

**TẠP CHÍ**

# **KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN**

**Vietnam Journal of Hydro - Meteorology**

**ISSN 2525 - 2208**



**TỔNG CỤC KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN**  
**Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration**

**Số 747**  
**03-2023**



## MỤC LỤC

### Bài báo khoa học



### Q. TÔNG BIÊN TẬP PGS. TS. Đoàn Quang Trí

- |                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| 1. GS. TS. Trần Hồng Thái    | 14. PGS. TS. Mai Văn Khiêm  |
| 2. GS. TS. Trần Thực         | 15. PGS. TS. Nguyễn Bá Thủy |
| 3. GS. TS. Mai Trọng Nhuận   | 16. TS. Tống Ngọc Thanh     |
| 4. GS. TS. Phan Văn Tân      | 17. TS. Đinh Thái Hưng      |
| 5. GS. TS. Nguyễn Kỳ Phùng   | 18. TS. Võ Văn Hòa          |
| 6. GS. TS. Phan Đình Tuấn    | 19. TS. Nguyễn Đắc Đồng     |
| 7. GS. TS. Nguyễn Kim Lợi    | 20. GS. TS. Kazuo Saito     |
| 8. PGS. TS. Nguyễn Văn Thắng | 21. GS. TS. Jun Matsumoto   |
| 9. PGS. TS. Dương Văn Khâm   | 22. GS. TS. Jaecheol Nam    |
| 10. PGS. TS. Dương Hồng Sơn  | 23. TS. Keunyong Song       |
| 11. TS. Hoàng Đức Cường      | 24. TS. Lars Robert Hole    |
| 12. TS. Bạch Quang Dũng      | 25. TS. Sooyoul Kim         |
| 13. PGS.TS. Đoàn Quang Trí   |                             |

### Giấy phép xuất bản

Số: 225/GP-BTTTT - Bộ Thông tin Truyền  
thông cấp ngày 08/6/2015

### Tòa soạn

Số 8 Pháo Đài Láng, Đống Đa, Hà Nội  
Điện thoại: 024.39364963  
Email: Tapchikttv@gmail.com

### Chế bản và In tại:

Công ty TNHH Đầu Tư Nông Nghiệp  
Việt Nam  
ĐT: 0243.5624399

Ảnh bìa: Trạm Quan trắc Khí tượng bề mặt Phú  
Quốc

Giá bán: 40.000 đồng

- 1** Lê Đình Quyết, Nguyễn Minh Giám, Huỳnh Minh Nhân, Trịnh Xuân Hưng, Lê Xuân Hiền, Nguyễn Thị Tuyết: Phân tích tương quan giữa mực nước quan trắc bổ sung với mực nước tại các trạm mực nước ven biển Tây Nam Bộ
- 9** Lê Thanh Quảng, La Đức Dũng, Trần Ngọc Anh: Mô phỏng và xây dựng bản đồ ngập lụt hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai
- 21** Nguyễn Minh Giám, Lê Ngọc Quyền, Nguyễn Nam Đức, Đặng Quang Thanh, Lê Đình Quyết, Nguyễn Ngọc Nguyễn, Nguyễn Thị Phương Chi: Những nguyên nhân chính tác động đến ngập Thành phố Hồ Chí Minh
- 37** Đặng Hoàng Lam, Nguyễn Phước Định, Nguyễn Văn Sỹ: Xây dựng Phương án dự báo xâm nhập mặn trên các sông chính của tỉnh Bến Tre
- 54** Đinh Thị Việt Hà: Đánh giá xu thế biến đổi mưa, nhiệt độ tỉnh Kiên Giang
- 70** Đỗ Hồng Hoạt, Lê Ngọc Quyền, Vũ Diệu Hồng, Nguyễn Công Thành: Xây dựng công cụ ước lượng mưa từ độ phản hồi radar bằng công nghệ AI
- 81** Lê Ngọc Quyền, Nguyễn Việt Hưng, Đỗ Tấn Long, Lê Đình Quyết, Nguyễn Phương Đông, Đặng Quang Thanh, Lê Mạnh Dũng, Nguyễn Thị Thu Thảo, Huỳnh Thị Phương Trang, Đỗ Hồng Hoạt: Nghiên cứu, xây dựng và triển khai thử nghiệm hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo tại thành phố Hồ Chí Minh
- 98** Đặng Thị Lan Anh: Nghiên cứu biến đổi của một số đặc trưng mưa trong mùa mưa khu vực Nam Bộ
- 113** Nguyễn Nam Đức, Lê Ngọc Quyền, Phạm Hồ Quốc Tuấn, Nguyễn Minh Giám, Trần Minh Triết, Trần Tiến Dũng: Ứng dụng AI trong quan trắc mực nước bằng Camera



