



Original Article

Forecast of the Hailstorm Event on March 21st, 2021 in the Northwest Region of Vietnam using Numerical Model

Doan Manh Duy, Nguyen Minh Truong*

VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

Received 25th August 2025

Revised 15th October 2025; Accepted 30th October 2025

Abstract: This study uses the WRF model to forecast the hailstorm event of March 21st, 2021 in the Northwest provinces of Vietnam, based on three hail size prediction indices: the *Maximum Estimated Size of Hail* from simulated reflectivity (MESH_WRF), the *Thompson algorithm* (Dmax), and the *WRF-Hailcast* model (HC). Using two microphysics schemes, Milbrandt–Yau (MY2) and Morrison (MOR), the model was able to forecast the development of the hail-producing convective system, in terms of both location and intensity. When evaluated against radar-derived MESH data (MESH_radar), Dmax_MY2 performed the best in predicting hail occurrence area. Both MESH_WRF products overforecasted the hail area, while HC had no prediction capability for this event. Microphysical analysis of the largest convective cell revealed that the maxima of hail mixing ratio and average size in MY2 were located at lower levels compared to those of the graupel phase in MOR. As a result, the MESH_WRF and Dmax products from MY2 provided better forecasts than those from MOR.

Keywords: Hail, MESH, WRF, Microphysics.

* Corresponding author.

E-mail address: truongnm@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5388>

Dự báo đợt mưa đá ngày 21/03/2021 tại Tây Bắc Bộ bằng mô hình số

Đoàn Mạnh Duy, Nguyễn Minh Trường*

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc Gia Hà Nội,
334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 25 tháng 8 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 15 tháng 10 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 10 năm 2025

Tóm tắt: Nghiên cứu sử dụng mô hình WRF để dự báo đợt mưa đá ngày 21/03/2021 tại các tỉnh Tây Bắc Bộ, thông qua ba biến dự báo kích thước hạt, gồm Kích thước hạt Mưa đá Ước lượng Cực đại từ độ phản hồi mô phỏng của mô hình WRF (MESH_WRF), Thuật toán Thompson (Dmax) và Mô hình WRF-Hailcast (HC). Sử dụng hai sơ đồ vi vật lý Mibrandt-Yau (MY2) và Morrison (MOR), mô hình đều có thể dự báo được sự phát triển của ổ dông gây mưa đá, cả về vị trí và cường độ. So sánh kết quả dự báo với dữ liệu MESH từ radar (MESH_radar), Dmax_MY2 có điểm kỹ năng dự báo diện xuất hiện mưa đá tốt nhất, hai sản phẩm MESH_WRF đều dự báo không diện xuất hiện, còn HC hầu như không có khả năng dự báo đợt mưa đá này. Phân tích đặc trưng vi vật lý của hai sơ đồ trong ổ dông lớn nhất cho thấy MY2 cho tỷ số xáo trộn pha hail (đá rắn) cực đại và kích thước trung bình cực đại phân bố ở độ cao thấp hơn so với pha graupel (đá xốp) của MOR, dẫn tới các sản phẩm MESH_WRF và Dmax của MY2 dự báo tốt hơn MOR.

Từ khóa: Mưa đá, MESH, WRF, vi vật lý.

1. Mở đầu

Mưa đá là giáng thủy dạng rắn rơi tới bề mặt, với kích thước hạt từ 5mm trở lên [1]. Mưa đá xảy ra trong các ổ dông dữ dội, thời gian xảy ra ngắn, tuy nhiên lại gây thiệt hại nặng nề tới cơ sở vật chất và đời sống con người. Thống kê sơ bộ, thiệt hại do mưa đá mỗi năm ở Hoa Kỳ, Châu Âu hay Trung Quốc đều lên tới vài tỉ Đô-la Mỹ tính riêng cho mỗi khu vực [2].

Do tính chất cục bộ của mưa đá, khả năng quan trắc hiện tượng còn nhiều hạn chế. Số liệu trạm quan trắc truyền thống tương đối ít do phân bố thưa theo không gian cũng như tần suất quan trắc tương đối thấp [3]. Dữ liệu quan trắc radar có thể sử dụng làm nguồn quan trắc tin cậy, tuy nhiên số lượng radar còn ít do chi phí lắp đặt cao,

cùng với hạn chế về độ chính xác khi quan trắc trên những vùng có địa hình phức tạp. Quan trắc bằng vệ tinh cho khả năng theo dõi liên tục, tuy nhiên mới chỉ có thể quan trắc mưa đá bằng một số công nghệ mới phát triển gần đây, chưa đáp ứng được yêu cầu ứng dụng trong quan trắc phổ thông [4]. Một số cách tiếp cận khác như thông qua dữ liệu từ cộng đồng (phần mềm báo cáo thời tiết), dữ liệu thiệt hại từ bảo hiểm, hay những dự án quan trắc cục bộ như *hailpad* tại châu Âu, *RELAMPAGO-CACTI* tại Nam Mỹ,... đã bổ sung nhiều thông tin hữu ích về mưa đá [5]. Từ những nguồn thông tin trên, một số quốc gia, khu vực trên thế giới đã xây dựng được phân bố khí hậu của mưa đá, cung cấp nhiều đặc trưng có giá trị cho nghiên cứu về mưa đá [5-7].

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: truongnm@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5388>

Tương tự với các sản phẩm dự báo thời tiết, dự báo mưa đá trên thế giới đã đạt được nhiều thành tựu đáng kể. Các mô hình số đã cung cấp lượng thông tin đầy đủ, đáng tin cậy cho bản tin dự báo mưa đá. Những phương pháp dự báo mưa đá bằng mô hình số dùng các chỉ số đồng thay thế đã được ứng dụng phổ biến trong thập niên 2010, cùng với giản đồ thiên khí cho bởi mô hình [8]. Gần đây hơn, một số phương pháp dự báo hiện kích thước hạt mưa đá như *mô hình Hailcast* (HC) [9], *thuật toán Thompson* (Dmax) [10] hay *Kích thước hạt Mưa đá Ước lượng Cực đại* (MESH) từ độ phản hồi vô tuyến mô phỏng của mô hình [11] đã được phát triển, ứng dụng trong nghiệp vụ ở một số quốc gia, khu vực trên thế giới. Không dừng lại ở đó, những nghiên cứu ứng dụng AI/ML trong dữ liệu khí tượng cũng cung cấp thêm nhiều hướng tiếp cận cho bài toán dự báo mưa đá [12, 13].

Chất lượng dự báo của mô hình số phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó có các sơ đồ tham số vật lý. Đối với các mô hình *Đối lưu hiện* (CAMs), các sơ đồ *vi vật lý* (MP) đóng vai trò quan trọng nhất bởi chúng kiểm soát quá trình chuyển pha mây, gắn liền với các sản phẩm giáng thủy. Đa phần các sơ đồ vi vật lý hiện nay thuộc nhóm sơ đồ khối, trong đó phổ phân bố hạt thường tuân theo phân bố *gamma* ba tham số [10]. Các sơ đồ bậc một thường dự báo thành phần *tỉ số xáo trộn* của các pha, trong khi các sơ đồ bậc hai tính thêm *nồng độ hạt* (number concentration) của từng pha. Hai tham số này được sơ đồ vi vật lý dự báo thông qua hai thành phần: các quá trình *sinh/tan* (source/sink) và quá trình *lắng* (sedimentation) của các hạt trong mây [14]. Sự thay đổi nhiệt độ môi trường do chuyển pha, cùng với biến đổi tỉ số xáo trộn pha nước dẫn tới làm thay đổi một số trường động lực như vận tốc thẳng đứng, phân bố khối lượng ở môi trường ổ đông. Mặc dù vậy, sự phức tạp trong các quá trình chuyển pha cùng với sai số tính toán trên lưới dẫn tới còn nhiều vấn đề cần nghiên cứu, giải quyết [15].

