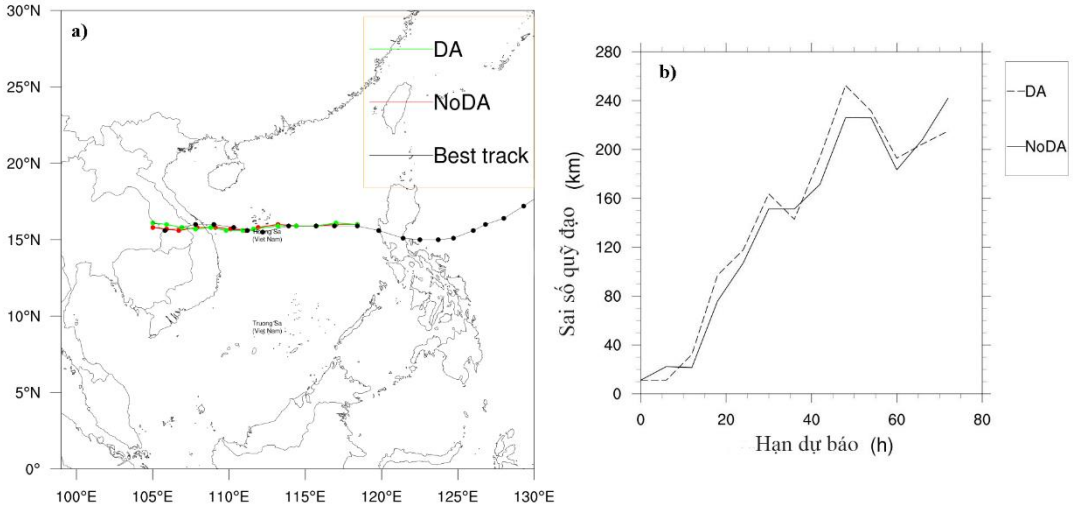
c) Hiệu trường đồng hoá trừ không đồng hoá

Hình 3. So sánh trường ban đầu tại mực 850mb của trường hợp có đồng hoá và không đồng hoá số liệu với cơn bão Noru tại 00z ngày 25/09/2022.

Để thấy rõ hơn sự khác biệt ở trường ban đầu tại mực trên cao, Hình 3 thể hiện trường độ ẩm tương đối và độ cao địa thế vị tại mực 850mb trong trường hợp đồng hóa số liệu (Hình

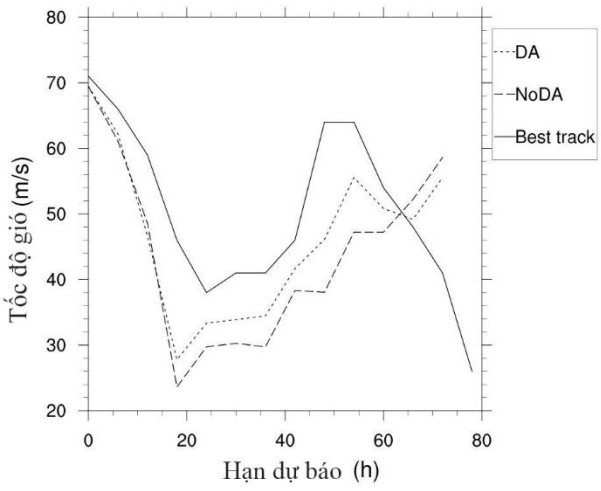
3d) và không đồng hóa số liệu (Hình 3e). Sự thay đổi của trường ẩm ở trường hợp đồng hoá số liệu cho thấy khu vực gần tâm bão có sự tăng cường độ ẩm hơn với các vệt màu hồng (Hình 3f), ở xa tâm bão hơn là một số vệt xanh nhạt thể hiện đồng hoá số liệu làm giảm độ ẩm ở khu vực này. Độ cao địa thế vị giữa hai trường hợp đồng hoá và không đồng hoá có sự thay đổi, thể hiện với các đường contour trên hình 3c, các giá trị thay đổi này dao động khoảng -3 đến 3,5 mét địa thế vị.