## ĐÀI KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN KHU VỰC NAM BỘ 30 NĂM HÌNH THÀNH VÀ PHÁT TRIỂN

**T**ròn ba mươi năm trước, Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ vinh dự được thành lập theo Quyết định số 133/TTg ngày 30/3/1993 của Thủ tướng Chính phủ, trên cơ sở sáp nhập 13 Đài KTTV các tỉnh tại Nam Bộ. Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ là đơn vị đầu tiên được thành lập theo mô hình tổ chức mới của Ngành Khí tượng Thủy văn Việt Nam, với nhiều khó khăn, cơ sở vật chất còn nghèo nàn, trang thiết bị thiếu thốn, hạn chế, trình độ đội ngũ quan trắc viên không đồng đều, nơi thừa, nơi thiếu, lại hoạt động trong bối cảnh điều kiện hạ tầng cơ sở của khu vực vào thời điểm đó còn nhiều yếu kém, giao thông đi lại khó khăn, nhất là trong mùa mưa lũ.

Được sự quan tâm của Đảng và Nhà nước, chỉ đạo sát sao của Bộ Tài nguyên và Môi trường và Tổng cục Khí tượng Thủy văn, Đài đã không ngừng nỗ lực phấn đấu, khắc phục những khó khăn, hoàn thành các nhiệm vụ được giao, phục vụ kịp thời, hiệu quả công tác phòng, chống thiên tai, phát triển kinh tế - xã hội và bảo đảm quốc phòng an ninh của đất nước. Trong suốt 30 năm hoạt động, Đài đã đạt được nhiều danh hiệu thi đua, phần thưởng cao quý: Huân chương lao động hạng Ba (có từ khi còn Đài TP Hồ Chí Minh), Huân chương lao động hạng Nhì (năm 1997), Huân chương lao động hạng Nhất trong dịp kỷ niệm 10 năm thành lập (năm 2002) và nhiều lần được tặng Cờ thi đua xuất sắc của Chính phủ, Bộ Tài nguyên và Môi trường, Tổng cục Khí tượng Thủy văn.

Nhiều dự án đã được Đài triển khai nhằm nâng cao năng lực chuyên môn, với hệ thống máy móc, trang thiết bị và công nghệ đã được trang bị, nâng cấp đồng bộ gồm: Ra đa thời tiết, thám không vô tuyến, hệ thống thông tin, điện báo, quan trắc khí tượng, thủy văn, môi trường và truyền số liệu tự động, là những thiết bị, công nghệ hiện đại, tiên tiến trên thế giới. Ứng dụng công nghệ AI nâng cao chất lượng dự báo và cải tiến chất lượng công tác dự báo theo hướng định lượng hoá, tự động hoá và hiện đại hoá. Mạng lưới quan trắc, từ số ít trạm thủ công đến nay đã có 336 trạm khí tượng thủy văn, môi trường tự động. Tích hợp các mô hình dự báo số, kết hợp Rada, số liệu quan trắc tự động vào nghiệp vụ dự báo, từ đó nâng cao chất lượng dự báo bão, triển khai dự báo thời tiết điểm, nắng nóng, hạn hán đã đạt được theo yêu cầu của xã hội; đối với dự báo, cảnh báo lũ cung cấp hàng ngày cho cộng đồng với bản tin tổng hợp trượt 5 ngày cho toàn bộ 63 trạm thủy văn trên địa bàn 13 tỉnh Đồng bằng sông Cửu Long; TP Hồ Chí Minh và các khu vực đô thị ở Nam Bộ được cung cấp các bản tin dự báo, cảnh báo về triều cường, nước dâng, dự báo khí tượng thủy văn biển, đặc biệt là thời tiết biển khu vực quần đảo Trường Sa, nhà dàn ở vùng biển phía nam của Tổ quốc, góp phần bảo vệ chủ quyền biển đảo và phục vụ hiệu quả việc phát triển kinh tế biển.

