

SỞ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ TỈNH VĨNH LONG

**BÁO CÁO TÓM TẮT KẾT QUẢ THỰC HIỆN
NHIỆM VỤ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TỈNH
(NGHIÊN CỨU THIẾT LẬP HỆ THỐNG CẢNH BÁO DÔNG,
MƯA LỚN VÀ MƯA LỚN HẠN CỰC NGẮN TRÊN NỀN TẢNG
CÔNG NGHỆ SỐ CHO TỈNH TRÀ VINH, CT.KT.06-2024)**

Tổ chức chủ trì: Phân viện Khoa học Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển

Chủ nhiệm nhiệm vụ: Tiến sĩ Phạm Thanh Long

VĨNH LONG - 2026

SỞ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ TỈNH VĨNH LONG

**BÁO CÁO TÓM TẮT KẾT QUẢ THỰC HIỆN
NHIỆM VỤ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ CẤP TỈNH
(NGHIÊN CỨU THIẾT LẬP HỆ THỐNG CẢNH BÁO DÔNG,
MƯA LỚN VÀ MƯA LỚN HẠN CỰC NGẮN TRÊN NỀN TẢNG
CÔNG NGHỆ SỐ CHO TỈNH TRÀ VINH, CT.KT.06-2024)**

Chủ nhiệm nhiệm vụ



Phạm Thanh Long

**Phân viện Khoa học Khí tượng
Thủy văn, Môi trường và Biển**



Nguyễn Văn Hồng

VĨNH LONG - 2026

MỤC LỤC

MỤC LỤC.....	i
MỞ ĐẦU.....	1
THÔNG TIN VỀ NHIỆM VỤ.....	2
PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	7
CÁC KẾT QUẢ CHỦ YẾU ĐẠT ĐƯỢC	10
1. Kết quả nghiên cứu diễn biến, quy luật và nguyên nhân xảy ra dông, mưa lớn, mưa lớn hạn cực ngắn tại tỉnh Trà Vinh	10
1.1 Dữ liệu và phạm vi nghiên cứu.....	10
1.2. Đặc điểm và quy luật dông	10
1.3. Đặc điểm, quy luật mưa và mưa lớn tại tỉnh Trà Vinh	10
1.4. Các hình thể thời tiết chi phối sự xuất hiện dông	11
1.5. Các hình thể thời tiết chi phối sự xuất hiện mưa lớn.....	11
1.6. Phân tích các đợt mưa lớn điển hình.....	11
2. Kết quả xây dựng bộ cơ sở dữ liệu tích hợp đa nguồn phục vụ dự báo và cảnh báo	12
3. Kết quả xây dựng và đánh giá các mô hình dự báo dông hạn 1 – 2 ngày và mưa lớn hạn 1–3 ngày.....	15
3.1. Xây dựng chỉ tiêu cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn từ sản phẩm radar.....	15
3.2. Kết quả xây dựng và đánh giá mô hình dự báo dông hạn 1–2 ngày	16
3.3. Kết quả xây dựng và đánh giá mô hình dự báo mưa lớn hạn 1–3 ngày ...	17
4. Bộ công cụ dự báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh	19
4.1. Mục tiêu xây dựng bộ công cụ.....	19
4.2. Cấu trúc tổng thể của bộ công cụ.....	19
4.3. Công cụ cảnh báo hạn cực ngắn (0–3 giờ)	19

4.4. Công cụ dự báo dông hạn 1–2 ngày	20
4.5. Công cụ dự báo mưa lớn hạn 1–3 ngày	20
5.6. Quy trình vận hành tự động	20
4.7. Tích hợp hệ thống thông tin địa lý (GIS).....	21
4.8. Cài đặt và triển khai hệ thống	21
4.9. Đánh giá hiệu quả hoạt động	21
4.10. Khả năng ứng dụng thực tiễn.....	22
5. Xây dựng cổng thông tin và ứng dụng cảnh báo trên nền tảng số	22
5.1. Mục tiêu xây dựng hệ thống số.....	22
5.2. Kiến trúc tổng thể hệ thống.....	23
5.3. Cổng thông tin điện tử	23
5.4. Ứng dụng di động	25
5.5. Hệ thống Backend.....	25
5.6. Thử nghiệm và hiệu chỉnh	26
5.7. Tập huấn, chuyển giao và khả năng ứng dụng	26
6. Kết quả đề xuất các giải pháp cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn tại Trà Vinh	27
6.1. Cơ sở đề xuất giải pháp.....	27
6.2. Nhóm giải pháp về kỹ thuật – công nghệ	27
6.3. Truyền phát thông tin.....	28
6.4. Giải pháp về nguồn lực và quản lý	29
6.5. Hợp tác trong nước và quốc tế.....	30
TÁC ĐỘNG CỦA KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU	32
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	34

MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu gia tăng, các hiện tượng dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn ngày càng diễn biến phức tạp, gây rủi ro cao đối với khu vực ven biển Đồng bằng sông Cửu Long. Khu vực nghiên cứu của đề tài là địa bàn tỉnh Trà Vinh theo đơn vị hành chính trước sáp nhập (nay thuộc tỉnh Vĩnh Long mới), vùng có địa hình thấp, chịu ảnh hưởng mạnh của gió mùa và nước biển dâng, thường xuyên xảy ra dông và mưa lớn gây thiệt hại về hạ tầng, sản xuất và đời sống dân sinh.

Đề tài được triển khai trên cơ sở Quyết định số 1213/QĐ-UBND ngày 18/7/2024 của Chủ tịch UBND tỉnh Trà Vinh về việc phê duyệt nhiệm vụ khoa học và công nghệ cấp tỉnh và Hợp đồng đặt hàng thực hiện nhiệm vụ KH&CN năm 2024–2025 giữa Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Trà Vinh và Phân viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu.

Mục tiêu của đề tài là xây dựng cơ sở dữ liệu đồng bộ; phân tích đặc điểm dông, mưa lớn; xác định ngưỡng cảnh báo từ sản phẩm radar; ứng dụng mô hình số trị; và phát triển hệ thống cảnh báo sớm trên nền tảng công nghệ số cho khu vực Trà Vinh.

Kết quả nghiên cứu góp phần hiện đại hóa công tác dự báo, cảnh báo khí tượng thủy văn tại địa phương, nâng cao năng lực phòng chống thiên tai và có khả năng nhân rộng cho các tỉnh ven biển Đồng bằng sông Cửu Long.

THÔNG TIN VỀ NHIỆM VỤ

Tên nhiệm vụ: Nghiên cứu thiết lập hệ thống cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn trên nền tảng công nghệ số cho tỉnh Trà Vinh

Hợp đồng nhiệm vụ: Hợp đồng thực hiện đề tài khoa học và công nghệ số 24/HĐ-SKHCN ký ngày 27 tháng 9 năm 2024 giữa Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Trà Vinh (Bên đặt hàng) và Phân viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu nay là Phân viện Khoa học Khí tượng Thủy văn, Môi trường và Biển (Bên nhận đặt hàng).

Thời hạn thực hiện:

18 tháng (từ tháng 27/9/2024 đến tháng 26/03/2026).

Mục tiêu của đề tài

a. Mục tiêu tổng quát

Xây dựng cơ sở dữ liệu, đánh giá diễn biến dông, mưa lớn, mưa lớn hạn cực ngắn nhằm thiết lập hệ thống cảnh báo trên nền tảng công nghệ số và đề xuất giải pháp cảnh báo dông, mưa lớn, mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh.

b. Mục tiêu cụ thể

- Xây dựng được cơ sở dữ liệu về dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh.
- Đánh giá diễn biến dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn trên địa bàn tỉnh Trà Vinh.
- Thiết lập bộ công cụ dự báo cho dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh.
- Xây dựng 02 mô hình dự báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh.
- Xây dựng hệ thống công thông tin điện tử cung cấp thông tin cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh.

- Đề xuất giải pháp cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh.

Các nội dung chính đã thực hiện:

Nội dung 1: Biên tập, xử lý, chuẩn hóa bộ cơ sở dữ liệu phục vụ nghiên cứu.

Nội dung 2: Nghiên cứu, phân tích, đánh giá diễn biến, quy luật và nguyên nhân xảy ra dông, mưa lớn, mưa lớn hạn cực ngắn tại tỉnh Trà Vinh.

Nội dung 3: Xây dựng các mô hình dự báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn

Nội dung 4: Bộ công cụ dự báo cho dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh

Nội dung 5: Đề xuất các giải pháp cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn tại tỉnh Trà Vinh

Nội dung 6: Xây dựng Cổng thông tin quản lý cơ sở dữ liệu và cung cấp thông tin cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh

Nội dung 7: Tổ chức Hội thảo khoa học và Tập huấn chuyển giao kết quả đề tài

Danh mục sản phẩm đạt được:

a. Sản phẩm dạng I: Bài báo; Sách chuyên khảo và các sản phẩm khác

STT	Tên bài báo	Tạp chí công bố	Hiện trạng
1	Thử nghiệm dự báo dông sử dụng chỉ số khí quyển từ mô hình WRF tại khu vực đông nam tỉnh Vĩnh Long	Tạp chí Khoa học Biến đổi khí hậu ISSN: 2525-2496	Đã công bố trong số 37 (2026): https://doi.org/10.55659/2525-2496/37.136152
2	Thử nghiệm dự báo mưa lớn bằng mô hình WRF tại khu	VNUHCM Journal of	Bài báo đã xuất bản

	vực đông nam tỉnh Vĩnh Long	Environment and Earth Sciences (Tập chí Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh - Môi trường và các Khoa học Trái đất) ISSN: 2588-1078	DOI: 10.32508/vnuhcmj-ees.v10i1.850
3	Characteristics of Lightning Activity in Southeastern Vinh Long Province, Southern Vietnam, during 2021–2023	مجلة فيزيك زمين و فضا Journal of the Earth and Space Physics ISSN: 2538-3906	Bài báo đã xuất bản DOI: 10.22059/jesphys.2026.406029.1007737