Hình 4a thể hiện kết quả dự báo quỹ đạo của cơn bão Noru, trường hợp đồng hoá (đường màu xanh), không đồng hoá (màu đỏ), và quan trắc (màu đen). Có thể thấy kết quả sai số quỹ đạo ở các trường hợp đồng hoá và không đồng hoá là tương đối giống nhau, được lý giải do sự thay đổi trong trường ban đầu không lớn, đã phân tích ở trên. Như vậy có thể khẳng định thêm, những thay đổi trong trường ban đầu của mô hình HWRF đã tác động đến sự thay đổi kết quả dự báo cường độ và quỹ đạo của bão (Hình 4a, 4b).



Hình 4. (a) Kết quả dự báo quỹ đạo thử nghiệm đồng hoá HWRF với cơn bão Noru; (b) Sai số quỹ đạo bão giữa trường hợp đồng hoá và không đồng hoá.

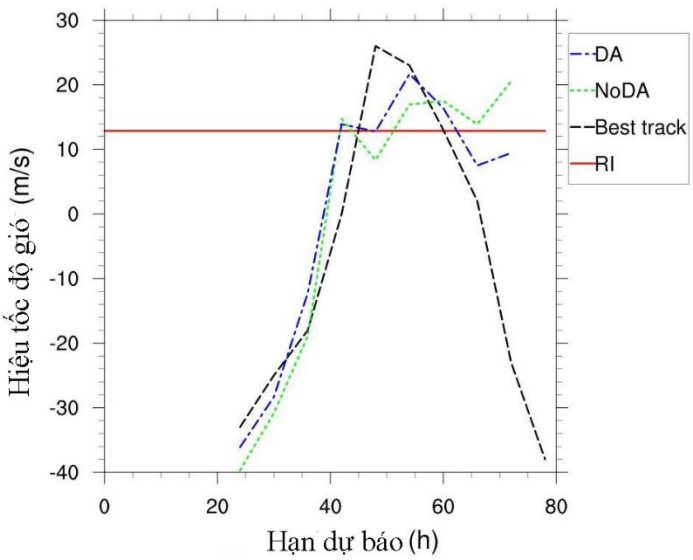
Sự khác biệt về dự báo cường độ bão giữa hai trường hợp đồng hoá và không đồng hoá thể hiện ở hình 5. Hình 5 thể hiện kết quả so sánh dự báo tốc độ gió cực đại trong trường hợp thử nghiệm đồng hoá HWRF với cơn bão NORU tại thời điểm 00z ngày 25/09/2022 so với đường quan trắc (đường nét liền). Có thể thấy cường độ bão thể hiện qua vận tốc gió cực đại trong trường hợp đồng hoá số liệu gần với giá trị quan trắc hơn so với trường hợp không đồng hoá số liệu. Ngoài ra xu hướng tăng và giảm cường độ của bão cũng được thể hiện rõ ràng hơn. Điều này cho thấy khả năng dự báo tốt hơn sự tăng cường độ đột ngột của bão.



Hình 5. Kết quả so sánh dự báo tốc độ gió cực đại trong trường hợp thử nghiệm đồng hoá HWRF với cơn bão NORU tại thời điểm 00z ngày 25/09/2022.

Đánh giá chi tiết khả năng dự báo sự tăng cường độ đột ngột của bão trong vòng 24 giờ theo tiêu chí ở mục 2.1, hình 6 thể hiện kết quả so sánh tốc độ gió cực đại của bão thay đổi trong 24h với đường màu đen (quan trắc),