Hợp tác quốc tế được Đài đẩy mạnh phát triển để nâng cao năng lực với Ủy hội sông Mê Công; Hợp tác với Đài Khí tượng Gwangju, Hàn Quốc nghiên cứu, ứng dụng thử nghiệm chỉ số AKI vào nghiệp vụ dự báo mưa cho Thành phố Hồ Chí Minh trong mùa



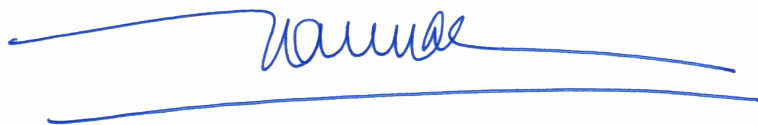
mưa 2019; Hợp tác với tổ chức quốc tế GIZ để nâng cao năng lực dự báo, cảnh báo; Phối hợp với Sở Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh trao đổi đề xuất hợp tác phát triển hệ thống dự báo thời tiết thủy văn giữa Thành phố Hồ Chí Minh và thành phố Osaka. Kết quả từ những sự hợp tác này đã góp phần giúp Đài đạt được một số thành tích quan trọng, mở ra nhiều hướng tiếp cận, phát triển trong những năm tiếp theo.

Trong nghiên cứu khoa học, từ năm 2016 đến nay với phong trào thi đua “*Đẩy mạnh ứng dụng khoa học công nghệ thực hiện dự báo cảnh báo thiên tai phục vụ cộng đồng*”, Đài đã triển khai có kết quả với: 04 đề tài cấp Bộ; 02 đề tài cấp cơ sở và 05 đề tài cấp tỉnh và nhiều sáng kiến cải tiến của các cán bộ viên chức hàng năm.

Về công tác phục vụ, Đài đã có sự liên kết, gắn liền và phối hợp để phục vụ yêu cầu phòng chống thiên tai và phát triển kinh tế ở các địa phương khu vực Nam Bộ. Thông qua đẩy mạnh tuyên truyền, Đài đã đưa các thông tin khí tượng thủy văn, bản tin cảnh báo, dự báo đến gần và phục vụ tốt người dân, công tác phục vụ được các lãnh đạo, sở ngành địa phương đánh giá rất cao thể hiện qua hỗ trợ nhiều mặt cho các Đài khí tượng thủy văn tỉnh. Bên cạnh đó, thông qua các Hội nghị tổng kết và nhận định mùa do Đài tổ chức hàng năm, các địa phương đều có sự tham gia, trao đổi, đóng góp về công tác khí tượng thủy văn.

Xác định công tác xây dựng nguồn nhân lực là nhân tố đặc biệt quan trọng, trong những năm qua, các thể hệ lãnh đạo Đài đã thường xuyên chỉ đạo tăng cường động viên, khuyến khích các cán bộ, viên chức đặc biệt là lực lượng trẻ tích cực học tập nâng cao trình độ chuyên môn, tham gia công tác nghiên cứu khoa học, qua đó tích lũy thêm được nhiều kiến thức, kinh nghiệm chuyên môn nghiệp vụ đáp ứng theo định hướng phát triển của Đài và của Ngành Khí tượng Thủy văn trong giai đoạn mới. Số lượng viên chức trình độ trung cấp được thay thế bổ sung bằng viên chức có trình độ đại học thạc sĩ, hiện với 353 viên chức có 39 Thạc sĩ, 172 Đại học, còn lại là cao đẳng và trung cấp.

Ba mươi năm một chặng đường phấn đấu và nỗ lực không ngừng của một tập thể, các cá nhân đóng góp cho sự phát triển chung cùng với sự phát triển đi lên của đất nước và Ngành Khí tượng Thủy văn. Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ tự hào kỷ niệm 30 năm ngày thành lập (30/3/1993 - 30/3/2023). Kỷ niệm 30 năm ngày thành lập Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ là dịp để chúng ta cùng nhìn lại chặng đường phát triển đã qua và ghi nhận những kết quả đạt được của Đài trong hoạt động khí tượng thủy văn phục vụ tốt cho sự nghiệp phát triển kinh tế - xã hội, an ninh, quốc phòng phát triển kinh tế - xã hội, bảo vệ môi trường của trong khu vực Nam Bộ.