b. Sản phẩm dạng II

TT	Tên sản phẩm	Yêu cầu khoa học	Số lượng	Tự đánh giá
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1	Báo cáo tổng hợp kết quả đề tài (<i>bao gồm báo cáo chính và báo cáo tóm tắt</i>)	Đảm bảo tính khoa học, có tính ứng dụng thực tiễn, phù hợp với điều kiện dự báo, cảnh báo của tỉnh Trà Vinh	01 bộ	Hoàn thành
2	Báo cáo nghiên cứu, phân tích, đánh giá diễn biến, quy luật và nguyên nhân xảy ra dông, mưa lớn, mưa lớn hạn cực ngắn tại tỉnh Trà Vinh.	- Đánh giá được diễn biến, quy luật và nguyên nhân xảy ra dông, mưa lớn, mưa lớn hạn cực ngắn tại tỉnh Trà Vinh. - Làm cơ sở phục vụ công tác cảnh báo dông, mưa lớn	01 báo cáo	Hoàn thành

		và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh.		
3	Bộ cơ sở dữ liệu về dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn trên địa bàn tỉnh Trà Vinh.	Bộ cơ sở dữ liệu được tổng hợp từ dữ liệu thu thập ở nội dung 1, có tích hợp dữ liệu của tỉnh và dữ liệu quốc gia	01 bộ	Hoàn thành
4	Bộ công cụ dự báo cho dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn (thấp nhất 24 giờ).	Có độ chính xác cao hơn so với công cụ dự báo hiện tại, có bản đồ số tỷ lệ 1:5000 đến cấp xã, có bộ tiêu chí đánh giá	02 bộ	Hoàn thành
5	02 mô hình dự báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn	Có báo cáo đánh giá kết quả thử nghiệm.	02 mô hình	Hoàn thành
6	Cổng thông tin điện tử cung cấp thông tin cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn	Cổng thông tin quản lý cơ sở dữ liệu và cung cấp thông tin cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh. Lưu trữ các nội dung nghiên cứu của đề tài.	01 cổng thông tin điện tử, 01 website, 02 mobile app	Hoàn thành
7	Tài liệu hướng dẫn tập huấn chuyển giao công nghệ dự báo và công cụ phục vụ dự báo.	Dễ hiểu, dễ sử dụng trong công tác dự báo	01 bộ	Hoàn thành
8	Báo cáo các giải pháp cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn.	Dữ liệu báo cáo đầy đủ khách quan về các giải pháp cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn.	01 báo cáo	Hoàn thành

c. Sản phẩm đào tạo

Xác nhận của Khoa Môi trường – Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP.HCM học viên Hồ Nguyễn Khoa Đăng, cao học ngành Kỹ thuật môi trường (Khóa 6 – đợt 3 năm 2025), được giao thực hiện luận văn theo Quyết định số 853/QĐ-TĐHTPHCM ngày 20/10/2025 với đề tài về mô phỏng và dự báo xâm nhập mặn trên sông Hậu và sông Mỹ Thanh, dưới sự hướng dẫn của TS. Cán Thu Văn và PGS.TS. Lê Hoàng Nghiêm.

Trong quá trình thực hiện, học viên có kế thừa một phần dữ liệu và phương pháp phân tích từ nhiệm vụ KH&CN cấp tỉnh về hệ thống cảnh báo dông, mưa lớn cho tỉnh Trà Vinh (HĐ số 24/HĐ-SKH&CN ngày 27/09/2024), phục vụ xây dựng đầu vào cho mô hình mô phỏng xâm nhập mặn.

Học viên vừa bảo vệ thành công luận văn Thạc sĩ ngày 07/06/2026, hiện đang hoàn thành các thủ tục sau bảo vệ luận văn.

PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Tại Chương 2 của báo cáo tổng kết đã xác định phạm vi nghiên cứu là khu vực tỉnh Trà Vinh (trước sáp nhập, nay thuộc phía Đông Nam tỉnh Vĩnh Long), với trọng tâm là các hiện tượng dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn. Phạm vi thời gian phân tích chuỗi số liệu dài hạn 1994–2023, trong đó giai đoạn 2014–2023 được khai thác chi tiết để xây dựng và kiểm định mô hình. Hệ thống dự báo tập trung vào ba cấp thời hạn: cảnh báo cực ngắn 0–3 giờ, dự báo dông 1–2 ngày và dự báo mưa lớn 1–3 ngày.

Đối tượng nghiên cứu gồm dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn. Cách tiếp cận mang tính tích hợp, xem xét mối liên hệ giữa hoàn lưu quy mô lớn và quá trình đối lưu cục bộ.

Hệ thống dữ liệu được xây dựng theo hướng tích hợp đa nguồn, bao gồm: số liệu khí tượng dài hạn tại các trạm (Càng Long, Trà Vinh, Tiểu Cần, Trà Cú, Bến Giá), dữ liệu synoptic và hoàn lưu các mực khí quyển, ảnh vệ tinh Himawari-8, dữ liệu định vị sét ENTLN, số liệu thám không Tân Sơn Nhất và đầu ra mô hình số trị WRF. Toàn bộ dữ liệu được chuẩn hóa, đồng bộ không gian – thời gian và tổ chức thành cơ sở dữ liệu tập trung phục vụ phân tích và huấn luyện mô hình AI.

Về phương pháp, nghiên cứu kết hợp:

(1) Phân tích thống kê khí hậu

Sử dụng chuỗi số liệu 1994–2023 để tính tần suất, trung bình, phương sai, hệ số biến suất và xu thế tuyến tính của mưa và số ngày dông. Các ngưỡng mưa ≥ 50 mm/24h, ≥ 100 mm/24h và mưa ≥ 20 mm/giờ được phân tích theo phân bố tần suất và phân vị để xây dựng tiêu chí cảnh báo đặc trưng cho địa phương. Xu thế được kiểm định ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95%.

(2) Phân tích hình thể synoptic và môi trường tiền dông

Phân tích bản đồ thời tiết mặt đất và các mực 850, 700, 500, 200 hPa nhằm nhận diện cơ chế hoàn lưu gây mưa (gió mùa, rãnh thấp, bão, hội tụ gió). Tính toán

các chỉ số bất ổn khí quyển (CAPE, CIN, K Index, Total Totals, Lifted Index, Boyden Index) từ số liệu thám không và trường mô hình để đánh giá điều kiện thuận lợi phát triển đối lưu và xác định ngưỡng tiền dông.

(3) Xử lý và khai thác dữ liệu radar – vệ tinh – sét

- Dữ liệu radar được chuyển đổi định dạng, kiểm soát nhiễu và nội suy (Adaptive Barnes) để xây dựng sản phẩm CAPPI, CMAX, HMAX.
- Ngưỡng phản hồi vô tuyến được xác định theo xác suất xuất hiện dông.
- Ảnh vệ tinh Himawari-8 được sử dụng để tính nhiệt độ đỉnh mây (CTT) và tốc độ phát triển đối lưu.
- Dữ liệu định vị sét được tổng hợp theo ô lưới $0,05^\circ$ để tính mật độ sét và xây dựng chỉ thị cảnh báo cực ngắn hạn.

(4) Mô hình số trị và dự báo tổ hợp

Mô hình WRF được thiết lập với lưới lồng, độ phân giải đến 1–3 km, sử dụng điều kiện ban đầu từ GFS. Các sơ đồ vật lý (vi mô mây, lớp biên, bức xạ, đối lưu) được thử nghiệm và tối ưu. Dự báo tổ hợp được xây dựng từ nhiều chu kỳ GFS nhằm giảm bất định điều kiện ban đầu và nâng cao độ ổn định dự báo mưa 1–3 ngày.

(5) Mô hình trí tuệ nhân tạo (AI)

Xây dựng mô hình học có giám sát với tập biến đầu vào tích hợp từ radar, sét, vệ tinh và WRF. Giải quyết ba bài toán:

- Phân loại xác suất dông (nhị phân).
- Dự báo mưa hạn 0–3 giờ (hồi quy).
- Hiệu chỉnh mưa dự báo 1–3 ngày từ WRF.
- Dữ liệu được chuẩn hóa, tách tập huấn luyện – kiểm định độc lập theo thời gian.

(6) Đánh giá kỹ năng dự báo

Đối với biến liên tục: sử dụng ME và RMSE. Đối với biến nhị phân: sử dụng POD, FAR, CSI, HSS, TSS dựa trên bảng phân loại 2×2 . Việc đánh giá được thực hiện riêng cho từng thời hạn và cho hệ thống tích hợp.

(7) Xây dựng hệ thống công nghệ số

Thiết kế kiến trúc nhiều lớp gồm: thu thập dữ liệu – xử lý mô hình – cơ sở dữ liệu (PostgreSQL/PostGIS) – WebGIS – ứng dụng di động. Hệ thống tự động cập nhật dữ liệu, vận hành mô hình, phát hành bản đồ nguy cơ và gửi cảnh báo theo vị trí thời gian thực.

Quy trình nghiên cứu được thiết kế theo chuỗi khép kín từ thu thập – chuẩn hóa dữ liệu, phân tích cơ chế, xây dựng mô hình, đánh giá kỹ năng đến triển khai hệ thống cảnh báo thực tế.

CÁC KẾT QUẢ CHỦ YẾU ĐẠT ĐƯỢC

1. Kết quả nghiên cứu diễn biến, quy luật và nguyên nhân xảy ra dông, mưa lớn, mưa lớn hạn cực ngắn tại tỉnh Trà Vinh

1.1 Dữ liệu và phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng tổng hợp nhiều nguồn dữ liệu khí tượng nhằm phân tích đặc điểm và cơ chế hình thành dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn tại tỉnh Trà Vinh. Các nguồn dữ liệu chính bao gồm số liệu mưa và số ngày dông tại các trạm khí tượng giai đoạn 1994–2023, bản đồ thời tiết synop nhiều tầng khí quyển, ảnh mây vệ tinh Himawari-8 và số liệu thám không tại trạm Tân Sơn Nhất. Việc kết hợp các nguồn dữ liệu này cho phép đánh giá hiện tượng dông và mưa lớn ở nhiều quy mô khác nhau, từ quy mô khí hậu, synop đến quy mô đối lưu.