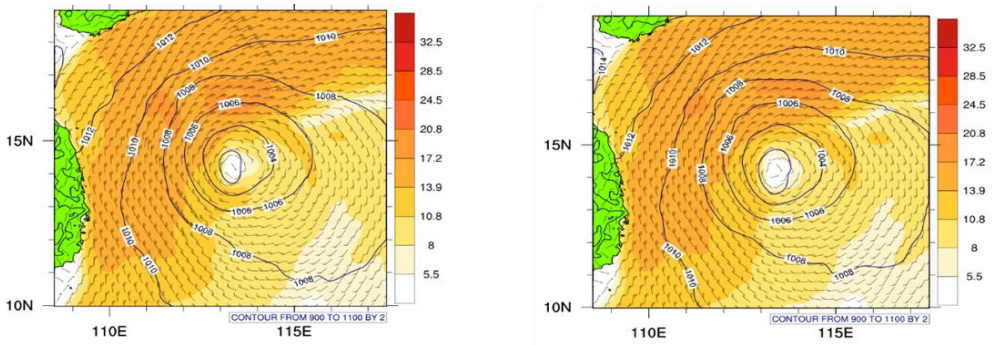
đường màu xanh lam (có đồng hoá số liệu) và đường màu xanh lá (không có đồng hoá số liệu). Đường màu đỏ thể hiện ngưỡng thay đổi cường độ đột ngột trong vòng 24 giờ là khoảng 12,8 m/s (RI). Như vậy theo kết quả hình 6, cả hai trường hợp đồng hoá và không có đồng hoá đều cho rằng cơn bão sẽ xảy ra tăng cường độ đột ngột trước 6 giờ so với thực tế quan trắc được. Sau thời điểm đó đến hạn dự báo 42 giờ, trong khi trường hợp đồng hoá số liệu cho rằng cơn bão tiếp tục có sự tăng cường độ vượt ngưỡng RI đúng với quan trắc thì trường hợp không đồng hoá đã dự báo sai RI ở thời điểm này. Tiếp đến hạn dự báo 66 giờ, trường hợp đồng hoá số liệu một lần nữa dự báo tốt sự tăng cường độ không vượt ngưỡng RI. Ngược lại, trường hợp không đồng hoá số liệu tiếp tục dự báo sai so với quan trắc khi dự báo bão tăng cường độ vượt ngưỡng RI ở thời điểm hạn dự báo 66 giờ và 72 giờ.



Hình 6. Kết quả đánh giá dự báo sự thay đổi cường độ đột ngột (RI) của cơn bão NORU tại thời điểm 00z ngày 25/09/2022.

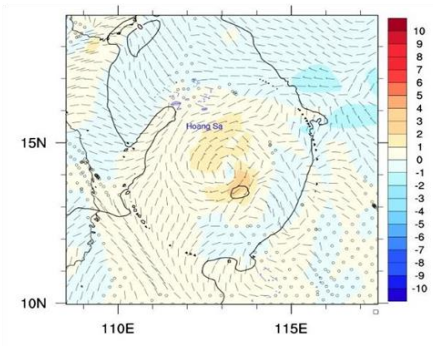
3.2. Đánh giá kết quả đồng hoá số liệu trong mô hình HWRF với cơn bão GONI năm 2020:

Một trường hợp thử nghiệm đồng hoá số liệu khác với cơn bão GONI năm 2020 để đánh giá khả năng dự báo đối với một trường hợp bão có sự thay đổi quỹ đạo đột ngột. Cơn bão GONI năm 2020 cũng là một cơn bão mạnh khi ở Biển Đông, tuy nhiên, khi tiến đến gần bờ



a) Trường gió (m/s), khí áp mực biển (hPa) trong trường hợp có đồng hoá có đồng hoá

b) Trường gió (m/s), khí áp mực biển (hPa) trong trường hợp không đồng hoá



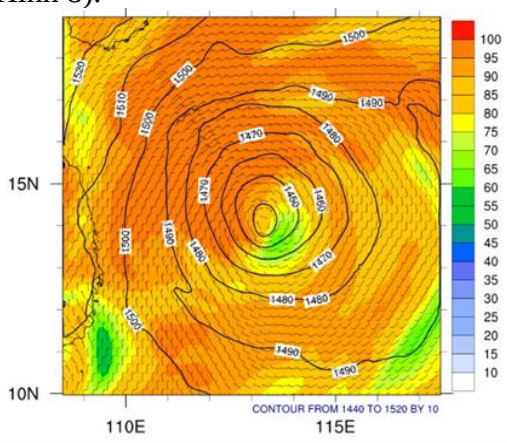
c) Hiệu trường đồng hoá trừ không đồng hoá

Hình 7. So sánh trường ban đầu tại bề mặt của trường hợp có đồng hoá và không đồng hoá số liệu với cơn bão GONI tại 06z ngày 04/11/2020.