**GS. TS. Trần Hồng Thái**  
**BÍ THƯ ĐẢNG ỦY,**  
**TỔNG CỤC TRƯỞNG TỔNG CỤC KHÍ TƯỢNG THUỶ VĂN**



Bài báo khoa học

## Phân tích tương quan giữa mực nước quan trắc bổ sung với mực nước tại các trạm mực nước ven biển Tây Nam Bộ

Lê Đình Quyết<sup>1\*</sup>, Nguyễn Minh Giám<sup>1</sup>, Huỳnh Minh Nhân<sup>1</sup>, Trịnh Xuân Hưng<sup>1</sup>, Lê Xuân Hiền<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Tuyết<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ; quiet.le74@gmail.com; nmgkttv@gmail.com; baclieu@kttvnb.vn; camau@kttvnb.vn; kiengiang@kttvnb.vn

<sup>2</sup>Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường thành phố Hồ Chí Minh; nttuyet@hcmunre.edu.vn

\*Tác giả liên hệ: email:quiet.le74@gmail.com; Tel.: +84-934180776

Ban Biên tập nhận bài: 8/1/2023; Ngày phản biện xong: 18/2/2023; Ngày đăng bài: 25/3/2023

**Tóm tắt:** Những năm gần đây, vùng ven biển Tây Nam Bộ thường xảy ra hiện tượng mực nước dâng cao bất thường, gây thiệt hại rất nặng nề. Để dự báo, cảnh báo được hiện tượng này, cần xác định được nguyên nhân, cơ chế chính. Để có cơ sở khoa học xác định nguyên nhân gây mực nước biển dâng dị thường cũng cần tính mối tương quan giữa mực nước đo bổ sung vùng ven biển với các trạm thủy văn lân cận. Số liệu đưa vào tính toán là số liệu mực nước giờ, trong tháng 7 và tháng 8 năm 2022. Phương pháp chủ yếu sử dụng gồm phương pháp tương quan hồi quy bằng hàm tuyến tính. Tương quan được biểu diễn bằng phương trình hồi quy  $Y = a_0 + a_1 X_t$ . Trong đó: Y là giá trị của hàm;  $X_t$ : số thứ tự thời gian và  $a_0, a_1$ : các hệ số hồi qui. Hệ số  $a_1$  cho biết hướng dốc của đường hồi quy, nói lên xu thế biến đổi tăng hay giảm theo thời gian. Nếu  $a_1$  âm nghĩa là xu thế giảm theo thời gian và ngược lại. Kết quả nghiên cứu cho thấy chỉ có trạm Sông Đốc có hệ số tương quan tốt với số liệu mực nước đo bổ sung tại khu vực ven biển Hòn Đá Bạc, những trạm bên biển Tây có hệ số tương quan  $R^2 > 0,45$ , các trạm bên biển Đông hệ số tương qua thấp. Kết quả này có thể làm tham khảo để xây dựng mô hình dự báo, cảnh báo.

**Từ khóa:** Nước biển dâng; Mực nước ven biển Cà Mau; Nguyên nhân sạt lở đê biển; Sóng cao tràn bờ.

### 1. Mở đầu

Sự biến động bãi biển trong vùng nước nông ven bờ là kết quả tác động của các quá trình tự nhiên như gió, sóng, dòng chảy, sóng thần và biến động của mực nước biển. Tuy nhiên sự tác động của con người cũng có ảnh hưởng đáng kể thông qua các công trình nhân tạo như xây dựng kè, đê chắn sóng, tường đứng ven biển và các quá trình nạo vét luồng cũng như nuôi bãi. Vùng ven biển Tây Nam Bộ, nhất là Cà Mau được nhắc tới nhiều trong những năm gần đây. Các số liệu thu thập được cho thấy, mực nước dâng có thể đạt tới 2,0 m [1]. Ngày 3/8/2019, sóng lớn kết hợp với mưa kèm theo dông lốc và triều cường dâng cao với mực nước đo tại cống Đá Bạc là 1,70 m, khiến nước biển tràn qua tuyến đê biển Tây đoạn từ Kênh Mới đến Đá Bạc từ 0,3–0,4 m, gây ra sạt lở rất nguy hiểm đến nhiều đoạn đê. Ngày 11/7/2022, sóng lớn và triều cường đã gây sạt lở 3 vị trí với tổng chiều dài 110 m tại đê biển Tây. Thời điểm xảy ra sự cố có gió cấp 5, cấp 6, giật cấp 7; lượng mưa ngày đo được 50–90 mm, riêng tại huyện Trần Văn Thời là 146 mm.