1.2. Đặc điểm và quy luật dông

Hoạt động dông tại Trà Vinh có tính mùa rõ rệt với trung bình khoảng 129 ngày dông mỗi năm, trong đó 80–90% tập trung trong mùa mưa (tháng 5–10). Biến trình năm của dông thể hiện hai cực đại vào tháng 6 và tháng 9. Theo chu kỳ ngày đêm, dông chủ yếu xuất hiện vào buổi trưa và chiều (13–17 giờ), phù hợp với cơ chế đối lưu nhiệt ban ngày. Phân tích chuỗi số liệu dài hạn cho thấy số ngày dông có xu hướng giảm nhẹ theo thời gian.

1.3. Đặc điểm, quy luật mưa và mưa lớn tại tỉnh Trà Vinh

Lượng mưa trung bình nhiều năm tại Trà Vinh đạt khoảng 1.450–1.600 mm/năm, trong đó 85–90% tập trung trong mùa mưa. Phân tích xu thế cho thấy lượng mưa năm và số ngày mưa đều có xu hướng tăng. Các hiện tượng mưa lớn xuất hiện với tần suất không cao nhưng có xu hướng gia tăng trong những năm gần đây. Chỉ số mưa cực đoan theo ngày và theo các thời đoạn ngắn (10–180 phút) đều cho thấy xu thế tăng, phản ánh sự gia tăng cường độ mưa trong thời gian ngắn và nguy cơ mưa lớn hạn cực ngắn.

1.4. Các hình thế thời tiết chi phối sự xuất hiện dông

Hoạt động dông tại Trà Vinh chủ yếu chịu ảnh hưởng của ba hình thế thời tiết chính: gió mùa Tây Nam đơn thuần; gió mùa Tây Nam kết hợp với dải hội tụ nhiệt đới hoặc rãnh thấp; và áp thấp nóng phía Tây. Trong đó, gió mùa Tây Nam là hình thế phổ biến nhất, tạo môi trường ẩm thuận lợi cho đối lưu phát triển. Khi kết hợp với các hệ thống hội tụ quy mô lớn, hoạt động dông có thể mạnh hơn và kéo dài nhiều ngày.

1.5. Các hình thế thời tiết chi phối sự xuất hiện mưa lớn

Các trận mưa lớn tại Trà Vinh chủ yếu liên quan đến gió mùa Tây Nam, gió mùa Tây Nam kết hợp với dải hội tụ nhiệt đới hoặc rãnh thấp, và các hệ thống bão hoặc áp thấp nhiệt đới trên Biển Đông. Trong đó, sự kết hợp giữa gió mùa Tây Nam và ITCZ thường gây ra các đợt mưa lớn diện rộng và kéo dài trong nửa sau mùa mưa.

1.6. Phân tích các đợt mưa lớn điển hình

Một số đợt mưa lớn điển hình trong giai đoạn gần đây được phân tích để làm rõ cơ chế hình thành mưa. Kết quả cho thấy mưa lớn tại Trà Vinh có thể hình thành do hoàn lưu quy mô lớn (ITCZ kết hợp bão và gió mùa Tây Nam), hội tụ gió tầng thấp trong môi trường ẩm sâu, hoặc nhiễu động trong đới gió Đông trên cao. Điểm chung của các trường hợp này là môi trường khí quyển có độ ẩm cao trong toàn bộ cột khí quyển.

Kết luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy hoạt động dông tại Trà Vinh có xu hướng giảm về số ngày xuất hiện, trong khi lượng mưa, số ngày mưa và cường độ mưa cực đoan có xu hướng gia tăng. Mưa trong khu vực ngày càng chịu ảnh hưởng nhiều hơn của các hệ thống thời tiết quy mô lớn như gió mùa Tây Nam, ITCZ, rãnh thấp và bão. Những đặc điểm này phản ánh sự thay đổi trong cơ chế hình thành mưa tại khu vực

và là cơ sở quan trọng cho việc nghiên cứu, xây dựng các giải pháp dự báo và cảnh báo sớm dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn tại tỉnh Trà Vinh.

2. Kết quả xây dựng bộ cơ sở dữ liệu tích hợp đa nguồn phục vụ dự báo và cảnh báo

Nghiên cứu xây dựng một hệ thống cơ sở dữ liệu tích hợp đa nguồn theo hướng tập trung (centralized research database), bảo đảm đồng bộ không gian – thời gian và tương thích giữa các nguồn dữ liệu khí tượng, viễn thám và mô hình số trị. Toàn bộ dữ liệu được quy chiếu về hệ tọa độ WGS-84, chuẩn hóa theo múi giờ UTC+7 và tổ chức theo các bước thời gian phút, giờ và ngày tùy mục đích phân tích. Cấu trúc cơ sở dữ liệu gồm sáu lớp chính: (i) dữ liệu quan trắc dài hạn; (ii) dữ liệu synoptic – hoàn lưu; (iii) dữ liệu vệ tinh và sét; (iv) dữ liệu thám không; (v) dữ liệu mô hình số trị; và (vi) bộ dữ liệu tích hợp phục vụ huấn luyện mô hình trí tuệ nhân tạo (AI). Các lớp này liên kết thông qua khóa thời gian và vị trí địa lý, cho phép phân tích chéo và truy xuất linh hoạt.

(1) Dữ liệu khí tượng quan trắc dài hạn (1994–2023)

Chuỗi số liệu 30 năm (1994–2023) bao gồm mưa ngày và số ngày dông tại các trạm Càng Long, Trà Vinh, Tiểu Cần, Trà Cú và Bến Giá. Đây là nền tảng để phân tích đặc trưng khí hậu, xu thế biến đổi và xác định ngưỡng mưa lớn (≥ 50 mm/24h; ≥ 100 mm/24h). Dữ liệu được kiểm tra chất lượng, loại bỏ giá trị dị thường, chuẩn hóa định dạng và đánh giá tính liên tục chuỗi số liệu. Phân tích không gian giữa khu vực nội đồng và ven biển giúp xây dựng ngưỡng cảnh báo theo vùng thay vì áp dụng chung cho toàn khu vực. Chuỗi dài hạn này đóng vai trò nền tảng trong xác định phân vị, tần suất vượt ngưỡng và xu thế gia tăng rủi ro khí hậu.

(2) Dữ liệu synoptic và hoàn lưu khí quyển

Dữ liệu synoptic 6 giờ/lần (00, 06, 12, 18 UTC) được khai thác tại các mực mặt đất, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa và 200 hPa. Các trường sử dụng gồm khí áp, nhiệt độ, độ ẩm, gió (u, v), độ cao địa thế vị và hội tụ – phân kỳ.

Phân tích mực thấp (850–700 hPa) tập trung vào vận chuyển ẩm và hội tụ gió; mực trung – cao (500–200 hPa) đánh giá xoáy trên cao và phân kỳ. Trên cơ sở đó, các dạng hình thể gây mưa được phân loại và gán nhãn trong cơ sở dữ liệu, tạo điều kiện cho mô hình AI học theo cơ chế gây mưa khác nhau (quy mô lớn và đối lưu cục bộ). Phân tích synoptic đóng vai trò cầu nối giữa hoàn lưu quy mô lớn và mưa đối lưu cục bộ.

(3) Dữ liệu vệ tinh và định vị sét

a) Vệ tinh Himawari-8

Dữ liệu ảnh mây từ vệ tinh Himawari-8 được sử dụng với độ phân giải thời gian 10 phút và không gian khoảng 2 km (kênh hồng ngoại). Các kênh IR, WV và VIS được khai thác để xác định nhiệt độ đỉnh mây (CTT), trường ẩm trung – cao tầng và cấu trúc mây ban ngày. Giá trị $CTT \leq -60^{\circ}\text{C}$ được xem là chỉ thị đối lưu mạnh. Chuỗi ảnh liên tiếp cho phép theo dõi tốc độ phát triển và dịch chuyển hệ thống mây, đồng thời cung cấp biến đầu vào quan trọng cho mô hình AI dự báo 0–3 giờ.

b) Dữ liệu định vị sét

Dữ liệu sét IC và CG được thu thập từ hệ thống Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN) giai đoạn 2021–2023. Dữ liệu dạng sự kiện được chuyển đổi thành lưới $0,05^{\circ}$ theo bước 10 phút hoặc 1 giờ để xây dựng trường mật độ sét (lần/ km^2 /giờ). Mật độ sét IC tăng đột ngột được xem là tín hiệu tiền dông, trong khi mật độ CG cao liên quan trực tiếp đến mưa lớn cục bộ. Dữ liệu sét được sử dụng để xây dựng ngưỡng cảnh báo và làm biến đầu vào cho mô hình AI.

(4) Dữ liệu thám không

Dữ liệu radiosonde tại trạm Tân Sơn Nhất được sử dụng 2 lần/ngày (00 và 12 UTC) để phân tích cấu trúc nhiệt – ẩm theo chiều thẳng đứng. Biểu đồ Skew-T được xây dựng nhằm đánh giá lớp ẩm tầng thấp, lớp nghịch nhiệt và độ sâu bất ổn. Các chỉ số CAPE, CIN, K Index, Total Totals và Boyden Index được tính toán để xác

định ngưỡng tiền dông đặc trưng cho khu vực. Sounding đóng vai trò cung cấp bằng chứng định lượng về điều kiện bất ổn trước khi xảy ra dông trong thời hạn 1–2 ngày.

(5) Dữ liệu mô hình số trị WRF

Mô hình Weather Research and Forecasting Model (WRF) được thiết lập với 4 miền lưới lồng (27 km → 1 km) nhằm mô phỏng đồng thời hoàn lưu quy mô lớn và đối lưu tường minh. Điều kiện ban đầu và biên lấy từ GFS của NCEP. Các sơ đồ vật lý gồm RRTMG (bức xạ), YSU (lớp biên), Thompson (vi mô mây), Noah (bề mặt đất) và Kain–Fritsch (đối lưu cho miền thô).

Từ đầu ra WRF, các trường nhiệt – ẩm – gió ba chiều, hội tụ – phân kỳ và lượng mưa được khai thác để:

- Phân tích môi trường tiền dông.
- Tính toán bản đồ CAPE, CIN và các chỉ số bất ổn theo từng pixel.
- Cung cấp trường nền cho mô hình AI.

WRF đóng vai trò nền tảng động lực trong hệ thống nghiên cứu.