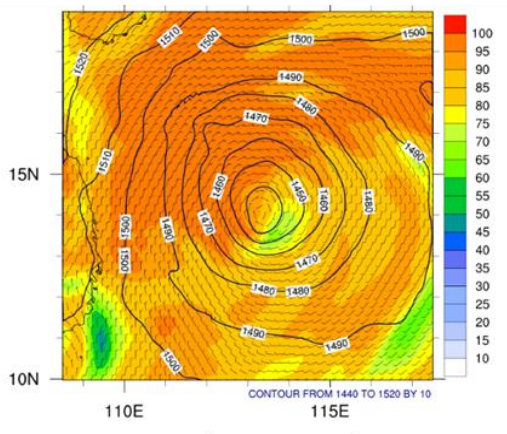
biển khu vực Nam Trung Bộ của Việt Nam, cơn bão đã có sự giảm cường độ và thay đổi quỹ đạo đột ngột vào khoảng 00z ngày 05/11/2020.

Tương tự như hình 2, hình 7 thể hiện sự thay đổi của trường gió mực 10 m và áp suất mực biển của cơn bão GONI trong trường hợ p đồng hóa số liệu (Hình 7a) và không đồng hóa số liệu (Hình 7b) cho thấy khu vực xung quanh bão có sự giảm của tốc độ gió mực 10 m và sự chênh lệch khí áp cực tiểu ở khu vực xung quanh hoàn lưu của cơn bão. Hiệu của trường đồng hoá số liệu trừ đi trường không có đồng hoá cho thấy ở khu vực gần tâm bão có sự tăng cường của gió khoảng 1-2 m/s (Hình 7c).

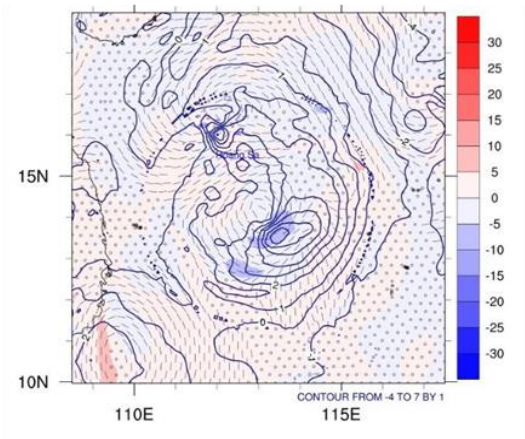
Hình 8 tương tự hình 3 thể hiện so sánh trường độ ẩm tương đối và độ cao địa thế vị ở mực 850mb trong trường hợp đồng hóa (Hình 8a) và không đồng hóa (Hình 8b) cho thấy sự thay đổi rõ rệt ở trường độ cao địa thế vị khu vực phía Bắc và phía Nam tâm bão cùng với sự giảm ẩm ở khu vực này. Sự thay đổi rõ ràng hơn ở trường ban đầu trong trường hợp này dẫn đến sự thay đổi trong dự báo về quỹ đạo bão ở hai trường hợp đồng hoá và không đồng hoá (Hình 8).



a) Trường độ ẩm tướng đối và độ cao địa thế vị ở mực 850 hPa có đồng hoá



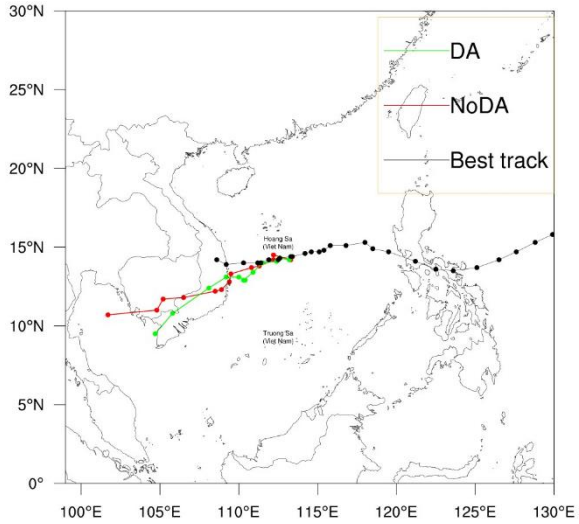
b) Trường độ ẩm tướng đối và độ cao địa thế vị ở mực 850 hPa không đồng hoá