Thủy triều dâng cao nhất 1,75 m (tại Đá Bạc), vượt trên báo động 3 là 0,8 m. Mực nước sông dâng cao, gây ảnh hưởng ngập lụt nghiêm trọng và nguy hiểm cho đời sống sinh hoạt,



sản xuất của nhân dân. Sóng biển ven bờ cao từ 1,5–2 m, thời điểm cao nhất tràn qua mặt đê bê tông (+3,0 m) là 15–20 cm. Kết quả thống kê cho thấy đa số các lần xuất hiện mực nước dâng đều không đi kèm với hoạt động của bão và các hoạt động địa chấn; Các đợt mực nước biển dâng đều xảy ra vào các tháng VII, VIII, X, XI, nghĩa là mực nước dâng bất thường thường xuất hiện vào các tháng có biên độ thủy triều cao; các đợt mực nước biển dâng cao trùng vào thời kỳ gió mùa tây nam hoạt động mạnh kết hợp với hoàn lưu của các cơn bão/ATNĐ ở phía Bắc [2]. Theo các nghiên cứu của nước ngoài, một số nguyên nhân gây mực nước dâng dị thường tại vùng ven bờ, cửa sông và cảng biển là do sự cộng hưởng của các sóng dài từ ngoài khơi truyền vào [3]. Các sóng có chu kỳ dài này được sinh ra chủ yếu bởi một số nguyên nhân như quá trình nhiễu động khí áp, sóng thần, các hoạt động địa chấn địa phương, các sóng nội và dòng chảy siết. Ngoài ra nước dâng lớn trong các đợt gió mùa mạnh, kéo dài, thổi theo hướng ổn định cũng là nguyên nhân gây nước dâng dị thường lớn tại nhiều khu vực.