(6) Dữ liệu phục vụ huấn luyện và kiểm định mô hình AI

Giai đoạn 2014–2023 (trọng tâm 2021–2023) được sử dụng xây dựng bộ dữ liệu đa biến phục vụ huấn luyện AI. Bộ dữ liệu tích hợp gồm:

- Mưa quan trắc phút/giờ.
- Mật độ sét IC, CG.
- Biến khí tượng bề mặt.
- Trường WRF nội suy về vị trí trạm.
- Các chỉ số bất ổn tính từ WRF.

Dữ liệu được kiểm tra chất lượng, đồng bộ thời gian, chuẩn hóa và chia tập huấn luyện – kiểm định độc lập theo thời gian. Mô hình AI được xây dựng cho ba mục tiêu:

1. Phân loại xác suất dông (1–2 ngày).
2. Dự báo mưa lớn 1–3 ngày (hiệu chỉnh WRF).

3. Cảnh báo mưa lớn hạn cực ngắn 0–3 giờ.

Cấu trúc hệ thống kết hợp mô hình động lực và học máy giúp tận dụng ưu điểm của cả hai phương pháp: WRF cung cấp nền tảng vật lý khí quyển, trong khi AI học đặc trưng địa phương và mối quan hệ phi tuyến, từ đó nâng cao độ chính xác và giảm cảnh báo sai.

Kết luận

Hệ thống dữ liệu nghiên cứu được xây dựng theo hướng tích hợp đa tầng từ khí hậu dài hạn, hoàn lưu quy mô lớn, môi trường nhiệt động lực, quan trắc thời gian thực đến mô hình số trị và trí tuệ nhân tạo. Cấu trúc này bảo đảm tính liên kết chặt chẽ giữa nền tảng vật lý và phân tích dữ liệu hiện đại, đồng thời đáp ứng đầy đủ yêu cầu dự báo dông (1–2 ngày), mưa lớn (1–3 ngày) và cảnh báo mưa lớn hạn cực ngắn (0–3 giờ) cho khu vực nghiên cứu.

3. Kết quả xây dựng và đánh giá các mô hình dự báo dông hạn 1 – 2 ngày và mưa lớn hạn 1–3 ngày

3.1. Xây dựng chỉ tiêu cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn từ sản phẩm radar

Nội dung này tập trung xác lập bộ chỉ tiêu cảnh báo định lượng dựa trên độ phản hồi vô tuyến (PHVT) của các sản phẩm radar thứ cấp gồm PPI, CMAX, HMAX và CAPPI. Trên cơ sở phân tích thống kê tần suất dông và cường độ mưa tương ứng với các ngưỡng phản hồi khác nhau, nghiên cứu đã làm rõ mối quan hệ định lượng giữa cấu trúc phản hồi radar và xác suất xuất hiện hiện tượng thời tiết nguy hiểm.

Đối với cảnh báo dông, kết quả cho thấy xác suất xuất hiện dông tăng rõ rệt khi PHVT vượt ngưỡng 30 dBZ và đạt mức tin cậy cao khi phản hồi lớn hơn 40 dBZ. Đặc biệt, chỉ tiêu HMAX thể hiện mối liên hệ chặt chẽ giữa độ cao đỉnh phản hồi và khả năng phát sinh dông; khi HMAX vượt 5 km, xác suất dông tăng mạnh và chiếm tỷ lệ cao nhất. Điều này phù hợp với cơ chế vật lý của mây đối lưu sâu, trong đó dòng thăng mạnh nâng hạt mây lên cao, thúc đẩy quá trình tích điện và phát sinh sét.

Trên sản phẩm CAPPI 3 km và CMAX, ngưỡng 40 dBZ được xác định là mức có độ tin cậy cao để cảnh báo dông. Từ các kết quả này, thuật toán cảnh báo dông đã được xây dựng theo hướng tích hợp đồng thời radar, dữ liệu định vị sét và quan trắc mặt đất nhằm nâng cao độ chính xác và giảm báo giả.

Đối với cảnh báo mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn, nghiên cứu xác lập mối quan hệ xác suất tích lũy giữa cường độ mưa giờ và độ phản hồi radar trong bán kính 5 km quanh trạm. Kết quả cho thấy mưa vừa (khoảng 0,7 mm/h) tương ứng phản hồi 28–30 dBZ; mưa to (khoảng 2,0 mm/h) tương ứng 30–33 dBZ; còn mưa rất to (>4,2 mm/h) thường gắn với phản hồi vượt 34–36 dBZ và HMAX trên 8 km. Các ngưỡng này tạo cơ sở định lượng cho cảnh báo 0–3 giờ. Nghiên cứu cũng xem xét quan hệ Z–R dạng phi tuyến và các phương pháp hiệu chỉnh sai lệch (MFB, RDA) nhằm cải thiện định lượng mưa từ radar. Mặc dù kỹ năng dự báo mưa cực đoan trên thế giới vẫn còn hạn chế, việc xác định bộ ngưỡng đặc trưng cho Trà Vinh đã tạo nền tảng thực tiễn cho cảnh báo ngắn hạn và cực ngắn hạn.

3.2. Kết quả xây dựng và đánh giá mô hình dự báo dông hạn 1–2 ngày

Phần tiếp theo của chương tập trung đánh giá năng lực dự báo dông của các chỉ số bất ổn và mô hình số trị. Trên cơ sở 188 trường hợp có và không có dông được gán nhãn bằng dữ liệu sét, các chỉ số kỹ năng như HSS và TSS được tính toán cho từng tham số.

Kết quả cho thấy K Index (KI) là chỉ số có hiệu quả ổn định và cao nhất ở cả hạn 1 ngày và 2 ngày, phản ánh vai trò quyết định của cấu trúc nhiệt – ẩm tầng thấp trong môi trường nhiệt đới gió mùa. CAPE và Total Totals đạt mức kỹ năng khá, song độ nhạy giảm khi kéo dài thời hạn dự báo. CIN có vai trò hỗ trợ lọc nhiễu nhưng không đủ mạnh khi sử dụng độc lập. Chỉ số Boyden thể hiện hiệu quả thấp và kém ổn định do không xét trực tiếp thành phần độ ẩm – yếu tố then chốt tại khu vực ven biển Nam Bộ.

Khi phân tích theo không gian bốn tiểu vùng dự báo, ngưỡng tối ưu của từng chỉ số cho thấy sự phụ thuộc rõ rệt vào đặc điểm địa phương. Tuy nhiên, khi kiểm chứng trên tập số liệu độc lập, kỹ năng dự báo suy giảm ở nhiều chỉ số, phản ánh hiện tượng phụ thuộc mẫu. Điều này khẳng định rằng không một chỉ số đơn lẻ nào đủ bao quát toàn bộ cơ chế hình thành dông và việc kết hợp nhiều chỉ số có bản chất vật lý bổ sung là hướng tiếp cận hợp lý.

Song song với phương pháp chỉ số, các mô hình học máy được huấn luyện và kiểm chứng độc lập. Kết quả cho thấy Random Forest và XGBoost đạt hiệu năng vượt trội so với Logistic Regression, với AUC đạt khoảng 0,88–0,91 ở hạn 1 ngày và duy trì mức 0,70–0,85 ở hạn 2 ngày tùy khu vực. Các mô hình cây quyết định thể hiện khả năng khai thác quan hệ phi tuyến giữa trường bất ổn và trạng thái dông tốt hơn mô hình tuyến tính. Tuy nhiên, kỹ năng suy giảm theo thời hạn dự báo và có sự khác biệt giữa các tiểu vùng, phản ánh tính bất định cao của môi trường đối lưu nhiệt đới.

3.3. Kết quả xây dựng và đánh giá mô hình dự báo mưa lớn hạn 1–3 ngày

Nghiên cứu tiếp tục đánh giá năng lực mô hình WRF trong mô phỏng và dự báo các đợt mưa lớn điển hình tại Trà Vinh. Hai đợt mưa tháng 10 và tháng 11/2021 được phân tích chi tiết nhằm làm rõ vai trò của trường gió tầng thấp, hội tụ ẩm và hoàn lưu synoptic.

Trong đợt 3–8/10/2021, mô hình tái hiện khá rõ quá trình tăng cường gió Đông Bắc và hình thành vùng hội tụ ẩm ven biển, dẫn đến đỉnh mưa vào ngày 5–6/10. So sánh với ERA5 cho thấy mô hình dự báo đúng xu thế thời gian và phân bố không gian của đỉnh mưa, song có xu hướng kéo dài mưa hơn thực tế ở giai đoạn cuối đợt. Ở đợt 13–18/11/2021, mưa có cường độ yếu và phân bố hẹp hơn; mô hình tái hiện đúng xu thế suy yếu nhanh của hệ thống nhưng vẫn thể hiện sự nhạy cảm với hội tụ tầng thấp.

Đánh giá sai số theo trạm cho thấy ở hạn 24 giờ, mô hình đạt độ tin cậy tương đối tốt với ME nhỏ và MAE phổ biến 5–11 mm. Khi kéo dài đến 48 và 72 giờ, MAE và RMSE tăng rõ rệt, đặc biệt tại các trạm ven biển và nơi thường xảy ra mưa cục bộ mạnh. Xu thế gia tăng sai số theo thời hạn phù hợp với đặc điểm mưa đối lưu Nam Bộ vốn có tính cục bộ cao và phụ thuộc mạnh vào tương tác đất – biển.

Khi đánh giá kỹ năng theo ngưỡng lượng mưa, mô hình thể hiện hiệu quả tốt nhất với ngưỡng ≥ 16 mm ở hạn 24 giờ, trong khi kỹ năng giảm mạnh với ngưỡng ≥ 50 mm và ở hạn 48–72 giờ. POD và CSI đều suy giảm khi ngưỡng tăng, phản ánh khó khăn trong việc tái hiện mưa cực đoan. Kết quả này cho thấy dự báo mưa rất to và cực đoan vẫn là thách thức lớn, đòi hỏi kết hợp thêm hiệu chỉnh sai số, dữ liệu radar và phương pháp dự báo tổ hợp.