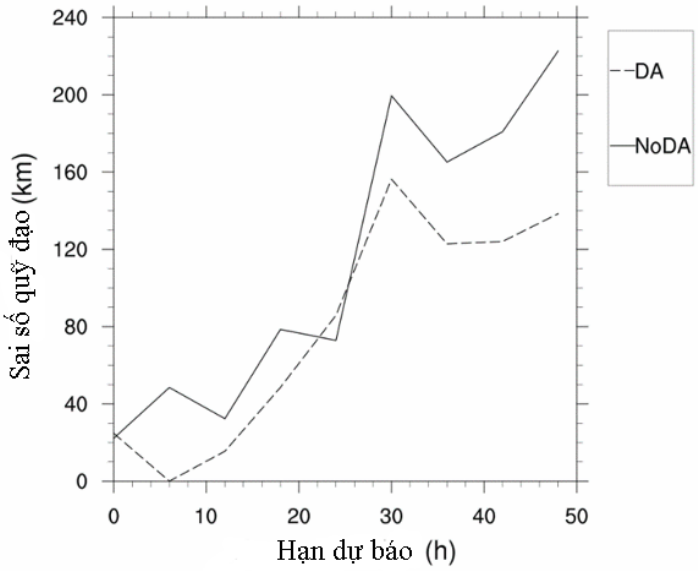
c) Hiệu trường đồng hoá trừ không đồng hoá

Hình 8. So sánh trường ban đầu tại mực 850mb của trường hợp có đồng hoá và không đồng hoá số liệu với cơn bão GONI tại 06z ngày 04/11/2020.

Kết quả dự báo quỹ đạo hình 9 cho thấy sự chênh lệch tương đối rõ giữa hai trường hợp đồng hoá và không đồng hoá đối với cơn bão Noru năm 2020. Đặc biệt ở các hạn dự báo xa hơn thì sự chênh lệch giữa hai trường hợp càng lớn. Kết quả đánh giá sai số quỹ đạo hình 10 cũng cho thấy, sai số ở các hạn dự báo xa của cả hai trường hợp đều lớn. Tuy nhiên, trường hợp có đồng hoá số liệu vẫn thể hiện sai số tốt hơn so với trường hợp không đồng hoá số liệu.



Hình 9. Kết quả dự báo quỹ đạo thử nghiệm đồng hoá HWRF với cơn bão GONI năm 2020.



Hình 10. Kết quả sai số dự báo quỹ đạo thử nghiệm đồng hoá HWRF với cơn bão GONI năm 2020.

4. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã ứng dụng được công nghệ đồng hoá số liệu cho mô hình HWRF dự báo sự thay đổi đột ngột cường độ và quỹ đạo của bão trên Biển Đông. Kết quả dự báo được áp dụng thử nghiệm với hai cơn bão, Noru năm 2022 (thay đổi đột ngột về cường độ) và Goni năm 2020 (thay đổi đột ngột về quỹ đạo).

Kết quả dự báo đối với bão Noru (2022) cho thấy, trường hợp có đồng hoá số liệu cho kết quả dự báo sự thay đổi đột ngột của cường độ bão tốt hơn so với trường hợp không đồng hoá số liệu. Cụ thể là, ở hạn dự báo 42 giờ, trong khi trường hợp đồng hoá số liệu cho rằng cơn bão tiếp tục có sự tăng cường độ vượt ngưỡng RI đúng với quan trắc thì trường hợp không đồng hoá đã dự báo sai RI ở thời điểm này. Đến hạn dự báo 66 giờ, trường hợp đồng hoá số liệu một lần nữa dự báo tốt sự tăng cường độ không vượt ngưỡng RI, trong khi trường hợp không đồng hoá tiếp tục dự báo không phù hợp so với quan trắc ở các hạn dự báo 66 giờ và 72 giờ.