Trên thế giới, nhiều tác giả đã thực hiện nghiên cứu phân tích khả năng dự báo, cơ chế và đặc điểm nhiệt động lực học trong các trận mưa đá bằng mô hình số với các sơ đồ vi vật lý khác

nhau. Snook và cộng sự (2016) thực hiện dự báo trận mưa đá dữ dội ngày 20/05/2013 ở Oklahoma (Hoa Kỳ) bằng mô hình ARPS, sử dụng sơ đồ vi vật lý Mibrandt-Yau bậc hai (MY2) cho thấy mô hình có khả năng dự báo mưa đá thông qua Dmax, MESH từ mô hình và khối lượng pha *hail* m_h [16]. Sử dụng cấu hình mô hình tương tự trên cùng khu vực nghiên cứu cho ngày 19/05/2013, Labriola và cộng sự (2019a) phân tích kỹ năng dự báo mưa đá bằng *phương pháp Thompson* với ba sơ đồ gồm MY2, Mibrant-Yau bậc ba (MY3) và NSSL bậc hai [17], chỉ ra rằng sơ đồ NSSL dự báo tốt về diện mưa đá lớn (đường kính hạt trên 25 mm), trong khi hai sơ đồ MY dự báo hạt mưa đá rất lớn (trên 50 mm) tốt hơn do MY có nồng độ hạt pha hail và tốc độ phát triển hạt lớn hơn nhiều so với NSSL [18]. Hai nghiên cứu của Luo và cộng sự (2017, 2018) cho hai trận mưa đá ngày 19/03/2014 [11] và 27/04/2015 [19] ở miền đông Trung Quốc sử dụng sơ đồ MY với ba biến thể từ bậc nhất tới bậc ba trên nền mô hình ARPS, lại chỉ ra rằng các sơ đồ vi vật lý MY bậc cao có khả năng dự báo mưa đá tốt hơn khi sử dụng MESH từ mô hình, Dmax.

Sử dụng sáu sơ đồ vi vật lý cho cùng sự kiện mưa đá của Snook và cộng sự (2016) cho mô hình *Nghiên cứu và Dự báo Thời tiết* (Weather Research and Forecast - WRF), Labriola và cộng sự (2019b) chỉ ra chỉ số *Độ xoáy Dòng thẳng* (UH) là chỉ số dự báo mưa đá có kỹ năng tốt nhất ở mọi sơ đồ vi vật lý và ngưỡng kích thước [20]. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng sơ đồ Morrison (MOR) [21] có xu thế dự báo nhiều hạt mưa đá ở các lớp trên cao, giúp dự báo mưa đá rất lớn tốt hơn các sơ đồ vi vật lý khác. Một số nghiên cứu như của Chevuturi và cộng sự (2014) [22], Zhang và cộng sự (2020) [23] Jiang và cộng sự (2023) [24],... cho nhiều trận mưa đá khác nhau, chỉ ra chất lượng dự báo mưa đá của các sơ đồ vi vật lý thay đổi tùy theo trường hợp.

Tại Việt Nam, mưa đá có thể xảy ra ở hầu khắp các khu vực, đặc biệt tại các vùng có địa hình núi cao như Tây Bắc, Tây Nguyên [25]. Thiệt hại do mưa đá tăng tỉ lệ thuận với tốc độ phát triển kinh tế, dẫn tới yêu cầu cần nâng cao chất lượng bản tin dự báo, cảnh báo mưa đá. Một số ít nghiên cứu trong nước quan tâm tới mưa đá, tiêu biểu có Duy và Trường (2022) [26], Thắng

và cộng sự (2020) [27] nghiên cứu về đợt mưa đá diện rộng tại Bắc Bộ, chỉ ra nguyên nhân gồm cơ chế nâng và điều kiện hạ thấp mực băng kết gắn liền với đợt xâm nhập lạnh. Mậu và cộng sự (2023) [28] nghiên cứu phân bố khí hậu của mưa đá, cho thấy vùng có tần suất mưa đá xảy ra lớn nhất ở Tây Bắc Bộ. Gần đây hơn, Duy và cộng sự (2024) [29] đã thử nghiệm một số chỉ số dự báo mưa đá từ mô hình WRF, cho thấy khả năng ứng dụng cho dự báo mưa đá tại Việt Nam. Có thể thấy rằng số lượng nghiên cứu về mưa đá trong nước còn hạn chế, đặc biệt trong lĩnh vực ứng dụng mô hình số trong dự báo, cảnh báo mưa đá.

Gần đây, một trận mưa đá lớn đã xảy ra vào chiều tối ngày 21/03/2021 tại các tỉnh Tây Bắc Bộ. Các báo cáo thiệt hại, thông tin ghi nhận từ báo chí cho thấy kích thước hạt mưa đá phổ biến từ 20-25 mm, lớn nhất ghi nhận tại xã Chà Nưa, huyện Nậm Pồ (cũ), tỉnh Điện Biên với đường kính hạt 30 mm [30]. Trận mưa đá gây thiệt hại 180 nhà và công trình, 40,1 hecta diện tích lúa, hoa màu [31]. Nhằm tìm hiểu khả năng dự báo hiện kích thước mưa đá bằng mô hình số và tác động của các sơ đồ vi vật lý tới sản phẩm dự báo mưa đá, nghiên cứu này sử dụng mô hình WRF với ba biến dự báo kích thước hạt mưa đá, sau đó

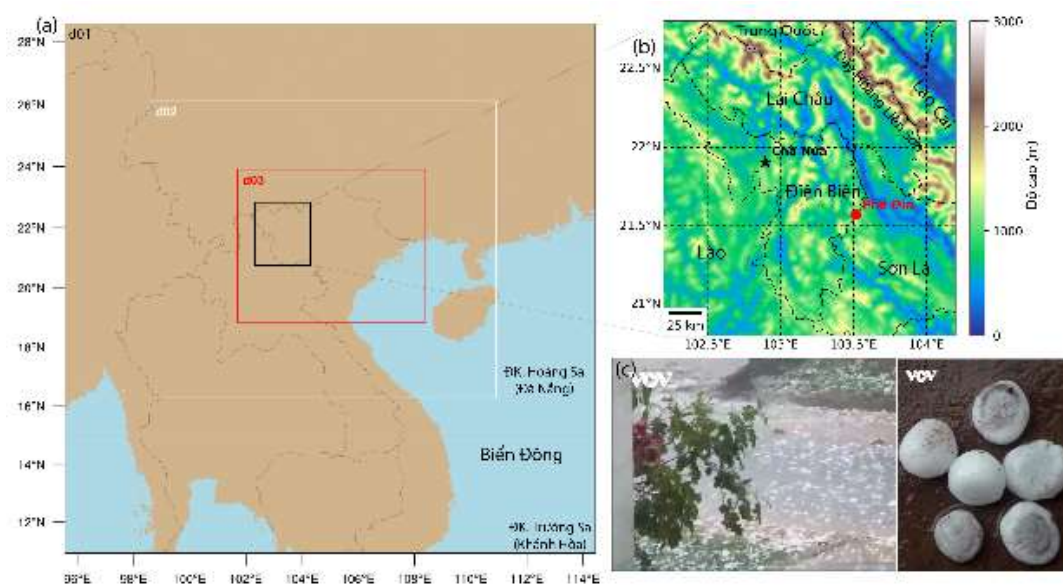
đánh giá chất lượng dự báo bằng cách so sánh với dữ liệu quan trắc từ radar Pha Đin, cuối cùng thực hiện phân tích một số đặc trưng vật lý. Mục tiếp theo mô tả số liệu và phương pháp. Kết quả dự báo và phân tích đặc trưng vi vật lý được đưa ra trong mục 3. Mục 4 là kết luận.

2. Phương pháp và số liệu

2.1. Mô hình và số liệu dự báo

Nghiên cứu sử dụng mô hình WRF, phiên bản 4.6.1 [32]. Mô hình chạy cho ba lưới lồng, độ phân giải ngang lần lượt 13,5, 4,5 và 1,5 km, với tâm miền tính thứ ba đặt tại khu vực Bắc Bộ. Mô hình được tích phân trên 51 mực thẳng đứng. Miền tính và khu vực nghiên cứu được thể hiện trên Hình 1.

Điều kiện ban đầu và điều kiện biên được lấy từ sản phẩm mô hình dự báo toàn cầu GFS, với độ phân giải ngang 0,25 độ cho từng 03 giờ [33]. Mô hình chạy từ 12UTC ngày 20/03/2021, dự báo cho 36 giờ tiếp theo. Các sơ đồ tham số vật lý chính sử dụng trong mô hình được trình bày cụ thể trong Bảng 1.