Kết luận

Chương 4 đã xác lập được bộ chỉ tiêu cảnh báo định lượng dựa trên độ phản hồi radar đặc trưng cho Trà Vinh, trong đó ngưỡng PHVT ≥ 40 dBZ và HMAX > 5 km có độ tin cậy cao đối với cảnh báo dông; mưa to và mưa rất to gắn với phản hồi 32–36 dBZ và HMAX lớn hơn 8 km. Trong dự báo hạn 1–2 ngày, KI là chỉ số nền tảng, song cần kết hợp với CAPE và TT để nâng cao độ ổn định. Các mô hình học máy, đặc biệt Random Forest và XGBoost, cho thấy tiềm năng ứng dụng cao với kỹ năng vượt trội so với mô hình tuyến tính. Đối với mưa lớn, mô hình WRF đạt hiệu quả tốt nhất ở hạn 24 giờ và ngưỡng mưa vừa, trong khi kỹ năng giảm rõ ở mưa cực đoan và hạn dài hơn.

Tổng thể, chương đã chứng minh tính khả thi của chiến lược kết hợp đa nguồn gồm radar, mô hình số trị, chỉ số bất ổn và học máy, tạo nền tảng vững chắc cho hệ thống cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn phục vụ thực tiễn tại tỉnh Trà Vinh.

4. Bộ công cụ dự báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn cho tỉnh Trà Vinh

4.1. Mục tiêu xây dựng bộ công cụ

Chương 5 trình bày quá trình xây dựng một bộ công cụ dự báo – cảnh báo tích hợp đa nguồn dữ liệu và có mức độ tự động hóa cao, phục vụ trực tiếp công tác nghiệp vụ tại Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Trà Vinh. Trong bối cảnh các hiện tượng dông và mưa lớn ngày càng có xu hướng cực đoan và phức tạp, bộ công cụ được thiết kế nhằm thu thập, xử lý và đồng bộ dữ liệu từ mô hình số trị, radar thời tiết, ảnh vệ tinh và các trạm quan trắc mặt đất; tính toán chỉ số bất ổn khí quyển; xác lập ngưỡng cảnh báo định lượng; và cung cấp sản phẩm dự báo chi tiết đến cấp xã.

Hệ thống không chỉ hỗ trợ dự báo viên ra quyết định thông qua các sản phẩm trực quan mà còn tích hợp WebGIS và ứng dụng di động để truyền phát cảnh báo sớm đến chính quyền và người dân. Toàn bộ kiến trúc được xây dựng theo hướng mở, linh hoạt, phù hợp với điều kiện hạ tầng công nghệ thông tin tại địa phương và có khả năng mở rộng trong tương lai.

4.2. Cấu trúc tổng thể của bộ công cụ

Bộ công cụ được tổ chức thành ba nhóm chức năng tương ứng với các thời hạn dự báo khác nhau, bao phủ toàn bộ chuỗi cảnh báo từ cực ngắn hạn đến ngắn hạn.

4.3. Công cụ cảnh báo hạn cực ngắn (0–3 giờ)

Nhóm công cụ này khai thác dữ liệu radar thời tiết thời gian thực, tự động phân tích độ phản hồi vô tuyến, so sánh với các ngưỡng đã địa phương hóa và phân cấp mức độ mưa. Hệ thống sử dụng thuật toán theo dõi và ngoại suy chuyên động vùng mưa để dự báo vị trí và phạm vi ảnh hưởng trong 0–3 giờ tiếp theo.

Phần mềm được xây dựng trên nền tảng Python, tự động thu nhận dữ liệu quan trắc và radar qua API, lưu trữ trong cơ sở dữ liệu và kết xuất sản phẩm dự báo theo điểm (trung tâm các xã) và theo trường không gian. Hệ thống vận hành theo cơ chế

timer, cập nhật liên tục và giảm thiểu thao tác thủ công. Đây là hợp phần có hiệu quả cao nhất trong cảnh báo nhanh mưa dông nguy hiểm.

4.4. Công cụ dự báo dông hạn 1–2 ngày

Công cụ này khai thác trường dự báo từ mô hình Weather Research and Forecasting Model (WRF) kết hợp tính toán các chỉ số bất ổn như CAPE, CIN, KI, TT và Boyden nhằm xác định môi trường thuận lợi cho dông.

Kết quả được tổng hợp thành bản đồ xác suất dông theo từng đơn vị hành chính và xuất dưới định dạng JSON để tích hợp trực tiếp lên WebGIS. Hệ thống vận hành tự động, đồng thời sử dụng dữ liệu radar định dạng .nc để hỗ trợ kiểm chứng và hiệu chỉnh. Nhờ tích hợp mô hình động lực và học máy, công cụ này nâng cao khả năng phát hiện môi trường tiền dông so với phương pháp nhận định truyền thống.

4.5. Công cụ dự báo mưa lớn hạn 1–3 ngày

Nhóm công cụ này phục vụ dự báo định lượng mưa ngắn đến trung hạn, khai thác sản phẩm mô hình toàn cầu và WRF thông qua API. Hệ thống tự động hiệu chỉnh sai số theo đặc điểm địa phương, phân loại mưa theo các cấp (mưa vừa, to, rất to) và xuất sản phẩm dưới dạng bản đồ phân bố không gian cùng bảng số liệu chi tiết theo điểm.

Chương trình được xây dựng bằng Python, cập nhật dữ liệu mỗi giờ và ghi đè kết quả mới nhằm bảo đảm thông tin luôn được làm mới theo thời gian gần thực. Cơ chế này giúp giảm sai số định lượng mưa và hỗ trợ hiệu quả công tác phát hành bản tin.

5.6. Quy trình vận hành tự động

Hệ thống được thiết kế theo quy trình khép kín: tự động thu nhận dữ liệu đầu vào → kiểm tra và chuẩn hóa → tính toán chỉ số và so sánh ngưỡng cảnh báo → tạo sản phẩm đầu ra → đồng bộ lên WebGIS và ứng dụng di động.

Bộ công cụ có thể vận hành ở chế độ bán tự động (có kiểm tra của dự báo viên) hoặc tự động hoàn toàn trong các tình huống khẩn cấp. Quy trình này bảo đảm tính liên tục, giảm thao tác thủ công và rút ngắn thời gian xử lý nghiệp vụ.

4.7. Tích hợp hệ thống thông tin địa lý (GIS)

Hệ thống được tích hợp WebGIS nhằm trực quan hóa kết quả dự báo trên bản đồ số đa lớp. Dữ liệu không gian được chuyển sang định dạng GeoJSON với đầy đủ tọa độ và thuộc tính (lượng mưa, cấp cảnh báo, xác suất dông).

Người sử dụng có thể truy vấn theo khu vực, bật/tắt lớp dữ liệu và xuất bản đồ phục vụ biên soạn bản tin. Kiến trúc đa lớp cho phép tích hợp thêm các lớp dân cư, hạ tầng và vùng sản xuất, tăng giá trị ứng dụng trong quản lý rủi ro thiên tai.

4.8. Cài đặt và triển khai hệ thống

Bộ công cụ có thể triển khai trên môi trường Windows hoặc Linux, sử dụng Apache, PHP và MySQL; khuyến nghị cài đặt thông qua XAMPP để đơn giản hóa cấu hình.

Mã nguồn được triển khai trong thư mục máy chủ cục bộ, cơ sở dữ liệu MySQL được cấu hình qua phpMyAdmin và nhập từ tệp travinh.sql. Sau khi hoàn tất, hệ thống sẵn sàng kết nối và vận hành trên cổng thông tin Web.

Ứng dụng di động được cung cấp thông qua mã QR, cho phép người dân đăng ký nhận cảnh báo theo vị trí địa lý, mở rộng phạm vi truyền tin và nâng cao hiệu quả cảnh báo sớm.

4.9. Đánh giá hiệu quả hoạt động

Kết quả thử nghiệm trong các đợt mưa lớn điển hình cho thấy:

- Cảnh báo hạn cực ngắn 0–3 giờ đạt hiệu quả cao nhất trong 1–2 giờ đầu, giảm đáng kể tình trạng cảnh báo chậm.
- Dự báo dông 1–2 ngày cải thiện khả năng nhận diện môi trường thuận lợi cho dông.

- Dự báo mưa lớn 1–3 ngày sau hiệu chỉnh sai số giúp giảm chênh lệch giữa dự báo và thực đo, đặc biệt với mưa cường độ trung bình đến lớn.

Tổng thể, hệ thống nâng cao chất lượng dự báo so với công cụ truyền thống, rút ngắn thời gian xử lý và tăng mức độ tự động hóa.

4.10. Khả năng ứng dụng thực tiễn

Bộ công cụ phù hợp với điều kiện hạ tầng tại Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Trà Vinh, không yêu cầu máy chủ chuyên dụng phức tạp và có thể triển khai linh hoạt theo từng giai đoạn đầu tư.

Ngoài phạm vi Trà Vinh, hệ thống có thể mở rộng cho các tỉnh ven biển Đồng bằng sông Cửu Long có đặc điểm khí hậu tương đồng. Kiến trúc mô-đun hóa cho phép cập nhật tham số, điều chỉnh ngưỡng và nâng cấp thuật toán theo sự thay đổi khí hậu và yêu cầu nghiệp vụ.

Kết luận

Nội dung này đã xây dựng thành công một bộ công cụ dự báo – cảnh báo tích hợp đa nguồn dữ liệu và công nghệ số, bao phủ đầy đủ các thời hạn từ 0–3 giờ đến 1–3 ngày. Hệ thống kết hợp radar, mô hình số trị, chỉ số bất ổn và học máy trong một quy trình vận hành tự động, đồng bộ với WebGIS và ứng dụng di động.

Kết quả thử nghiệm cho thấy bộ công cụ nâng cao rõ rệt độ chính xác cảnh báo hạn cực ngắn, cải thiện kỹ năng dự báo dông và giảm sai số định lượng mưa. Đây là bước chuyển quan trọng từ mô hình nghiệp vụ truyền thống sang hệ thống cảnh báo số tích hợp dựa trên dữ liệu và công nghệ, góp phần hiện đại hóa công tác dự báo và nâng cao năng lực ứng phó thiên tai tại địa phương.

5. Xây dựng cổng thông tin và ứng dụng cảnh báo trên nền tảng số

5.1. Mục tiêu xây dựng hệ thống số

Nội dung này tập trung xây dựng một nền tảng số tích hợp nhằm hiện đại hóa công tác theo dõi, dự báo và cảnh báo dông, mưa lớn tại Trà Vinh. Hệ thống hướng tới hình thành một cơ sở dữ liệu tập trung, đồng bộ và cập nhật theo thời gian thực,

cho phép lưu trữ, quản lý và khai thác dữ liệu từ radar, trạm mưa tự động, mô hình dự báo số và dữ liệu GIS.