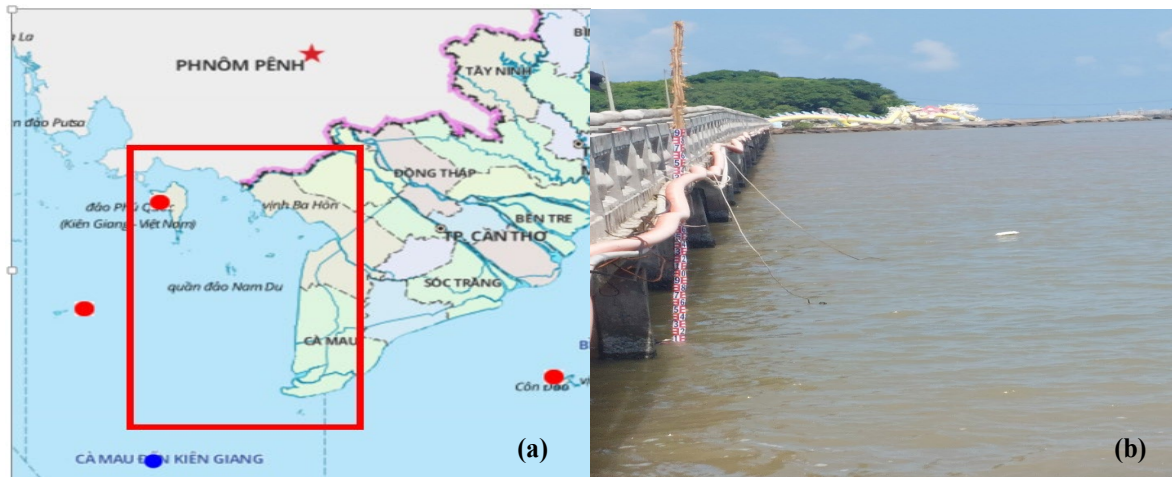
Nhiều nghiên cứu cho thấy độ lớn của nước dâng dị thường do nhiễu động khí áp là rất lớn và thường xảy ra trong một số tháng nhất định của năm tùy theo từng khu vực [4–6]. Mực nước biển dâng cao bất thường cũng xuất hiện tại nhiều nước trên thế giới, nó xảy ra phần lớn ở các khu vực ven bờ, cảng biển, vùng cửa sông [7–22]. Mực nước dâng cao bất thường do tác động của gió mùa thường thấp, có tính ổn định [23–24]. Dao động mực nước tại các vị trí trong cảng biển tương đối tương đối phức tạp theo từng vị trí trong cảng, từng cảng, chu kỳ sóng ngoài khơi và hướng truyền sóng [24]. Tại tất cả các điểm phân tích trong mỗi cảng biển phần lớn đều tồn tại 2 khoảng chu kỳ sóng có khả năng gây mực nước dị thường và độ dài của các chu kỳ sóng này thay đổi tùy địa hình cảng và hướng truyền sóng. Nhìn chung, các điểm nằm sâu trong cảng thường có nước dâng lớn hơn tại các vị trí thoáng hơn [24]. Theo kết quả nghiên cứu từ [3] hiện tượng mực nước biển dâng cao bất thường tại một số vùng ven biển tại Việt Nam chủ yếu xuất hiện trong những ngày có bão. Sóng cũng có một số lần xuất hiện mực nước biển dâng cao bất thường xảy ra trong ngày có thủy triều cao (triều cường), tác động của mực nước biển dâng cao bất thường là rất lớn, khi mực nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn đã gây ngập lụt, sạt lở và phá hủy nhiều công trình nghiên cứu hiện tượng nước dâng bất thường tại khu vực đảo Kyushu và Okinawa (Nhật Bản) thông qua mô hình sóng dài phi tuyến 2 chiều [16]. Kết quả nghiên cứu cho thấy ảnh hưởng của sự chênh lệch khí áp và tốc độ di chuyển của khối khí đến mực nước dâng cao bất thường. Bằng cách phân tích dữ liệu độ cao vệ tinh (TOPEX/Poseidon) và dữ liệu gió từ NCEP/NCAR, kết quả cho thấy mức nước biển có sự biến đổi đáng kể trong năm, tương quan chặt chẽ với sự thay đổi ứng suất gió mùa.

Do vậy, nghiên cứu xây dựng công nghệ dự báo, cảnh báo mực nước biển dâng cao bất thường, thu thập số liệu địa hình đáy biển vùng ven bờ là hết sức cần thiết và quan trọng đối với việc tính toán xây dựng công nghệ dự báo, cảnh báo mực nước biển dâng cao bất thường. Để có cơ sở khoa học xác định nguyên nhân gây mực nước biển dâng dị thường thì mối liên hệ, hay mối tương quan giữa mực nước vùng biển dâng bất thường với các trạm thủy văn cần được nghiên cứu phân tích kỹ lưỡng. Trong nghiên cứu này sẽ tập trung vào đánh giá phân tích tương quan giữa mực nước các trạm thủy văn và trạm khảo sát vùng có nước dâng bất thường. Kết quả phân tích mối tương quan này sẽ đánh giá được mối liên hệ giữa mực nước dâng bất thường với các các trạm thủy văn để tìm ra sự tương quan mực nước dâng bất thường tại vùng biển Tây Nam Bộ.