Hình 1. (a) Miền tính của thí nghiệm, (b) Khu vực đánh giá dự báo, radar Pha Đin và điểm báo cáo mưa đá Chà Nưa được thể hiện bằng dấu chấm đỏ và dấu sao tương ứng, (c) Hình ảnh mưa đá tại Chà Nưa, Điện Biên.

Nghiên cứu thực hiện thí nghiệm với hai sơ đồ tham số hóa vi vật lý MY2 và MOR. MY2 tính tỉ số xáo trộn và số hạt cho tất cả sáu pha của nước, gồm pha cloud (mây), rain (mưa lỏng), ice (băng), snow (tuyết), graupel (đá xộp) và hail (đá rắn), thường được dùng trong các nghiên cứu dự báo mưa đá [11, 16, 18-20, 22]. MOR là sơ đồ bậc hai khuyết, dự báo tỉ số xáo trộn của năm pha (trừ hail) và số hạt của bốn pha (trừ cloud và hail). Việc tinh giản tính toán này đem lại hiệu suất tốt mà không ảnh hưởng quá nhiều đến chất lượng dự báo [21]. MOR cũng thường được sử dụng trong nghiên cứu mưa đá, đem lại chất lượng tương đương với sơ đồ MY2 [12, 13, 20].

Bảng 1. Các tùy chọn tham số hóa vật lý của mô hình WRF sử dụng trong nghiên cứu

Sơ đồ tham số hóa	Tên sơ đồ
Tham số hóa vi vật lý	Mibrant-Yau (MY2)
	Morrison (MOR)
Tham số hóa đối lưu	Kain-Fritsch (lưới 1)
Bức xạ sóng ngắn	Dudhia
Bức xạ sóng dài	RRTM
Tham số hóa lớp biên	YSU
Tham số hóa đất	Thermal diffusion

Để dự báo mưa đá, nghiên cứu sử dụng ba biến dự báo kích thước hạt. *Thuật toán Thompson* xác định kích thước hạt cực đại tại bề mặt (D_{max}), là đường kính hạt nhỏ nhất tồn tại tối thiểu một hạt trong một thể tích $100 \times 100 \times 1$ mét, được tính toán từ phổ kích thước hạt [10]. D_{max} được ước lượng trực tiếp từ kết quả dự báo pha hail trong MY2 và pha graupel trong MOR. Mô hình nhúng một chiều *Hailcast* ước lượng sự phát triển của hạt mưa đá từ thông tin nhiệt, ẩm, áp tại từng điểm lưới [9]. Thông tin trả về từ Hailcast là kích thước hạt mưa đá cực đại rơi tới bề mặt (HC). Cuối cùng, *Kích thước Hạt mưa đá Ước lượng Cực đại* (Maximum Estimated Size of Hail – MESH) được tính toán từ độ phản hồi vô tuyến mô phỏng của mô hình và profile nhiệt độ thẳng đứng [34]. Phương pháp xây dựng MESH từ dữ liệu radar mô phỏng của mô hình WRF (MESH_WRF) hoàn toàn tương tự MESH từ dữ liệu radar (MESH_radar), được trình bày trong tiểu mục tiếp theo.

2.2. Dữ liệu quan trắc mưa đá

MESH_radar được tính từ dữ liệu radar tại trạm Pha Đin như sau. Đầu tiên, *Độ dữ dội của Mưa đá* (Severe Hail Index - SHI) xác định sự hiện diện và cường độ của đợt mưa đá, từ dữ liệu của độ phản hồi vô tuyến và profile nhiệt độ thẳng đứng [35]. MESH được tính từ SHI theo công thức thực nghiệm của Murillo và Homeyer [4] như sau:

$$\text{MESH} = 16.566(\text{SHI})^{0.181} \text{ (inch)}$$

Sản phẩm MESH đã được ứng dụng rộng rãi trong quan trắc, nghiên cứu mưa đá tại Hoa Kỳ cũng như nhiều quốc gia [36]. Trong nghiên cứu này, MESH_WRF và MESH_radar được quy đổi đồng nhất về đơn vị mm.

2.3. Phương pháp đánh giá dự báo

Để đánh giá kỹ năng dự báo, *Điểm kỹ năng Không gian* (Fraction Skill Score – FSS) được sử dụng trong nghiên cứu này. FSS được tính theo công thức [37]:

$$\text{FSS}_{(n)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [f(n)_{ij} - o(n)_{ij}]^2}{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [f(n)_{ij}^2 - o(n)_{ij}^2]}$$

với $f(n)_{ij}$ ($o(n)_{ij}$) là tỉ lệ diện tích trường dự báo (quan trắc) vượt ngưỡng dự báo trên diện tích hình vuông cạnh $2n+1$ lân cận xung quanh điểm tính i, j . Với $o(0)$ tỉ lệ diện tích quan trắc trên toàn bộ diện tích miền tính, ngưỡng kỹ năng dự báo ngẫu nhiên F_0 được định nghĩa bởi:

$$F_0 = \frac{1}{2} + \frac{o(0)}{2}$$

FSS đánh giá sự tương đồng về hình thái và diện của sản phẩm dự báo với dữ liệu quan trắc [40]. FSS đã được sử dụng rộng rãi trong đánh giá chất lượng sản phẩm mô hình dự báo, đặc biệt là sản phẩm dự báo mưa, mưa đá [20, 24, 38].

Các sản phẩm dự báo kích thước mưa đá từ mô hình được “nhị phân hóa” về hai ngưỡng dự báo: *Xuất hiện mưa đá* ($D \geq 5\text{mm}$) và *Mưa đá lớn* ($D \geq 25\text{mm}$). Tương tự, dữ liệu MESH_radar được nhị phân hóa và nội suy về lưới tính của mô hình. Skok và Roberts (2018) chỉ ra rằng các hiện tượng hiếm có phân bố

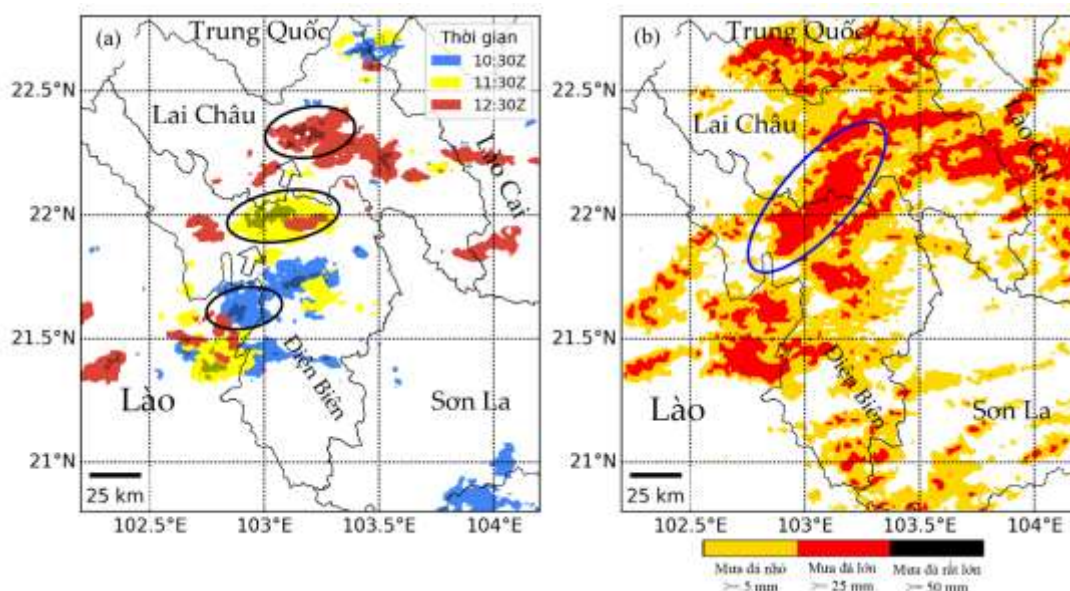
không gian ngẫu nhiên như mưa đá, điểm kỹ năng nên được xem xét, đánh giá trong phiên dự báo kéo dài 24 giờ [39].