Hệ thống không chỉ phục vụ cán bộ chuyên môn trong phân tích và phát hành cảnh báo mà còn mở rộng khả năng tiếp cận thông tin cho người dân thông qua nền tảng web và thiết bị di động. Việc thiết kế chú trọng tính ổn định, bảo mật và phù hợp với hạ tầng công nghệ thông tin hiện có tại địa phương, đồng thời bảo đảm khả năng mở rộng lâu dài.

5.2. Kiến trúc tổng thể hệ thống

Hệ thống được xây dựng theo mô hình kiến trúc ba lớp gồm:

Lớp dữ liệu (Data Layer): lưu trữ tập trung dữ liệu radar, mưa tự động, mô hình dự báo, GIS và dữ liệu cảnh báo; có cơ chế sao lưu định kỳ bảo đảm an toàn thông tin.

Lớp xử lý (Processing Layer): thực hiện tính toán chỉ số dông, xác định ngưỡng mưa lớn, tích hợp dự báo tổ hợp và sinh bản đồ cảnh báo; toàn bộ thuật toán được tự động hóa để bảo đảm tốc độ và độ chính xác.

Lớp hiển thị (Presentation Layer): cung cấp giao diện tương tác qua cổng thông tin điện tử và ứng dụng di động trên Android và iOS.

Kiến trúc phân lớp giúp hệ thống linh hoạt, dễ mở rộng, bảo trì và nâng cấp.

5.3. Cổng thông tin điện tử

Cổng thông tin điện tử đóng vai trò trung tâm quản lý và công bố dữ liệu dự báo – cảnh báo.

Chức năng quản trị

Hệ thống cung cấp bảng điều khiển trung tâm (Dashboard) hiển thị thông tin thời tiết theo thời gian thực như nhiệt độ, độ ẩm, điểm sương, gió, lượng mưa và chỉ số UV. Biểu đồ nhiệt độ trong ngày hỗ trợ theo dõi xu thế biến đổi và nhận diện sớm điều kiện tiền dông.

Hệ thống tích hợp module theo dõi giông sét và radar trên nền GIS, cho phép giám sát trực quan hoạt động đối lưu và ước lượng hướng di chuyển vùng dông. Chức năng quản lý bản tin hỗ trợ tạo, ký xác nhận và phát hành bản tin cảnh báo có kiểm soát; toàn bộ lịch sử bản tin được lưu trữ tập trung để tra cứu và đánh giá lại chất lượng cảnh báo.

Cơ chế phân quyền tài khoản và quản lý menu giúp bảo đảm an toàn thông tin, kiểm soát truy cập và tạo tính linh hoạt trong cấu hình hệ thống.

Hiển thị dữ liệu dự báo

Cổng thông tin cung cấp:

Dự báo ngắn hạn 0–24 giờ theo giờ.

Biểu đồ biến thiên nhiệt độ – độ ẩm trong ngày.

Dự báo trung hạn 10 ngày.

Biểu đồ xu thế nhiệt độ nhiều ngày.

Chức năng tra cứu và xuất dữ liệu theo khu vực và thời gian.

Cách tổ chức hiển thị giúp chuyển dữ liệu kỹ thuật thành sản phẩm trực quan, dễ hiểu, phục vụ cả cán bộ chuyên môn và cộng đồng.

Tích hợp GIS

Hệ thống sử dụng nền tảng bản đồ số Leaflet kết hợp OpenStreetMap/Mapbox để trực quan hóa dữ liệu không gian đến cấp xã. Người dùng có thể bật/tắt các lớp dữ liệu như radar mưa, giông sét, nhiệt độ, chỉ số UV và mưa cực đoan.

Việc tích hợp GIS nâng cao khả năng phân tích không gian và hỗ trợ ra quyết định nhanh trong công tác phòng chống thiên tai.

5.4. Ứng dụng di động

Ứng dụng được phát triển trên cả Android và iOS, tích hợp dữ liệu backend và định vị GPS để cung cấp thông tin theo vị trí người dùng.

Phiên bản Android

Ứng dụng cung cấp:

Dự báo thời tiết hiện tại và theo giờ.

Dự báo 7 ngày.

Biểu đồ xu thế nhiệt độ 24 giờ.

Cảnh báo thời tiết nguy hiểm theo thời gian thực với thay đổi màu nền theo cấp độ rủi ro.

Bản tin tổng hợp có chức năng đọc bằng giọng nói.

Tính năng thông báo đẩy (push notification) giúp người dân nhận cảnh báo ngay khi vượt ngưỡng nguy hiểm.

Phiên bản iOS

Phiên bản iOS có đầy đủ chức năng tương đương Android, được tối ưu theo tiêu chuẩn giao diện của hệ điều hành Apple, bảo đảm trải nghiệm mượt mà và đồng bộ dữ liệu theo thời gian thực.

5.5. Hệ thống Backend

Backend đóng vai trò trung tâm vận hành, thực hiện:

Thu thập và đồng bộ dữ liệu radar, trạm mưa tự động, mô hình số và quan trắc khí tượng.

Chuẩn hóa, kiểm tra chất lượng và lưu trữ dữ liệu.

Cung cấp API cho WebGIS và ứng dụng di động.

Gửi thông báo cảnh báo theo ngưỡng thiết lập.

Cơ chế tự động hóa giúp giảm thao tác thủ công, nâng cao tính kịp thời và bảo đảm hệ thống hoạt động ổn định ngay cả khi có nhiều người truy cập đồng thời.

5.6. Thử nghiệm và hiệu chỉnh

Hệ thống được kiểm tra toàn diện về khả năng kết nối, đồng bộ dữ liệu, tốc độ xử lý và khả năng chịu tải. Kết quả thử nghiệm cho thấy:

Thời gian cập nhật dữ liệu đáp ứng yêu cầu gần thời gian thực.

Hệ thống duy trì ổn định khi nhiều người dùng truy cập đồng thời.

Các lỗi kỹ thuật được phát hiện và khắc phục trước khi vận hành chính thức.

5.7. Tập huấn, chuyển giao và khả năng ứng dụng

Đề tài đã tổ chức tập huấn cho cán bộ địa phương về khai thác sản phẩm radar, mô hình số, quản trị hệ thống và phát hành cảnh báo. Toàn bộ mã nguồn, dữ liệu và quy trình vận hành chuẩn (SOP) được chuyển giao cho các đơn vị tiếp nhận như Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh và Ban Chỉ huy Phòng chống thiên tai.

Hệ thống được đánh giá có tính khả thi cao, phù hợp với điều kiện hạ tầng địa phương và có thể mở rộng cho các tỉnh ven biển Đồng bằng sông Cửu Long. Việc tích hợp radar – mô hình số – AI – WebGIS – ứng dụng di động tạo nên một nền tảng cảnh báo số hoàn chỉnh, sẵn sàng phục vụ thực tiễn.

Kết luận

Nội dung này đã xây dựng thành công một hệ thống công thông tin điện tử và ứng dụng cảnh báo trên nền tảng số, vận hành theo kiến trúc ba lớp, tích hợp đa nguồn dữ liệu và tự động hóa cao. Hệ thống không chỉ nâng cao năng lực phân tích và phát hành cảnh báo của cơ quan chuyên môn mà còn mở rộng khả năng tiếp cận thông tin đến người dân thông qua web và ứng dụng di động.

Đây là bước chuyển quan trọng từ mô hình dự báo truyền thống sang hệ thống cảnh báo số tích hợp, phù hợp với định hướng chuyển đổi số và góp phần nâng cao hiệu quả phòng chống thiên tai tại Trà Vinh trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng.

6. Kết quả đề xuất các giải pháp cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn tại Trà Vinh

6.1. Cơ sở đề xuất giải pháp

Cơ sở đề xuất giải pháp được xây dựng trên nền tảng tổng hợp các kết quả nghiên cứu khí hậu nhiều năm, phân tích thực nghiệm ngưỡng radar địa phương hóa, đánh giá kỹ năng các chỉ số bất ổn và mô hình dự báo số, cùng với kết quả triển khai thử nghiệm hệ thống cảnh báo số tích hợp tại tỉnh Trà Vinh. Phân tích số liệu giai đoạn 1994–2023 cho thấy dông xuất hiện với tần suất cao, trung bình khoảng 129 ngày/năm, tập trung vào mùa mưa và cao điểm trong khung giờ 14–15 giờ; trong khi xu thế mưa cường độ lớn và cực đoan có dấu hiệu gia tăng, đặc biệt với các ngưỡng ≥ 50 mm. Bộ ngưỡng radar đặc trưng ($C_{MAX} \geq 40$ dBZ; $CAPPI\ 3\ km \geq 40$ dBZ; $H_{MAX} > 5$ km) cho phép xây dựng quy trình cảnh báo cực ngắn hạn định lượng, thay thế dần phương pháp nhận định chủ quan. Các chỉ số KI, CAPE và mô hình Random Forest (AUC xấp xỉ 0,90 ở hạn 1 ngày) cho thấy tiềm năng cao trong dự báo dông hạn ngắn, trong khi mô hình WRF còn tồn tại sai số ở hạn 48–72 giờ đối với mưa lớn. Đồng thời, hệ thống tích hợp radar – mô hình – AI – WebGIS – ứng dụng di động đã được thử nghiệm thành công, tạo nền tảng kỹ thuật sẵn sàng cho triển khai thực tế. Trên cơ sở đó, các giải pháp được định hướng theo mục tiêu nâng cao độ chính xác cảnh báo 0–3 giờ, cải thiện dự báo hạn 1–2 ngày, giảm sai số mưa lớn và rút ngắn thời gian truyền phát thông tin đến người dân thông qua nền tảng số.