Đối với trường hợp cơn bão Goni (2020), kết quả đồng hoá số liệu cũng thể hiện được sai số của sự thay đổi đột ngột của quỹ đạo bão tốt hơn so với trường hợp không đồng hoá số liệu. Tuy nhiên, trường hợp này cho sai số quỹ đạo của mô hình HWRF ở các hạn dự báo xa

là chưa tốt. Thời điểm kết quả dự báo của mô hình HWRF không tốt cũng trùng với thời điểm cơn bão có sự suy yếu cường độ, được cho là điểm gây khó khăn cho việc dự báo của mô hình HWRF.

Kết quả thử nghiệm đồng hóa dữ liệu cho mô hình HWRF dự báo sự thay đổi đột ngột của cường độ và quỹ đạo bão trên Biển Đông bước đầu cho thấy có sự cải thiện về kết quả dự báo. Tuy nhiên để có thể khẳng định việc đồng hóa số liệu cho kết quả dự báo tốt hơn trường hợp không đồng hóa cần phải thử nghiệm thêm nhiều trường hợp nữa. Trong tương lai, nhóm tác giả sẽ tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về đồng hoá số liệu trong hệ thống mô hình HWRF với các phương pháp đồng hoá khác như đồng hoá tổ hợp hay đồng hoá lai.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: V.V.T.; Xử lý số liệu: T.D.T., N.Đ.N.; Viết bản thảo bài báo: N.Đ.N.; Chỉnh sửa bài báo: V.V.T.

Lời cảm ơn: Bài báo này là một phần kết quả thực hiện trong nội dung của đề tài cấp Nhà nước, mã số ĐTĐL.CN-119/21.

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. Richardson, L.F. Weather prediction by numerical process. *Q. J. R. Meteorolog. Soc.* **1922**, *48(203)*, 282–284. https://doi.org/10.1002/qj.49704820311.
2. Charney, J.G.; Fjörtoft, R.; Neumann, J. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus* **1950**, *2(4)*, 237–254. https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1950.tb00336.x.
3. Cressman, G.P. An operational objective analysis system. *Mon. Weather Rev.* **1959**, *87(10)*, 367–374. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1959)087.
4. Barnes, S.L. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *J. Appl. Meteorol.* **1964**, *3(4)*, 396–409. https://doi.org/10.1175/1520-0450(1964)003.
5. Aksoy, A.; Lorsolo, S.; Vukicevic, T.; Sellwood, K.J.; Aberson, S.D.; Zhang, F. The HWRF hurricane ensemble data assimilation system (HEDAS) for high-resolution data: The impact of airborne doppler radar observations in an OSSE. *Mon. Weather Rev.* **2012**, *140(6)*, 1843–1862. https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00212.1.
6. Lu, X.; Wang, X.; Tong, M.; Tallapragada, V. GSI-based, continuously cycled, dual-resolution hybrid ensemble-variational data assimilation system for HWRF: System description and experiments with Edouard (2014). *Mon. Weather Rev.* **2017**, *145(12)*, 4877–4898. https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0068.1.
7. Tong, M.; Sippel, J.A.; Tallapragada, V.; Liu, E.; Kieu, C.; Kwon, I.H.; Wang, W.; Liu, Q.; Ling, Y.; Zhang, B. Impact of assimilating aircraft reconnaissance observations on tropical cyclone initialization and prediction using operational HWRF and GSI ensemble-variational hybrid data assimilation. *Mon. Weather Rev.* **2018**, *146(12)*, 4155–4177. https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0380.1.
8. Zou, X.; Weng, F.; Zhang, B.; Lin, L.; Qin, Z.; Tallapragada, V. Impacts of assimilation of ATMS data in HWRF on track and intensity forecasts of 2012 four landfall hurricanes. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2013**, *118(20)*, 11.558–11.576. https://doi.org/10.1002/2013JD020405.
9. Zou, X.; Weng, F.; Tallapragada, V.; Lin, L.; Zhang, B.; Wu, C.; Qin, Z. Satellite data assimilation of upper-level sounding channels in HWRF with two different model tops. *J. Meteorol. Res.* **2015**, *29(1)*, 1–29. https://doi.org/10.1007/s13351-015-4108-9.
10. Zou, X.; Qin, Z.; Zheng, Y. Improved tropical storm forecasts with GOES-13/15 imager radiance assimilation and asymmetric vortex initialization in HWRF. *Mon.*

Weather Rev. **2015**, *143(7)*, 2485–2505. https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00223.1.