3. Kết quả

3.1. Khả năng dự báo mưa đá của mô hình số

Trận mưa đá lớn nhất được báo cáo xảy ra từ 18h00, kéo dài khoảng 20 phút tại khu vực huyện Nậm Pồ (cũ), tỉnh Điện Biên (Hình 1). Theo dõi tiến trình thời gian của ổ dông trên dữ liệu radar,

ổ dông bắt đầu phát triển từ khoảng 17h30 trên khu vực biên giới Việt - Lào, di chuyển theo hướng Bắc Đông Bắc, thể hiện rõ trên Hình 2a. Ngoài ra, báo cáo cho thấy mưa đá còn xuất hiện ở Lai Châu, Lào Cai trưa cùng ngày. Hình 2b thể hiện giá trị MESH_radar trong 24 giờ từ 07 giờ ngày 21/03/2021 cho thấy sản phẩm MESH_radar thể hiện rõ hai vệt mưa đá chính cùng nhiều dải mưa đá rời rạc chưa được ghi nhận thông tin. Kích thước hạt từ MESH_radar tương đối phù hợp với các báo cáo đường kính từ 25 - 30 mm trên vệt mưa đá chính, nhưng lại không kích thước ở vệt mưa đá thứ hai.



Hình 2. Sản phẩm quan trắc từ radar Pha Đin cho a) Độ phản hồi vô tuyến tổng hợp 35 (màu nhạt) và 50 (màu đậm) dBZ tại các thời điểm 17h30 (xanh), 18h30 (vàng) và 19h30 (đỏ) ngày 21/03/2021, b) MESH_radar cực đại theo ba ngưỡng kích thước từ 07h00 ngày 21/03 đến 07h00 ngày 22/03/2021.

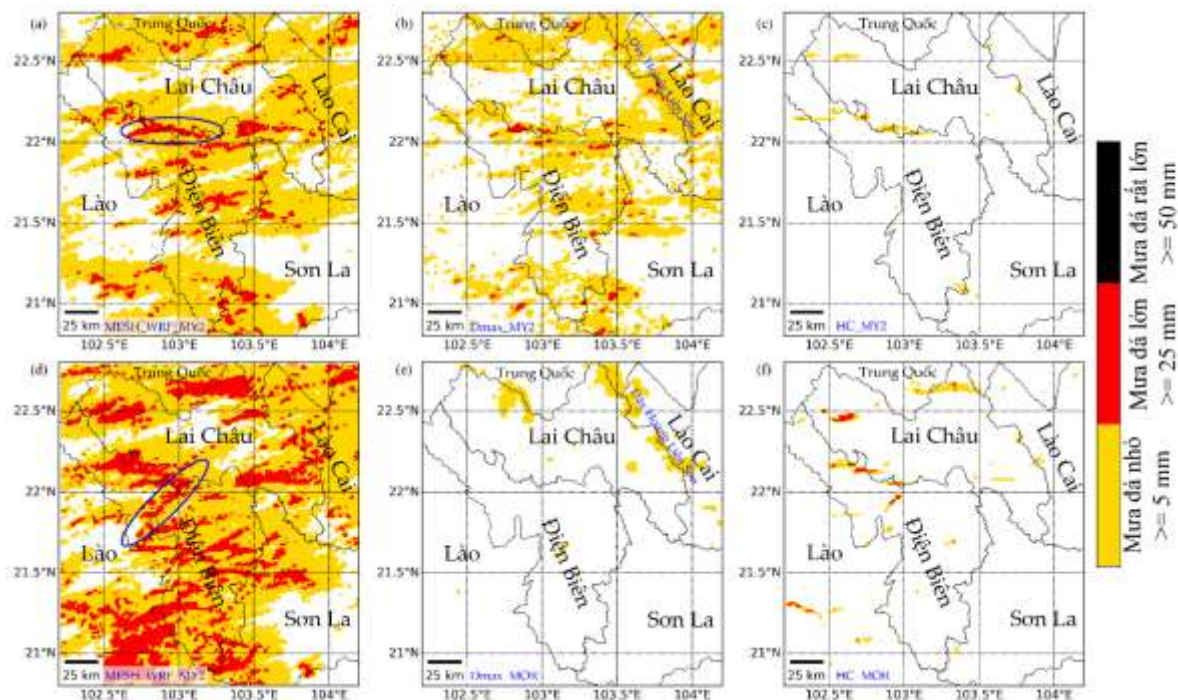
Hình 3 thể hiện các biến dự báo của mô hình dưới dạng phân ngưỡng cường độ mưa đá. Nhìn chung, khả năng dự báo mưa đá của biến HC tương đối kém ở cả hai sơ đồ vi vật lý, trong khi MESH_WRF có xu thế dự báo không diện xảy ra mưa đá. Đầu tiên, MESH_WRF dự báo mưa đá trải rộng trên các tỉnh Điện Biên, Lai Châu và một phần tỉnh Lào Cai (Hình 3a, d). Các vệt mưa đá có quỹ đạo chủ yếu theo hướng tây nam - đông bắc và từ tây sang đông, khá tương đồng

với vị trí hai vệt mưa đá chính được phát hiện bằng radar (Hình 2b). Trong hai sơ đồ vi vật lý, MY2 cho các vệt mưa đá hẹp hơn so với MOR. MESH_WRF_MOR dự báo không diện mưa đá lớn nhiều hơn so với MY2 cũng như MESH_radar với nhiều vệt ở phía tây nam và tây bắc miền tỉnh. MESH_WRF dự báo không nhiều khi nhận diện cả các ổ dông yếu là các vùng xảy ra mưa đá.

Xem xét dự báo của Thuật toán Thompson, D_{max} có khả năng dự báo diện xảy ra mưa đá nhưng chưa thể dự báo diện mưa đá lớn (Hình 3b, e). D_{max_MY2} dự báo mưa đá trên diện tương đối rộng, các vệt mưa đá ngắn xuất hiện chủ yếu theo phương đông - tây. Đối với MOR, D_{max} không có khả năng dự báo khi chỉ xuất hiện một số vùng có mưa đá (Hình 3e). Đáng chú ý, D_{max} cho mưa đá trên khu vực dãy Hoàng Liên Sơn ở cả hai sơ đồ. Lớp dưới cùng của mô hình ở khu vực Hoàng Liên Sơn có độ cao tương đối lớn dẫn tới kích thước hạt ở sát bề mặt lớn, có thể là nguyên nhân gây ra điểm đặc

biệt này. Đây là một điểm yếu của Thuật toán Thompson khi thực hiện dự báo mưa đá trên khu vực địa hình phức tạp.

Sản phẩm từ mô hình Hailcast không có khả năng dự báo mưa đá ở cả hai sơ đồ MP. HC xuất hiện rời rạc theo một số vệt hướng đông - tây trên tỉnh Lai Châu (Hình 3c, f). Mô hình Hailcast sử dụng điều kiện vận tốc thẳng đứng lớn hơn 10 m/s trong tối thiểu 15 phút làm điều kiện kích hoạt và duy trì sự phát triển của mưa đá [9], trong khi hầu hết các ô đồng trong nghiên cứu chưa thỏa mãn điều kiện này.



Hình 3. Các sản phẩm dự báo mưa đá theo ba ngưỡng kích thước từ 07h00 ngày 21/03 đến 07h00 ngày 22/03/2025 của a) MESH_WRF_MY2, b) D_{max_MY2} , c) HC_MY2, d) MESH_WRF_MOR, e) D_{max_MOR} và f) HC_MOR. Đường oval màu xanh thể hiện vị trí ổ đồng cường độ lớn nhất của mỗi trường hợp.