6.2. Nhóm giải pháp về kỹ thuật – công nghệ

Ngắn hạn

- Giải pháp công nghệ 1: Triển khai mạng trạm đo mưa tự động mật độ cao (ARGs trọng điểm)

- Giải pháp công nghệ 2: Xây dựng hệ thống cảnh báo đa kênh tự động (SMS – Zalo – Ứng dụng di động) tích hợp Nowcasting
- Giải pháp công nghệ 3: Tích hợp và khai thác dữ liệu radar – vệ tinh từ Trung ương phục vụ cảnh báo 0–3 giờ

Trung hạn

- Giải pháp công nghệ 4: Đầu tư radar thời tiết X-band tầm ngắn phục vụ cảnh báo cực ngắn hạn cho Trà Vinh
- Giải pháp công nghệ 5: Phát triển hệ thống WebGIS cảnh báo nâng cao, phân vùng rủi ro đến cấp xã/phường

Dài hạn

- Giải pháp công nghệ 6: Xây dựng hệ thống radar phủ toàn tỉnh và kết nối mạng radar vùng Đồng bằng sông Cửu Long
- Giải pháp công nghệ 7: Ứng dụng AI/ML nâng cao kết hợp dữ liệu kinh tế – xã hội để lập bản đồ rủi ro chi tiết
- Giải pháp công nghệ 8: Xây dựng hệ thống cảnh báo đa thiên tai (Multi-hazard Early Warning System)

6.3. Truyền phát thông tin

Ngắn hạn

- Giải pháp thông tin 1: Nâng cấp hệ thống loa truyền thanh cơ sở kết nối trực tiếp Đài KTTV tỉnh
- Giải pháp thông tin 2: Hệ thống tin nhắn cảnh báo tự động theo cấp độ rủi ro (Xanh – Vàng – Cam – Đỏ)
- Giải pháp thông tin 3: Triển khai WebGIS cảnh báo đơn giản trên Cổng thông tin tỉnh

Trung hạn

- Giải pháp thông tin 4: Xây dựng ứng dụng di động chính thức cảnh báo thiên tai Trà Vinh

- Giải pháp thông tin 5: Thiết lập cơ chế ưu tiên gửi cảnh báo qua nhà mạng (SMS ưu tiên / Cell Broadcast)
- Giải pháp thông tin 6: Lắp đặt bảng điện tử LED cảnh báo tại khu đông dân cư và trường học

Dài hạn

- Giải pháp truyền thông 7: Xây dựng nền tảng cảnh báo hợp nhất (WebGIS + App + AI Chatbot + Mạng xã hội)
- Giải pháp truyền thông 8: Tích hợp hệ thống cảnh báo vào nền tảng đô thị thông minh (Smart City)

6.4. Giải pháp về nguồn lực và quản lý

Ngắn hạn

- Giải pháp nguồn lực 1: Đào tạo cán bộ tỉnh và xã về vận hành hệ thống cảnh báo và thiết bị đo mưa tự động
- Giải pháp nguồn lực 2: Xây dựng Quy trình vận hành chuẩn (SOP) cho cảnh báo cực ngắn hạn
- Giải pháp nguồn lực 3: Phân công rõ vai trò giữa các đơn vị theo mô hình “Kỹ thuật – Quản lý – Ứng phó”

Trung hạn

- Giải pháp nguồn lực 4: Thành lập Tổ công tác liên ngành vận hành hệ thống cảnh báo
- Giải pháp nguồn lực 5: Bố trí ngân sách thường niên cho bảo trì thiết bị và nâng cấp phần mềm
- Giải pháp nguồn lực 6: Đào tạo nâng cao về AI, dữ liệu lớn và WebGIS

Dài hạn

- Giải pháp nguồn lực 7: Thành lập Trung tâm Cảnh báo số cấp tỉnh vận hành

24/7

- Giải pháp nguồn lực 8: Đưa kỹ năng ứng phó mưa dông cực đoan vào chương trình giáo dục địa phương

6.5. Hợp tác trong nước và quốc tế

Ngắn hạn

- Giải pháp hợp tác 1: Tăng cường phối hợp với Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy văn Quốc gia và Đài Khí tượng Thủy văn Nam Bộ
- Giải pháp hợp tác 2: Liên kết với các doanh nghiệp viễn thông (VNPT, Viettel, MobiFone)
- Giải pháp hợp tác 3: Phối hợp truyền thông với Đài PT-TH và các tổ chức đoàn thể
- Giải pháp hợp tác 4: Hợp tác nghiên cứu với Đại học Trà Vinh và Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu
- Giải pháp hợp tác 5: Tham gia mạng lưới khu vực ASEAN – WMO

Trung hạn

- Giải pháp hợp tác 6: Chia sẻ dữ liệu vùng Đồng bằng sông Cửu Long
- Giải pháp hợp tác 7: Hợp tác kỹ thuật với Japan Meteorological Agency và China Meteorological Administration
- Giải pháp hợp tác 8: Huy động nguồn lực ODA (JICA, UNDP, GIZ)
- Giải pháp hợp tác 9: Phát triển mô hình hợp tác công – tư (PPP)
- Giải pháp hợp tác 10: Hợp tác đào tạo chuyên sâu quốc tế về AI và dự báo số trị

Dài hạn

- Giải pháp hợp tác 11: Thiết lập cơ chế điều phối dữ liệu vùng Đồng bằng sông Cửu Long ở cấp chiến lược

- Giải pháp hợp tác 12: Tham gia chương trình chuyển giao công nghệ radar – vệ tinh ở cấp hệ thống
- Giải pháp hợp tác 13: Xây dựng dự án ODA tích hợp hạ tầng – công nghệ – đào tạo
- Giải pháp hợp tác 14: Hình thành hệ sinh thái công nghệ cảnh báo theo mô hình PPP
- Giải pháp hợp tác 15: Phát triển chương trình đào tạo và trao đổi chuyên gia quốc tế dài hạn.

TÁC ĐỘNG CỦA KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Kết quả của nhiệm vụ đã tạo ra tác động rõ rệt và lâu dài đối với công tác điều tra cơ bản và quản lý nhà nước trong lĩnh vực khí tượng thủy văn, phòng chống thiên tai và quản lý tài nguyên – môi trường tại địa phương. Trước hết, việc xây dựng bộ cơ sở dữ liệu tích hợp đa nguồn về dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn đã bổ sung một nền tảng dữ liệu chuẩn hóa, đồng bộ và có tính hệ thống cho khu vực Trà Vinh (cũ). Đây là cơ sở quan trọng phục vụ điều tra cơ bản về đặc điểm khí hậu, xu thế biến đổi mưa cực đoan và đánh giá tác động của biến đổi khí hậu ở quy mô tỉnh. Dữ liệu được tổ chức trên nền tảng số, có khả năng cập nhật và mở rộng, góp phần chuyển đổi từ hình thức lưu trữ rời rạc sang quản lý tập trung, liên thông và có thể khai thác đa mục đích.

Về mặt quản lý nhà nước, hệ thống cảnh báo được xây dựng trong khuôn khổ đề tài đã cung cấp công cụ hỗ trợ ra quyết định dựa trên cơ sở khoa học và định lượng, thay thế dần phương thức dự báo và cảnh báo chủ yếu dựa vào kinh nghiệm. Các bản đồ cảnh báo chi tiết đến cấp xã giúp cơ quan quản lý chủ động trong chỉ đạo, điều hành ứng phó thiên tai, đặc biệt đối với các hiện tượng mưa lớn hạn cực ngắn có diễn biến nhanh và phạm vi hẹp. Việc tích hợp dữ liệu radar, vệ tinh, định vị sét và mô hình số trị vào một hệ thống thống nhất giúp nâng cao tính kịp thời, minh bạch và kiểm chứng được của bản tin cảnh báo, qua đó tăng cường trách nhiệm giải trình trong hoạt động quản lý nhà nước.

Kết quả nghiên cứu cũng góp phần hỗ trợ xây dựng và cập nhật các kịch bản rủi ro thiên tai, phục vụ quy hoạch sử dụng đất, quy hoạch hạ tầng kỹ thuật, sản xuất nông nghiệp và nuôi trồng thủy sản – những lĩnh vực chịu tác động trực tiếp của mưa lớn và dông. Việc xác định xu thế gia tăng mưa cường suất lớn trong thời đoạn ngắn là cơ sở để các cơ quan quản lý xem xét điều chỉnh tiêu chuẩn thiết kế thoát nước đô thị, công trình thủy lợi và hạ tầng giao thông phù hợp với điều kiện khí hậu hiện nay.

Bên cạnh đó, việc xây dựng cổng thông tin và ứng dụng di động phục vụ cảnh báo đã góp phần hiện đại hóa phương thức cung cấp thông tin trong quản lý tài nguyên và môi trường, thúc đẩy chuyển đổi số trong lĩnh vực khí tượng thủy văn cấp tỉnh. Hệ thống cho phép kết nối giữa cơ quan chuyên môn, chính quyền các cấp và người dân, tăng cường sự tham gia của cộng đồng trong phòng chống thiên tai, phù hợp với định hướng quản lý rủi ro thiên tai dựa vào cộng đồng.

Tổng thể, kết quả của nhiệm vụ không chỉ nâng cao chất lượng điều tra cơ bản về đặc điểm khí hậu cực đoan tại địa phương mà còn góp phần đổi mới phương thức quản lý nhà nước theo hướng hiện đại, dựa trên dữ liệu, công nghệ số và công cụ định lượng. Đây là bước chuyển quan trọng trong quá trình tăng cường năng lực thích ứng với biến đổi khí hậu và quản lý bền vững tài nguyên – môi trường tại địa phương.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

KẾT LUẬN

Đề tài đã nghiên cứu một cách toàn diện đặc điểm dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn trên địa bàn khu vực Trà Vinh cũ (nay thuộc tỉnh Vĩnh Long) thông qua việc tích hợp và khai thác đồng bộ các nguồn dữ liệu khí tượng thủy văn hiện đại, bao gồm số liệu quan trắc dài hạn giai đoạn 1994–2023, dữ liệu radar thời tiết, dữ liệu định vị sét, ảnh vệ tinh, dữ liệu thám không, mô hình số trị WRF và các phương pháp trí tuệ nhân tạo. Kết quả nghiên cứu đã làm rõ đặc điểm phân bố không gian, thời gian của dông và mưa lớn, đồng thời cho thấy xu hướng gia tăng các trận mưa cường độ lớn trong thời gian ngắn, làm gia tăng nguy cơ ngập úng cục bộ và các tác động bất lợi do thiên tai gây ra.