11. Atlas, R.; Hoffman, R.N.; Ma, Z.; Emmitt, G.D.; Wood, S.A.; Greco, S.; Tucker, S.; Bucci, L.; Annane, B.; Hardesty, R.M.; Murillo, S. Observing system simulation experiments (OSSEs) to evaluate the potential impact of an optical autocovariance wind lidar (OAWL) on numerical weather prediction. *J. Atmos. Oceanic Technol.* **2015**, *32(9)*, 1593–1613. https://doi.org/10.1175/jtech-d-15-0038.1.
12. Zhang, S.; Pu, Z.; Velden, C. Impact of enhanced atmospheric motion vectors on HWRF hurricane analyses and forecasts with different data assimilation configurations. *Mon. Weather Rev.* **2018**, *146(5)*, 1549–1569. https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0136.1.
13. Lewis, W.E.; Velden, C.S.; Stettner, D. Strategies for assimilating high-density atmospheric motion vectors into a regional tropical cyclone forecast model (HWRF). *Atmosphere* **2020**, *11(6)*, 673. https://doi.org/10.3390/atmos11060673.
14. Lu, X.; Davis, B.; Wang, X. Improving the assimilation of enhanced atmospheric motion vectors for hurricane intensity predictions with HWRF. *Remote Sens.* **2022**, *14(9)*, 2040. https://doi.org/10.3390/rs14092040.
15. Lim, A.H.N.; Nebuda, S.E.; Jung, J.A.; Daniels, J.M.; Bailey, A.; Bresky, W.; Bi, L.; Mehra, A. Optimizing the assimilation of the GOES-16/-17 atmospheric motion vectors in the hurricane weather forecasting (HWRF) model. *Remote Sens.* **2022**, *14(13)*, 3068. https://doi.org/10.3390/rs14133068.
16. Đức, L.; Thuỷ, Đ.L.; Trung, L.H. Xây dựng trường ẩm cho mô hình HRM từ số liệu vệ tinh địa tĩnh dựa trên phương pháp biến phân ba chiều (3DVAR). *Tạp chí Khí tượng Thuỷ văn* **2007**, *558*, 22–32.
17. Cường, H.Đ. Nghiên cứu ứng dụng sơ đồ đồng hóa số liệu 3DVAR cho mô hình WRF để dự báo thời tiết ở Việt Nam. *Tạp chí Khí tượng Thuỷ văn* **2011**, *610*, 37–42.
18. Tiến, T.T.; Thanh, N.T. Đồng hóa dữ liệu vệ tinh Modis trong mô hình WRF để dự báo mưa lớn ở khu vực Trung Bộ. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN, Khoa học Tự nhiên và Công nghệ* **2011**, *27*, 90–95.
19. Tiến, D.Đ.; Tăng, B.M.; Hòa, V.V.; Vui, P.T.; Đức, T.A.; Tùng, N.T. Nghiên cứu đồng hóa số liệu Radar đông hà để nâng cao chất lượng dự báo mưa lớn cho khu vực Miền Trung. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2013**, *632*, 12–19.
20. Du Duc, T.; Ngo-Duc, T.; Kieu, C. Initializing the WRF model with tropical cyclone real-time reports using the ensemble Kalman filter algorithm. *Pure Appl. Geophys.* **2017**, *174(7)*, 2803–2825. https://doi.org/10.1007/S00024-017-1568-0/METRICS.
21. Tien, T.T.; Hoa, D.N.Q. Experiments on using WRF model data assimilation of coupled 3DVAR – LETKF in predicting the geneses of tropical cyclones in the Vietnamese East Sea. *VN J. Sci.: Earth Environ. Sci.* **2018**, *34(1S)*, 77–89. https://doi.org/10.25073/2588-1094/VNUEES.4338.
22. Thuc, T.D.; Thanh, C. Radar data assimination in WRF model to forecast heavy rainfall at Ho Chi Minh City. *VN J. Sci.: Earth Environ. Sci.* **2018**, *34(1S)*, 59–70. https://doi.org/10.25073/2588-1094/VNUEES.4336.
23. Phuong, L.L.; Nam, P.Q.; Duc, T.Q.; Tan, P.V. An experiment for assimilating different type of data observations in forecasting heavy rainfall over Central Highlands region due to the impact of hurricane Damrey. *VN J. Sci.: Earth Environ. Sci.* **2019**, *35(4)*, 121–129. https://doi.org/10.25073/2588-1094/VNUEES.4478.
24. Nam, N.Đ.; Mạnh, N.T.; Anh, N.X.; Khương, P.L.; Linh, N.T.; Hiệp, N.V. Ứng dụng đồng hóa dữ liệu dự báo các trường khí tượng độ phân giải cao cho khu vực Than Uyên (Lai Châu). *Tạp chí Khí tượng Thuỷ văn* **2021**, *724*, 59–71. https://doi.org/10.36335/vnjhm.2021(724).59-71.