3.2. Điểm kỹ năng không gian của sản phẩm dự báo mưa đá

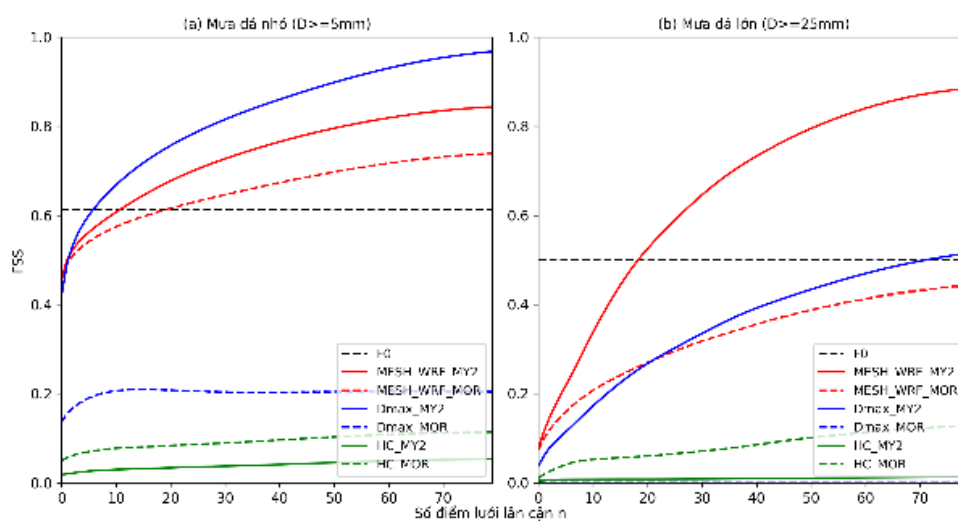
Đánh giá khả năng dự báo bằng điểm kỹ năng FSS cho trường hợp nghiên cứu này được chỉ ra trong Hình 4. Xem xét diện xảy ra mưa đá (ngưỡng kích thước $D \geq 5$ mm), tại số điểm lân cận $n = 0$, MESH_WRF có điểm kỹ năng cao

nhất ở cả hai sơ đồ MP, sau đó tới D_{max_MY2} (Hình 4a). Diện tích quan trắc mưa đá MESH_radar chiếm khoảng 40% diện tích miền tính xem xét (Hình 2b), dẫn tới kỹ năng dự báo điểm của MESH_WRF và D_{max_MY2} tốt. Khi tăng bán kính lân cận n , điểm kỹ năng của D_{max_MY2} đạt tới ngưỡng kỹ năng dự báo F_0 nhanh nhất ở $n = 8$, tương đương 12 km.

MESH_WRF cũng đạt ngưỡng kỹ năng sớm ở $n = 12$ với MY2 và $n = 20$ với MOR. Dmax_MOR và HC ở cả hai sơ đồ đều có FSS không đạt ngưỡng kỹ năng F_0 ở bất kỳ bán kính lân cận nào do diện dự báo quá nhỏ so với diện quan trắc. Ở các bán kính lân cận lớn hơn, Dmax_MY2 vẫn có điểm kỹ năng FSS cao nhất (đường màu xanh dương), đạt tiệm cận tới dự báo hoàn hảo.

Đối với kỹ năng dự báo diện mưa đá lớn, chỉ có MESH_WRF_MY2 cho dự báo vượt ngưỡng

kỹ năng F_0 (Hình 4b). Điều này chỉ ra khả năng dự báo diện lõi dông của sơ đồ MY2 tốt hơn so với MOR. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Luo và cs (2017) [11], khi các sơ đồ vi vật lý phức tạp hơn có thể dự báo tốt các vùng mưa đá lớn. Do diện quan trắc mưa đá lớn tương đối hẹp, các sản phẩm dự báo không về diện quá nhiều (như MESH_WRF_MOR), hoặc hầu như không dự báo được mưa đá lớn (Dmax, HC ở cả hai sơ đồ) dẫn tới điểm kỹ năng thấp ở những chỉ số này (Hình 4b).



Hình 4. Điểm kỹ năng không gian FSS 24 giờ của ba biến dự báo mưa đá cho hai ngưỡng
a) Xuất hiện mưa đá; b) Mưa đá lớn. F_0 là ngưỡng kỹ năng dự báo.

3.3. Vai trò của vi vật lý với các sản phẩm dự báo kích thước hạt mưa đá

Để giải thích ảnh hưởng của quá trình vi vật lý tới kết quả dự báo mưa đá, nghiên cứu thực hiện phân tích hai ổ dông lớn nhất từ dự báo của hai sơ đồ vi vật lý. Các ổ dông được chia làm ba giai đoạn: giai đoạn khởi đầu (INI), trong 30 phút đầu xuất hiện giá trị MESH_WRF > 5 mm; Giai đoạn trưởng thành (MAT), kéo dài trong thời gian ghi nhận vết MESH_WRF > 25 mm và mô hình Hailcast dự báo xảy ra mưa đá, thời gian khoảng 60-80 phút ở cả hai trường hợp; Giai đoạn tan rã (DIS), xem xét 30 phút sau khi kết thúc vết mưa đá lớn và Hailcast không còn dự báo mưa đá. Các đặc trưng tính toán trung bình trên

diện tích 5 điểm tính lân cận vùng dòng thẳng cực đại (6 x 6 km).

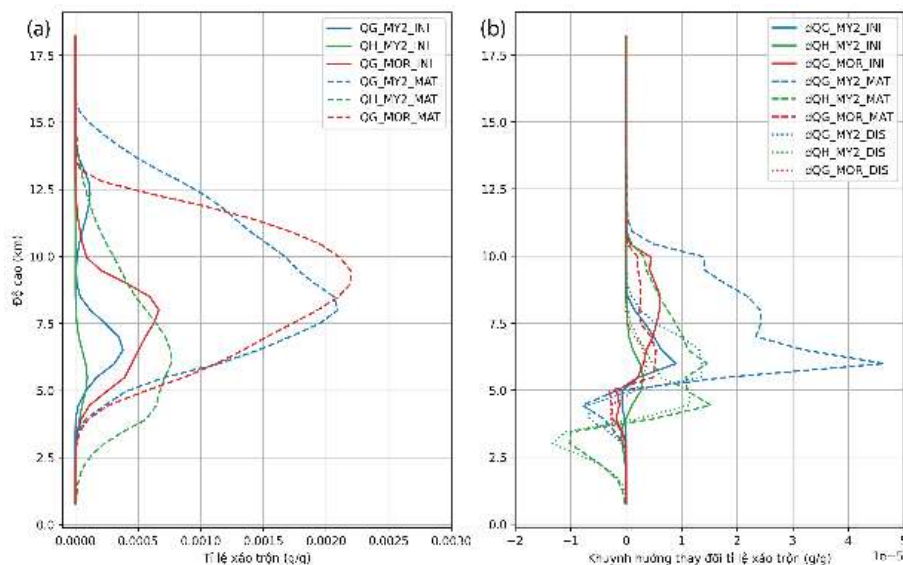
Các pha rắn của sơ đồ vi vật lý có tác động rất lớn tới kết quả dự báo của mô hình, bởi bản thân chúng có mật độ cao, thu thập lượng hơi nước lớn cũng như giải phóng ẩn nhiệt rất nhiều trong quá trình hình thành và phát triển. Phân tích tốc độ phát triển của graupel/hail ở ba giai đoạn phát triển của vùng dông mạnh gây mưa đá chỉ ra nhiều đặc trưng khác nhau của hai sơ đồ vi vật lý. Đầu tiên, tỉ số xáo trộn của pha graupel (QG) và hail (QH) của hai sơ đồ được thể hiện trên Hình 5a. Trong giai đoạn khởi đầu (đường liền), QH rất nhỏ, QG_MY2 cực đại nằm ở độ cao tương đối thấp so với QG_MOR. Ở giai đoạn trưởng thành (đường đứt dài), tỉ số xáo trộn các

pha rắn đều tăng mạnh ở cả hai sơ đồ vi vật lý. Cực đại QG đạt ở độ cao 9-10 km ở hai sơ đồ vi vật lý. QH_MY2 có tỉ số xáo trộn nhỏ hơn và có cực đại ở giữa tầng đối lưu từ 5-7 km. Tới giai đoạn tan rã (đường chấm), cả hai sơ đồ đều có cực đại tỷ hỗn hợp các pha rắn thấp hơn so với giai đoạn khởi đầu và trưởng thành do dòng giáng lớn hơn nhiều.