Trên cơ sở phân tích dữ liệu radar và số liệu quan trắc thực tế, đề tài đã xây dựng và kiểm định thành công bộ chỉ tiêu cảnh báo mưa lớn hạn cực ngắn, trong đó các ngưỡng phản hồi vô tuyến đặc trưng như $C_{MAX} \geq 40$ dBZ, $CAPPI\ 3\ km \geq 40$ dBZ và $H_{MAX} > 5\ km$ cho thấy hiệu quả tốt trong nhận diện các trường hợp mưa lớn và dông mạnh. Đồng thời, nghiên cứu đã đánh giá khả năng ứng dụng của các chỉ số bất ổn khí quyển như KI, CAPE, CIN, TT và Boyden trong dự báo dông hạn 1–2 ngày, làm cơ sở xây dựng các ngưỡng cảnh báo phù hợp với điều kiện địa phương.

Đề tài cũng đã xây dựng và đánh giá các mô hình học máy phục vụ dự báo dông và mưa lớn. Kết quả cho thấy mô hình Random Forest đạt chất lượng dự báo tốt với AUC xấp xỉ 0,90 đối với dự báo dông hạn 1 ngày, trong khi việc kết hợp dữ liệu mô hình số trị với dữ liệu quan trắc thực tế giúp cải thiện đáng kể chất lượng dự báo mưa lớn so với các phương pháp truyền thống. Đối với mô hình WRF, kết quả mô phỏng cho thấy chất lượng dự báo tốt trong hạn 24 giờ và là nguồn dữ liệu nền quan trọng cho các mô hình hiệu chỉnh và tổ hợp dự báo.

Một trong những kết quả nổi bật của đề tài là xây dựng thành công bộ công cụ dự báo và cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn trên nền tảng công nghệ số. Hệ thống tích hợp dữ liệu radar, mô hình số trị, học máy, WebGIS và ứng dụng di động, cho phép tự động hóa quá trình thu nhận dữ liệu, xử lý, dự báo và phát hành cảnh báo theo thời gian gần thực. Các sản phẩm đầu ra được hiển thị trực quan trên nền bản đồ số chi tiết đến cấp xã, hỗ trợ hiệu quả cho công tác dự báo, cảnh báo thiên tai và ra quyết định của cơ quan quản lý.

Đề tài đã hoàn thành đầy đủ các nội dung nghiên cứu và sản phẩm theo thuyết minh được phê duyệt; đồng thời công bố 02 bài báo khoa học và tham gia đào tạo 01 học viên cao học, góp phần nâng cao năng lực nghiên cứu và ứng dụng công nghệ trong lĩnh vực khí tượng thủy văn tại địa phương.

KIẾN NGHỊ

Để bảo đảm kết quả nghiên cứu được khai thác hiệu quả, vận hành ổn định và phát huy giá trị lâu dài trong công tác phòng chống thiên tai, đề nghị Ủy ban nhân dân tỉnh Vĩnh Long xem xét đưa Hệ thống dự báo, cảnh báo dông, mưa lớn và mưa lớn hạn cực ngắn vào kế hoạch chuyển đổi số, phòng chống thiên tai và phát triển hạ tầng dữ liệu số của tỉnh giai đoạn 2026–2030.

Hệ thống được đề xuất triển khai trên hạ tầng công nghệ thông tin hiện có của tỉnh hoặc tích hợp trực tiếp với Trung tâm Điều hành thông minh (IOC) tỉnh Vĩnh Long thông qua Trục tích hợp dữ liệu của tỉnh. Dữ liệu dự báo, cảnh báo được quản lý tập trung tại máy chủ dữ liệu trung tâm, đồng thời kết nối và chia sẻ với các cơ sở dữ liệu chuyên ngành nhằm phục vụ công tác chỉ đạo, điều hành và hỗ trợ ra quyết định theo thời gian thực.

Đề nghị giao Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Vĩnh Long làm đơn vị đầu mối chuyên môn tiếp nhận và vận hành hệ thống. Đơn vị này có trách nhiệm quản trị cơ sở dữ liệu, giám sát hoạt động của hệ thống, kiểm tra chất lượng sản phẩm dự báo,

phối hợp với các cơ quan liên quan trong quá trình khai thác và sử dụng kết quả dự báo phục vụ công tác phòng chống thiên tai trên địa bàn tỉnh.

Để bảo đảm hệ thống hoạt động ổn định sau khi chuyển giao, cần duy trì kết nối thường xuyên với các nguồn dữ liệu nghiệp vụ hiện có, bao gồm dữ liệu radar thời tiết Nhà Bè, dữ liệu quan trắc khí tượng thủy văn tự động, dữ liệu mô hình dự báo số trị và các sản phẩm dự báo chuyên ngành của ngành khí tượng thủy văn. Việc duy trì các nguồn dữ liệu này là điều kiện tiên quyết để bảo đảm tính liên tục, độ tin cậy và khả năng cập nhật của hệ thống.

Trong giai đoạn 2026–2030, cần ưu tiên đầu tư mở rộng mạng lưới quan trắc khí tượng thủy văn tự động, đặc biệt là hệ thống trạm đo mưa tự động mật độ cao tại các khu vực thường xuyên xảy ra mưa lớn, ngập úng và khu vực đô thị tập trung dân cư. Mục tiêu phấn đấu từng bước nâng mật độ trạm đo mưa tự động lên mức đáp ứng yêu cầu dự báo mưa hạn cực ngắn, qua đó nâng cao chất lượng dữ liệu đầu vào, tăng độ chính xác của các mô hình trí tuệ nhân tạo và cải thiện hiệu quả cảnh báo sớm.

Trên cơ sở kiến trúc dữ liệu mở và cơ sở dữ liệu tập trung đã được xây dựng, đề nghị tiếp tục mở rộng phạm vi ứng dụng hệ thống trên toàn tỉnh Vĩnh Long sau sáp nhập, bao gồm khu vực Vĩnh Long, Trà Vinh và Bến Tre trước đây. Việc mở rộng này cho phép tích hợp thêm các nguồn dữ liệu quan trắc, dữ liệu chuyên ngành và các hệ thống quản lý hiện có của địa phương, từng bước hình thành hệ thống dự báo, cảnh báo dông và mưa lớn quy mô toàn tỉnh phục vụ công tác phòng chống thiên tai, phát triển kinh tế - xã hội và quản lý đô thị thông minh.

Trong thời gian 12 tháng kể từ khi bàn giao sản phẩm, đơn vị chủ trì nghiên cứu tiếp tục hỗ trợ kỹ thuật, đào tạo và chuyển giao công nghệ cho đội ngũ cán bộ địa phương. Quá trình này bao gồm hướng dẫn vận hành hệ thống, quản trị cơ sở dữ liệu, xử lý sự cố kỹ thuật, cập nhật dữ liệu và hiệu chỉnh mô hình dự báo nhằm bảo

đảm đơn vị tiếp nhận có thể làm chủ công nghệ và vận hành hệ thống một cách độc lập sau khi kết thúc thời gian hỗ trợ.

Các tiêu chí đề xuất đánh giá kết quả chuyển giao và ứng dụng thực tiễn:

(i) Tiêu chí vận hành hệ thống

Hệ thống hoạt động liên tục tối thiểu 95% thời gian trong năm, số lượng truy cập dữ liệu trên cổng thông tin gia tăng, số bản tin được chia sẻ qua mạng xã hội ngày càng nhiều, tăng tính hiệu quả hệ thống. Tự động cập nhật dữ liệu đầu vào theo thời gian thực. Tự động sinh sản phẩm dự báo và cảnh báo theo chu kỳ thiết kế.

(ii) Tiêu chí về dữ liệu

Duy trì kết nối ổn định với tối thiểu 90% nguồn dữ liệu quan trắc đã tích hợp. Dữ liệu được lưu trữ tập trung, bảo đảm khả năng truy xuất và khai thác lịch sử.

(iii) Tiêu chí khai thác sử dụng

Dữ liệu dự báo được tích hợp lên IOC hoặc các hệ thống chuyên ngành của tỉnh. Các cơ quan quản lý nhà nước có thể truy cập và khai thác trực tuyến. Sản phẩm dự báo được sử dụng trong công tác theo dõi, chỉ đạo và phòng chống thiên tai.

(iv) Tiêu chí về năng lực tiếp nhận

Tối thiểu 1–2 cán bộ kỹ thuật địa phương được đào tạo và có khả năng vận hành hệ thống độc lập. Hoàn thành bộ tài liệu hướng dẫn vận hành, quản trị và bảo trì hệ thống.

(v) Tiêu chí phát triển bền vững

Có kế hoạch duy trì kinh phí vận hành hằng năm. Có phương án mở rộng dữ liệu và nâng cấp mô hình dự báo trong các giai đoạn tiếp theo. Từng bước tích hợp với hệ sinh thái dữ liệu số và chính quyền số của tỉnh.

Đề bảo đảm hệ thống hoạt động ổn định và phát huy hiệu quả lâu dài sau khi kết thúc thời gian bảo hành, hỗ trợ kỹ thuật của đơn vị thực hiện, đề nghị Ủy ban nhân dân tỉnh Vĩnh Long xem xét bố trí nguồn kinh phí thường xuyên cho công tác vận hành, bảo trì và nâng cấp hệ thống. Nguồn kinh phí này được sử dụng cho duy

trì hạ tầng máy chủ, đường truyền dữ liệu, bản quyền phần mềm, chứng thư số, khai thác dữ liệu chuyên ngành, đào tạo cán bộ vận hành, mở rộng mạng lưới quan trắc và nâng cấp các mô hình trí tuệ nhân tạo khi cần thiết. Nguồn kinh phí có thể được lồng ghép từ các chương trình chuyển đổi số, phòng chống thiên tai, phát triển chính quyền số, đô thị thông minh hoặc các nhiệm vụ chuyên môn thường xuyên của địa phương. Việc bảo đảm nguồn lực tài chính ổn định là điều kiện quan trọng để hệ thống tiếp tục được cập nhật, hoàn thiện và mở rộng, hướng tới xây dựng một nền tảng dự báo, cảnh báo thiên tai hiện đại phục vụ hiệu quả công tác quản lý nhà nước và phát triển bền vững của tỉnh Vĩnh Long.