25. Hoan, N.T.; Thắng, N.V.; Hiệp, N.V.; Cường, H.Đ. Đánh giá vai trò ban đầu hóa xoáy trong mô hình HWRF đối với dự báo bão trên Biển Đông. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2014**, *644*, 9–12.
26. Hoan, N.T.; Cường, H.Đ.; Kiên, T.B.; Hiệp, N.V.; Chánh, K.Q.; Tallapragada, V.; Như, Đ.H.; Tuyết, L.T.; Khiêm, M.V. Vai trò của ban đầu hóa xoáy trong mô hình HWRF đối với mô phỏng cấu trúc bão Ketsana (2009). *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2015**, *649*, 11–16.
27. Nga Pham, T.T.; Thang, V.V.; Ha, P.T.; Nam, Q.P.; Hiep, V.N. Predictability of tropical cyclone rapid intensification based on statistical approach. *Disaster Adv.* **2023**, *16(12)*, 1–11. https://doi.org/10.25303/1612da01011.
28. Thức, T.D.; Thăng, V.V. Nghiên cứu chỉ tiêu xác định sự thay đổi đột ngột quỹ đạo bão trên khu vực Biển Đông. *Tạp chí Khoa học Biến đổi khí hậu* **2024**, *29*, 31–38. https://doi.org/10.55659/2525-2496/29.94654.
29. 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 (Accessed on 20 March 2020).

Experimental research on data assimilation in forecasting sudden changes in storm intensity and trajectory in the East Sea using the HWRF model

Nguyen Duc Nam[1], Vu Van Thang[1]*, Tran Duy Thuc[1]

[1] Vietnam institute of meteorology, Hydrology and Climate change;
ducnam.mi@gmail.com; vvthang26@gmail.com; tranduythuc1@gmail.com

Abstract: This article presents the results of data assimilation testing in forecasting sudden changes in storm intensity and trajectory in the East Sea region using the HWRF model. The HWRF model is experimentally designed with boundary and initial condition data which are GFS data with a resolution of 0.25×0.25 degrees longitude and assimilation data taken from the GTS global meteorological telecommunications system (Global Telecommunications Systems). Test results of data assimilation predicting the sudden change in intensity of storm Noru (2022) and the sudden change in trajectory of storm Goni (2020) using the HWRF model show some improvements in forecast results. For storm Noru, the case of data assimilation resulted in accurate forecasts of sudden changes in storm intensity for the 42-hour forecast period and not predicting the false results of sudden changes in storm intensity at other longer forecast periods like the case without data assimilation. In the case of storm Goni, the trajectory evaluation results show that the forecast error of the case of data assimilation is better than the case of no data assimilation.

Keywords: HWRF model; Rapid intensification forecast; Data assimilation.