Xem xét khuynh hướng biến đổi của tỉ số xáo trộn các pha rắn chỉ ra nhiều thông tin có ảnh hưởng đến kết quả dự báo mưa đá. Phân tích Hình 5b, ở giai đoạn khởi đầu (đường liền), các pha rắn đều có khuynh hướng tương đối nhỏ, trong đó đáng chú ý nhất là khuynh hướng sinh graupel của MOR ở mực giữa tầng đối lưu ($dQG_MOR_INI > 0$, đường liền xanh dương). Trong giai đoạn trưởng thành, sơ đồ MY2 dự báo quá trình sinh/tan của cả hai pha đều cực kỳ mạnh mẽ (đường đứt xanh dương và xanh lá). QG_MY2 sinh nhiều nhất ở khoảng 6 km, vùng sinh graupel lên tới 11 km và vùng tan lớn trong lớp từ 3-5 km. dQH_MY2 có cực đại xuống tới sát mặt đất, ở độ cao thấp hơn so với dQG_MY2. Đối với MOR, dQG_MOR trong giai đoạn trưởng thành thay đổi không đáng kể so với giai đoạn khởi đầu, gợi ý nguồn phát sinh làm tăng

QG_MOR ở giai đoạn MAT tới từ thành phần bình lưu ngoài trung tâm ổ dông. Ở cuối vòng đời ổ dông (đường chấm), khuynh hướng sinh các pha rắn đều giảm rõ rệt, trong khi lượng tan không giảm nhiều, thậm chí tăng lên đối với dQH_MY2, làm giảm nhanh QH so với giai đoạn trưởng thành. dQG_MOR có chung xu thế với dQG_MY2 với tốc độ sinh giảm đáng kể.

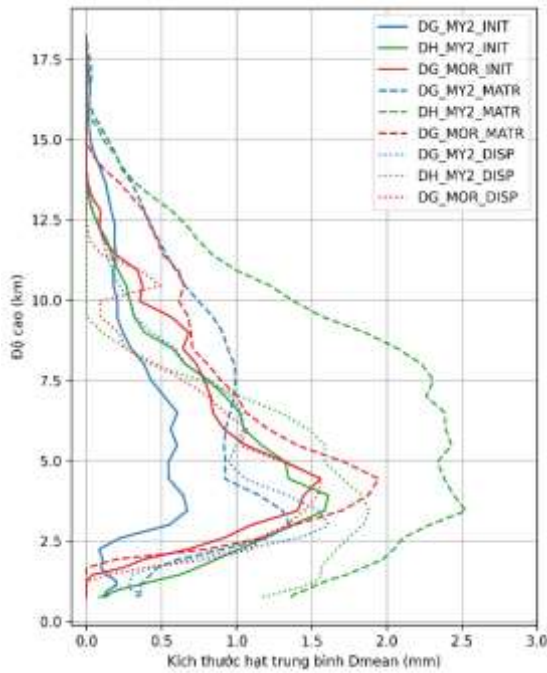
Việc giải thêm pha hail của sơ đồ MY2 dẫn tới khối lượng pha rắn tăng lên rõ rệt, tuy nhiên sản phẩm MESH_WRF_MY2 lại cho diện dự báo nhỏ hơn ở cả hai ngưỡng dự báo so với MESH_WRF_MOR (Hình 3a, c). MESH_WRF tính toán từ độ phản hồi vô tuyến, trong khi số pha và phương pháp ước lượng độ phản hồi từ thông tin các pha là khác nhau giữa các sơ đồ vi vật lý. QH_MY2 nhỏ hơn tương đối nhiều so với QG_MY2, do đó độ phản hồi vô tuyến mô phỏng cực đại của MY2 không rộng, dẫn tới MESH_WRF_MY2 dự báo diện xảy ra mưa đá lớn tương đối hẹp (miền màu đỏ, Hình 3a). Ở sơ đồ MOR, graupel là pha có mật độ lớn nhất, đóng vai trò là thành phần chính của độ phản hồi vô tuyến, dẫn tới diện dự báo của MESH_WRF_MOR rộng hơn ở cả hai ngưỡng dự báo mưa đá (Hình 3d).



Hình 5. Profile thẳng đứng của a) Tỉ số xáo trộn pha graupel (QG) và hail (QH), b) Khuynh hướng thay đổi tỉ số xáo trộn của pha graupel (dQG) và hail (dQH) cho giai đoạn khởi đầu (INI, đường liền), giai đoạn trưởng thành (MAT, đường đứt dài) và giai đoạn tan rã (DIS, đường chấm).

Từ dữ liệu thu được của các sơ đồ vi vật lý, với q_x là tỉ số xáo trộn pha x , ρ_x là mật độ của pha tương ứng, N_x là nồng độ hạt (hay số hạt trên một đơn vị khối lượng không khí), kích thước hạt trung bình D_{mean} của một pha x được tính bởi [10]:

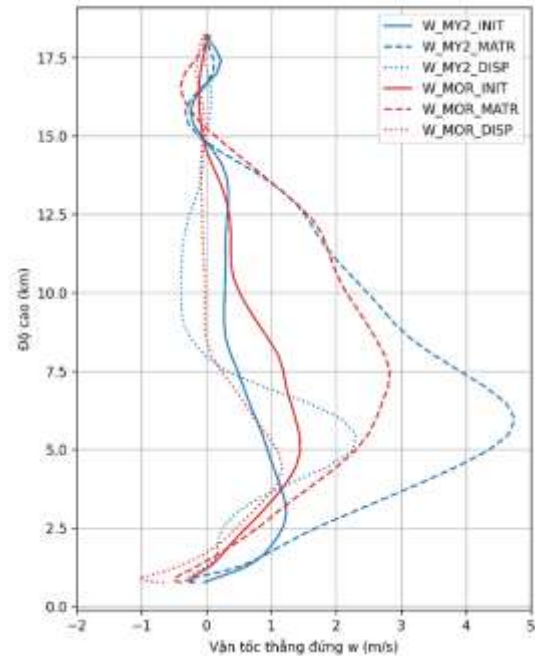
$$D_{mean,x} = \left(\frac{6q_x}{\pi N_x \rho_x} \right)^{1/3} \text{ (m)}$$



Hình 6. Tương tự Hình 5a cho kích thước hạt trung bình D_{mean} .

Phân tích kích thước hạt trung bình của các pha rắn theo độ cao chỉ ra nguyên nhân khác biệt giữa các kết quả dự báo của D_{max} . Trên Hình 6, các pha rắn có D_{mean} lớn nhất ở khoảng 4 km, thấp hơn so với độ cao tỉ số xáo trộn cực đại (khoảng 6 - 7 km trong giai đoạn khởi đầu và giai đoạn tan rã, có thể lên tới 9 - 10 km ở giai đoạn cực đại, Hình 5a). D_{mean} chỉ ra nồng độ hạt N_G và N_H ở mức thấp lớn. Kích thước hạt trung bình tăng lên tương đối rõ ở giai đoạn trưởng thành (các đường nét đứt). DH_MY2 lớn ở hầu hết các độ cao lên tới khoảng 12 km (đường đứt xanh lá). Ngược lại với tỉ số xáo trộn, DG_MY2 lại nhỏ hơn tương đối nhiều so với DH_MY2 . DH_MY2 có kích thước lớn ở độ cao thấp hơn DG_MY2 , tới sát bề mặt mặc dù lượng tan do

chuyển pha rất lớn (Hình 4b). Điều này giải thích cho giá trị D_{max_MY2} lớn hơn so với D_{max_MOR} (Hình 3b, e).



Hình 7. Profile vận tốc gió thẳng đứng trung bình của MY2 (đường xanh) và MOR (đường đỏ) cho ba giai đoạn INIT (đường liền), MATR (đường đứt dài) và DISP (đường chấm).

Phân tích vận tốc gió thẳng đứng của hai sơ đồ vi vật lý, nhìn chung sơ đồ MY2 dự báo cường độ ổ đông lớn hơn tương đối rõ so với MOR (Hình 7). Ở INI (đường liền), dòng thẳng phát triển ở nửa dưới tầng đối lưu, trong đó W_MY2 có cực đại ở 3 km, còn W_MOR có cực đại ở khoảng 5 km. MY2 chưa ghi nhận dòng giáng ở sát bề mặt và W_MY2 không phát triển theo chiều cao, trong khi W_MOR có dòng thẳng ở trên lớp biên và dòng giáng dưới 2 km, chỉ ra khả năng khu vực đông này có thể là vùng chuyển tiếp giữa giai đoạn tan rã ổ đông cũ và khởi đầu ổ đông mới. Trong giai đoạn MAT (đường đứt dài), W_MY2 có cường độ lớn hơn hẳn so với W_MOR . W_MY2 cực đại ở 5 km, phát triển mạnh lên tới 15 km. W_MOR phát triển ở độ cao tương đồng, có cực đại dòng thẳng cao hơn W_MY2 tại mức 7 km. Dưới sát bề mặt, cả hai profile đều có vùng dòng giáng gần liền

với quá trình giáng thủy mạnh. Ở đỉnh tầng đối lưu cũng ghi nhận dòng giáng yếu, khoảng 16 km do với sự tan rã, rơi xuống của các pha rắn bị dòng thăng cuốn lên. Đến giai đoạn DIS (đường chấm), cường độ dòng thăng của cả hai sơ đồ giảm nhanh. W_MOR chỉ còn dòng thăng tới 8 km, trong khi dòng giáng ở dưới 2 km tăng tương đối rõ. Đối với MY2, ở nửa trên tầng đối lưu thịnh hành dòng giáng, trong khi sát mặt đất dòng giáng không quá lớn, cho thấy ở tầng đang tan rã, trên cao tồn tại nhiều sản phẩm ngưng kết rơi xuống gây dòng giáng yếu.