## **2. Phương pháp nghiên cứu và số liệu thu thập**

### *2.1. Số liệu thu thập*

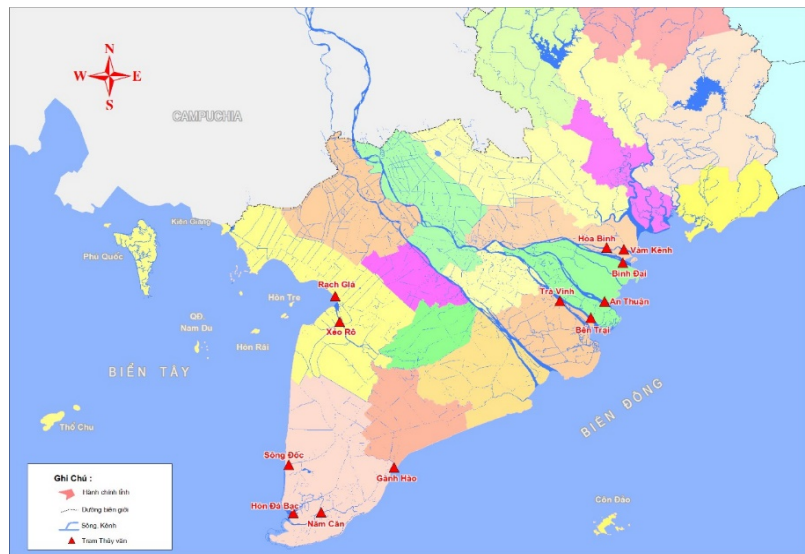
Từ số liệu đo mực nước bổ sung ven biển Hòn Đá Bạc (ấp Kinh Hòn, xã đảo Khánh Bình Tây, huyện Trần Văn Thời, tỉnh Cà Mau), (Hình 1) từ ngày 15/7/2022 đến 15/8/2022. Từ hệ thống trạm thủy văn truyền thống của Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ chọn ra các trạm sau:



**Hình 1.** Khu vực nghiên cứu (a) và địa điểm đo bổ sung mực nước ven biển Cà Mau (b).

Để đánh giá tương quan mực nước giữa điểm đo khảo sát với số liệu mực nước các trạm thủy văn trong sông, nghiên cứu này chọn một số trạm có vị trí gần biển tây nhất để tính toán. Số liệu đo khảo sát được đọc trực tiếp trên thước, tần suất đo từng giờ (24 giờ/ ngày), kéo dài 30 ngày liên tục. Số liệu mực nước để tính toán tương quan lấy từ các trạm thủy văn trong sông (Hình 2), số liệu từng giờ tương ứng, số liệu của các trạm thủy văn đo bằng máy đo Steven, sau đó được đọc, quy toán.

1. Sông Đốc
2. Gành Hào
3. An Thuận
4. Bến Trại
5. Bình Đại
6. Hòa Bình
7. Trà Vinh
8. Vàm Kênh
9. Năm Căn
10. Xẻo Rô
11. Rạch Giá



**Hình 2.** Sơ đồ các trạm thủy văn truyền thống và tự động.

**Bảng 1.** Danh sách các trạm thủy văn.

TT	Trạm	Sông	Tỉnh/ Thành Phố	Kinh độ	Vĩ độ	Hạng	Ghi chú
1	Sông Đốc	Sông Đốc	Cà Mau	104° 49' 50"	09° 02' 27"	III	
2	Gành Hào	Gành Hào	Bạc Liêu	105° 25' 10"	09° 01' 55"	III	
3	An Thuận	Hàm Luông	Bến Tre	106° 36' 07"	09° 58' 52"	III	
4	Bến Trại	Cổ Chiên	Bến Tre	106° 28' 15"	09° 54' 12"	III	
5	Bình Đại	Cửa Đại	Bến Tre	106° 42' 20"	10° 12' 15"	III	
6	Hòa Bình	Cửa Tiểu	Tiền Giang	106° 35' 33"	10° 17' 25"	III	
7	Trà Vinh	Cổ Chiên	Trà Vinh	106° 21' 15"	09° 58' 31"	III	
8	Vàm Kênh	Cửa Tiểu	Tiền Giang	106° 44' 14"	10° 16' 28"	III	
9	Năm Căn	Cửa Lớn	Cà Mau	105° 00' 21"	08° 45' 45"	III	
10	Xẻo Rô	Cái Lớn	Kiên Giang	105° 06' 42"	09° 51' 48"	III	
11	Rạch Giá	Kiên	Kiên Giang	105° 05' 03"	10° 00' 44"	III	



### 2.2. Phương pháp thực hiện

Phương pháp thống kê: tính toán và phân tích diễn biến theo thời gian và không gian của các đặc trưng khí hậu. Phương pháp tương quan hồi quy, Phương pháp này được sử dụng việc xác định tương quan được sử dụng bằng hàm tuyến tính. Tương quan có thể thể hiện khi biểu diễn phương trình hồi quy:

$$Y = a_0 + a_1 X_t \tag{1}$$

Trong đó Y là giá trị của hàm;  $X_t$  là số thứ tự thời gian và  $a_0, a_1$  là các hệ số hồi quy. Hệ số  $a_1$  cho biết hướng dốc của đường hồi quy, nói lên xu thế biến đổi tăng hay giảm theo thời gian. Nếu  $a_1$  âm nghĩa là xu thế giảm theo thời gian và ngược lại.