Mặc dù MY2 dự báo dòng thăng lớn hơn MOR, HC_MY2 dự báo diện mưa đá lớn kém hơn HC_MOR (Hình 3b, e). Xem xét phương pháp tiếp cận của mô hình Hailcast, các thành phần rắn (graupel, hail) ít ảnh hưởng tới kết quả dự báo bởi các pha lỏng đóng vai trò chủ yếu đối với quá trình phát triển hạt mưa đá [9]. Tuy nhiên, với điều kiện dòng thăng duy trì liên tục tối thiểu 15 phút, MY2 cho ở tầng có quá trình phát triển và tan rã nhanh chóng, khó thỏa mãn điều kiện của mô hình Hailcast. Ngược lại, MOR dự báo dòng thăng duy trì trong thời gian dài hơn, dẫn tới HC_MOR có khả năng dự báo mưa đá cả ở hai ngưỡng, dù diện dự báo còn chưa tốt (Hình 3c, f).

4. Kết luận

Nghiên cứu này hướng tới thử nghiệm dự báo mưa đá trên khu vực Tây Bắc Việt Nam bằng ba biến dự báo kích thước hạt, từ sản phẩm của mô hình WRF với hai sơ đồ vi vật lý Milbrandt-Yau và Morrison. Cả hai sơ đồ đều có khả năng dự báo được thời điểm và cường độ xảy ra đợt mưa đá lớn nhất, trong đó MESH_WRF_MY2 cho dự báo tương đồng nhất với sản phẩm quan trắc MESH_radar. Về điểm kỹ năng dự báo mưa đá, sản phẩm Dmax_MY2 có điểm kỹ năng tốt nhất khi đánh giá về diện xuất hiện mưa đá, trong khi MESH_WRF_MY2 là chỉ số duy nhất đạt ngưỡng kỹ năng cho dự báo mưa đá lớn.

Phân tích một số yếu tố nhằm giải thích nguyên nhân, so sánh đặc trưng của hai sơ đồ vi vật lý, kết quả chỉ ra rằng MY2 giải nhiều pha

của nước hơn, cung cấp nhiều thông tin hơn so với sơ đồ MOR. MY2 dự báo ở tầng có dòng thăng mạnh, QH_MY2 có cực đại ở dưới thấp và QG_MY2 cực đại ở độ cao lớn hơn, cùng với tốc độ chuyển pha lớn cung cấp nguồn nhiệt động lực cho vùng đông. Kích thước hạt trung bình DH_MY2 lớn ở các lớp sát bề mặt dẫn tới sản phẩm Dmax_MY2 dự báo tốt trong trường hợp này. Ở MOR, mặc dù dòng thăng yếu hơn nhưng cả QG_MOR và DG_MOR có cực đại ở cao hơn đáng kể so với sơ đồ MY2. Những nguyên nhân này khiến các sản phẩm MESH_WRF dự báo không về diện, đặc biệt là MESH_WRF_MOR.

Do phương pháp xây dựng các sơ đồ vi vật lý tương đối khác nhau, nên rất khó để đánh giá chất lượng cũng như khuyến cáo sử dụng các sơ đồ vi vật lý cụ thể để dự báo mưa đá trên những vùng khác nhau. Mặc dù vậy, những thông tin phân tích nói trên rất đáng giá trong dự báo hiện mưa đá bằng mô hình số ở Việt Nam. Ngoài ra, nghiên cứu cũng cung cấp tiền đề về những nguyên nhân, hạn chế trong cách thức hoạt động của hai sơ đồ vi vật lý và tác động của chúng tới các sản phẩm dự báo mưa đá. Trong tương lai, nên tiếp tục có nhiều nghiên cứu hơn nữa, đặc biệt về các quá trình vi vật lý bởi tính chất phức tạp của môi trường xảy ra mưa đá ở Việt Nam.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện tại Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội. Tác giả xin trân trọng cảm ơn Bộ môn Khí tượng và Biến đổi Khí hậu đã hỗ trợ tài nguyên tính toán và các Phản biện đã có những góp ý để hoàn thiện bài báo này.

Tài liệu tham khảo

- [1] World Meteorological Organization, Hail, <https://cloudatlas.wmo.int/en/hail.html> (accessed on: August 15th, 2025).
- [2] J. T. Allen, I. M. Giammanco, M. R. Kumjian, H. J. Punge, Q. Hang, P. Groenemeijer et al., Understanding hail in the Earth system. Reviews of

- Geophysics, Vol. 58, 2020, pp. e2019RG000665, <https://doi.org/10.1029/2019RG000665>.
- [3] O. A. Martius, M. Hering, A. Kunz, S. Manzano, L. Mohr, S. Nisi, Trefalt, Challenges and Recent Advances in Hail Research, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 99, 2018, pp. ES51-ES54, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0207.1>.
 - [4] E. M. Murillo, C. R. Homeyer, Severe Hail Fall and Hailstorm Detection Using Remote Sensing Observations, *J. Appl. Meteorol Climatol*, Vol. 58, No. 5, 2019, pp. 947-970, <https://doi.org/10.1175/jamc-d-18-0247.1>.
 - [5] F. Hulton, D. M. Schultz, Climatology of Large Hail in Europe: Characteristics of the European Severe Weather Database, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 24, 2024, pp. 1079-1098, <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1079-2024>.
 - [6] J. T. Allen, M. K. Tippet, A. H. Sobel, An Empirical Model Relating U. S. Monthly Hail Occurrence to Large-scale Meteorological Environment, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, Vol. 7, 2015, pp. 226-243, <https://doi.org/10.1002/2014MS000397>.
 - [7] X. Q. Li, T. Zhang, J. Zou, H. Lin, H. Kong, Z. Ren, Climatology of Hail Frequency and Size in China, 1980-2015, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, Vol. 57, 2018, pp. 875 - 887 <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0208.1>.
 - [8] J. S. Kain, S. J. Weiss, D. R. Bright, M. E. Baldwin, J. J. Levit, G. W. Carbin, C. S. Schwartz, M. L. Weisman, K. K. Droegemeier, D. B. Weber, K. W. Thomas, Some Practical Considerations Regarding Horizontal Resolution in the First Generation of Operational Convection-allowing NWP, *Weather and Forecasting*, Vol. 23, No. 5, 2008, pp. 931-952, <https://doi.org/10.1175/WAF2007106.1>.
 - [9] R. A. Selin, C. Ziegler, Forecasting Hail using a One-dimensional Hail Growth Model within WRF, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 144, 2016, pp. 4919-4939, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0027.1>.
 - [10] J. A. Milbrandt, M. K. Yau, A Multimoment Bulk Microphysics Parameterization, Part II: A Proposed Three-Moment Closure and Scheme Description, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 62, No. 9, 2005, pp. 3065-3081, <https://doi.org/10.1175/JAS3535.1>.
 - [11] L. M. Luo, K. Xue, K. Zhu, B. Zhou, Explicit Prediction of Hail using Multimoment Microphysics Schemes for a Hailstorm of March 19th, 2014 in Eastern China, *J. Geophys. Res. Atmos.*, Vol. 122, 2017, pp. 7560-7581, <https://doi.org/10.1002/2017JD026747>.
 - [12] D. J. Gagne, A. McGovern, S. E. Haupt, R. A. Sobash, J. K. Williams, M. Xue, Storm-based Probabilistic Hail Forecasting with Machine Learning Applied to Convection-allowing Ensembles, *Weather and Forecasting*, Vol. 32, No. 5, 2017, pp. 1819- 840, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-17-0010.1>.
 - [13] D. J. Gagne II, S. E. Haupt, D. W. Nychka, D. Thompson, Interpretable Deep Learning for Spatial Analysis of Severe Hailstorms. *Monthly Weather Review*, Vol. 147, No. 8, 2019, pp. 2827-2845, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0316.1>.
 - [14] H. Morrison, J. Milbrandt, Comparison of Two-moment Bulk Microphysics Schemes in Idealized Supercell Thunderstorm Simulations, *Monthly Weather Review*, Vol. 139, No. 4, 2011, pp. 1103-1130, <https://doi.org/10.1175/2010MWR3433.1>.
 - [15] H. Morrison, M. V. L. Walqui, A. M. Fridlind, W. W. Grabowski, J. Y. Harrington, C. Hoose, et al., Confronting the Challenge of Modeling Cloud and Precipitation Microphysics, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Vol. 12, 2020, pp. e2019MS001689, <https://doi.org/10.1029/2019MS001689>.
 - [16] N. Snook, Y. Jung, J. Brotzge, B. Putnam, M. Xue, Prediction and Ensemble Forecast Verification of Hail in the Supercell Storms of May 20th, 2013, *Weather and Forecasting*, Vol. 31, No. 3, 2016, pp. 811-825.
 - [17] E. R. Mansell, C. L. Ziegler, E. C. Bruning, Simulated Electrification of a Small Thunderstorm with Two-moment Bulk Microphysics, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 67, 2010, pp. 171-194, <https://doi.org/10.1175/2009JAS2965.1>.
 - [18] J. Labriola, N. Snook, Y. Jung, M. Xue, Explicit Ensemble Prediction of Hail in May 19th, 2013 Oklahoma City Thunderstorms and Analysis of Hail Growth Processes with Several Multimoment Microphysics Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 2019.
 - [19] L. Luo, M. Xue, K. Zhu, B. Zhou, Explicit Prediction of Hail in a Long-lasting Multicellular Convective System in Eastern China using Multimoment Microphysics Schemes, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 75, No. 9, 2018, pp. 3115-3137, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0302.1>.
 - [20] J. Labriola, N. Snook, M. Xue, K. W. Thomas, Forecasting the May 08th, 2017 Severe Hail Storm in Denver, Colorado, at a Convection-allowing Resolution: Understanding Rimed Ice Treatments in Multimoment Microphysics Schemes and Their Effects on Hail Size Forecasts, *Monthly Weather Review*, Vol. 147, 2019b, pp. 3045-3068, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0319.1>.
 - [21] H. Morrison, J. A. Curry, V. I. Khvorostyanov, A New Double-Moment Microphysics

- Parameterization for Application in Cloud and Climate Models. Part I: Descriptio, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 62, No. 6, 2005, pp. 1665-1677, <https://doi.org/10.1175/JAS3446.1>.
- [22] A. Chevuturi, A. P. Dimri, U. B. Gunturu, Numerical Simulation of a Rare Winter Hailstorm Event over Delhi, India on January 17th, 2013, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 14, No. 12, 2014, pp. 3331-3344, <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3331-2014>.
- [23] H. Zhang, H. Shen, G. Zhai, Hailstorm Formation Enhanced by Meso- γ Vortices along a Low-level Convergence Line, *Journal of Meteorological Research*, Vol. 34, No. 4, 2020, pp. 679-692, <https://doi.org/10.1007/s13351-020-0030-x>.
- [24] F. Jiang, B. Chen, F. Qiao, R. Wang, C. Wei, Q. Liu, Effects of Microphysics Parameterizations on Forecasting a Severe Hailstorm of April 30th, 2021 in Eastern China, *Atmosphere*, Vol. 14, No. 3, 2023, pp. 526, <https://doi.org/10.3390/atmos14030526>.
- [25] V. B. Dam, D. M. Nguyen, M. T. Bui, Tran, T. Thuy, Pham, T. H. Yen, Tran, T. Tam, Do, V. Man, Luong, X. Thai, Nguyen, T. Anh, Tran, C. Nam, A. Hosam, A. Muehlbauer, O. Osibanjo, Using Observed Hail to Quality Extreme Hail Climate in Vietnam, Part I: Data Quality Control and Climatological Characteristics of Hail, *Journal of Climate Change Science*, No. 23, 2022, pp. 34-43, <https://doi.org/10.55659/2525-2496/23.75011>.
- [26] D. M. Duy, N. M. Truong, Numerical Reforecast of Severe Hailstorms in Eastern North Vietnam in 24–25/01/2020, *J. Hydro-Meteorol.*, Vol. 737, No. 5, 2022, pp. 1-14, [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022\(737\).1-14](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022(737).1-14).
- [27] N. V. Thang, T. B. Kien, T. D. Thuc, V. V. Thang, An Investigation into the Causes of the Hailstorm over the Nothern Vietnam from 24th to 25th January 2020, *Journal of Climate Change Science*, Vol. 13, 2020, pp. 1-10, <https://vjol.info.vn/index.php/TCKHBDKH/article/view/57843/48258> (accessed on: August 15th, 2025).
- [28] N. D. Mau, N. H. Quyen, T. M. Tri, T. T. Thuy, D. V. Man, Assessment of Maximum Hail Sizes and Their Value at a 100-Year Return Period, *Journal of Climate Change Science*, No. 27, 2023, <https://doi.org/10.55659/2525-2496/27.85954>.
- [29] D. M. Duy, N. M. Truong, N. V. Thu, H. T. T. Thuat, A Numerical Experiment on Hail Forecast: Hailstorms on March 17th, 2020 in Western North Vietnam, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, Vol. 47, No. 1, 2024, pp. 1-15, <https://doi.org/10.15625/2615-9783/21329>.
- [30] Voice of Vietnam (VOV), (March 23rd, 2020), Large Hail in Dien Bien Causes Damage to Houses and Crops, Voice of Vietnam Online Newspaper, <https://vov.vn/xa-hoi/mua-da-lon-tai-dien-bien-gay-thiet-hai-ve-nha-cua-hoa-mau-844814.vov> (accessed on: August 15th, 2025).
- [31] Vietnam Disaster and Dyke Management Authority, (March 22nd, 2021), Rapid Report of the Duty Shift on Natural Disaster Prevention and Control, <https://phongchongthientai.mard.gov.vn/Pages/bao-cai-nhanh-truc-ban-cong-tac-pctt-ngay-22-3-2021.aspx> (accessed on: August 15th, 2025).
- [32] W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J. G. Powers, M. G. Duda, D. M. Barker, X. Y. Huang, A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech, Note NCAR/TN-556+STR, 2019, pp. 145, <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97>.
- [33] National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce, 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, 2015, <https://doi.org/10.5065/D65D8PWK>.
- [34] A. Witt, M. D. Eilts, G. J. Stumpf, J. T. Johnson, E. D. Mitchell, K. W. Thomas, An Enhanced Hail Detection Algorithm for the WSR-88D, *Weather and Forecasting*, Vol. 13, No. 2, 1998, pp. 286 - 303.
- [35] E. M. Murillo, C. R. Homeyer, J. T. Allen, A 23-Year Severe Hail Climatology using GridRad MESH Observations, *Monthly Weather Review*, Vol. 149, No. 4, 2021, pp. 945-958, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-20-0178.1>.
- [36] J. Labriola, N. Snook, Y. Jung, M. Xue, Explicit Ensemble Prediction of Hail in 19 May 2013 Oklahoma City Thunderstorms and Analysis of Hail Growth Processes with Several Multimoment Microphysics Schemes, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 147, 2019b, pp. 1193-1213, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0266.1>.
- [37] N. M. Roberts, H. W. Lean, Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Monthly Weather Review*, Vol. 136, No. 1, 2008, pp. 78-97, <https://doi.org/10.1175/2007MWR2123.1>.
- [38] G. Skok, N. Roberts, Estimating the Displacement in Precipitation Forecasts using the Fractions Skill Score, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 144, 2018, pp. 414-425, <https://doi.org/10.1002/qj.3212>.