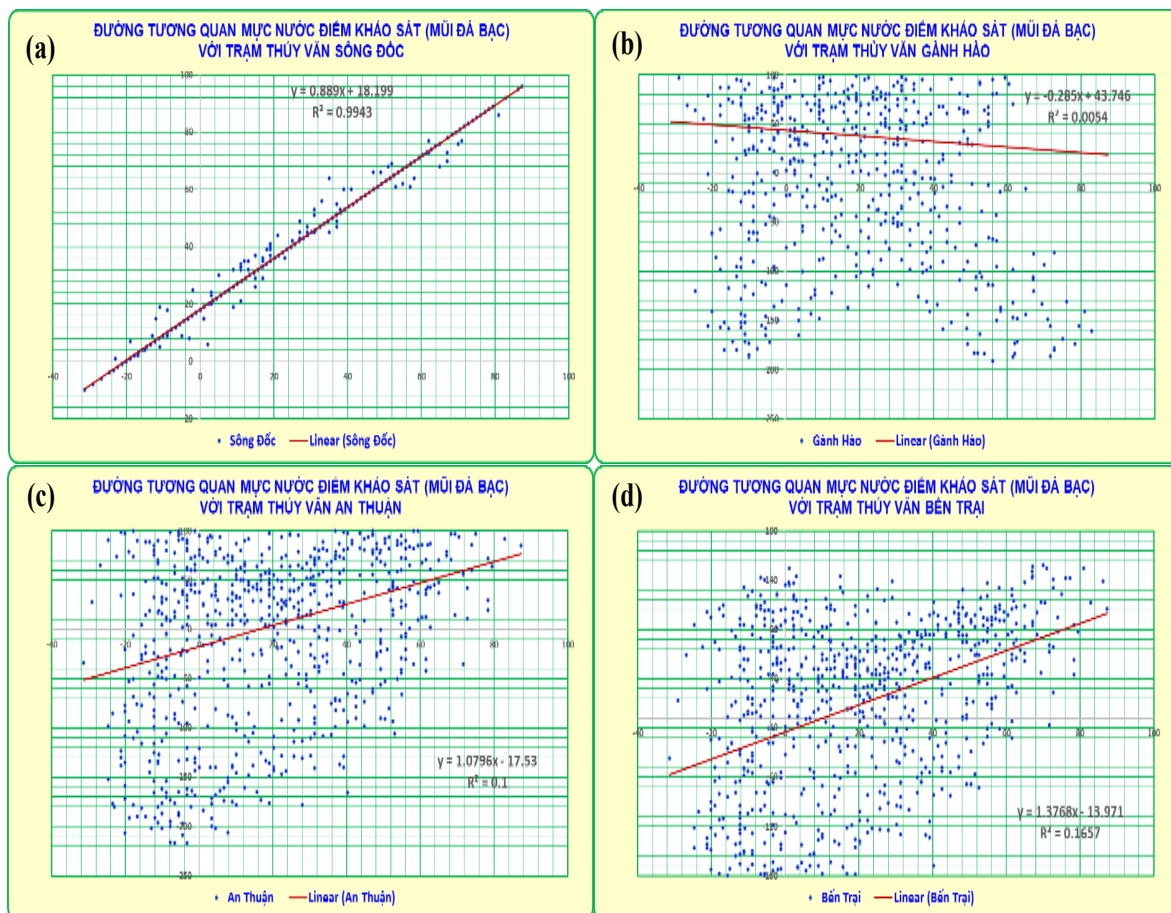
Các hệ số  $a_0$  và  $a_1$  tính theo công thức sau:

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x}$$

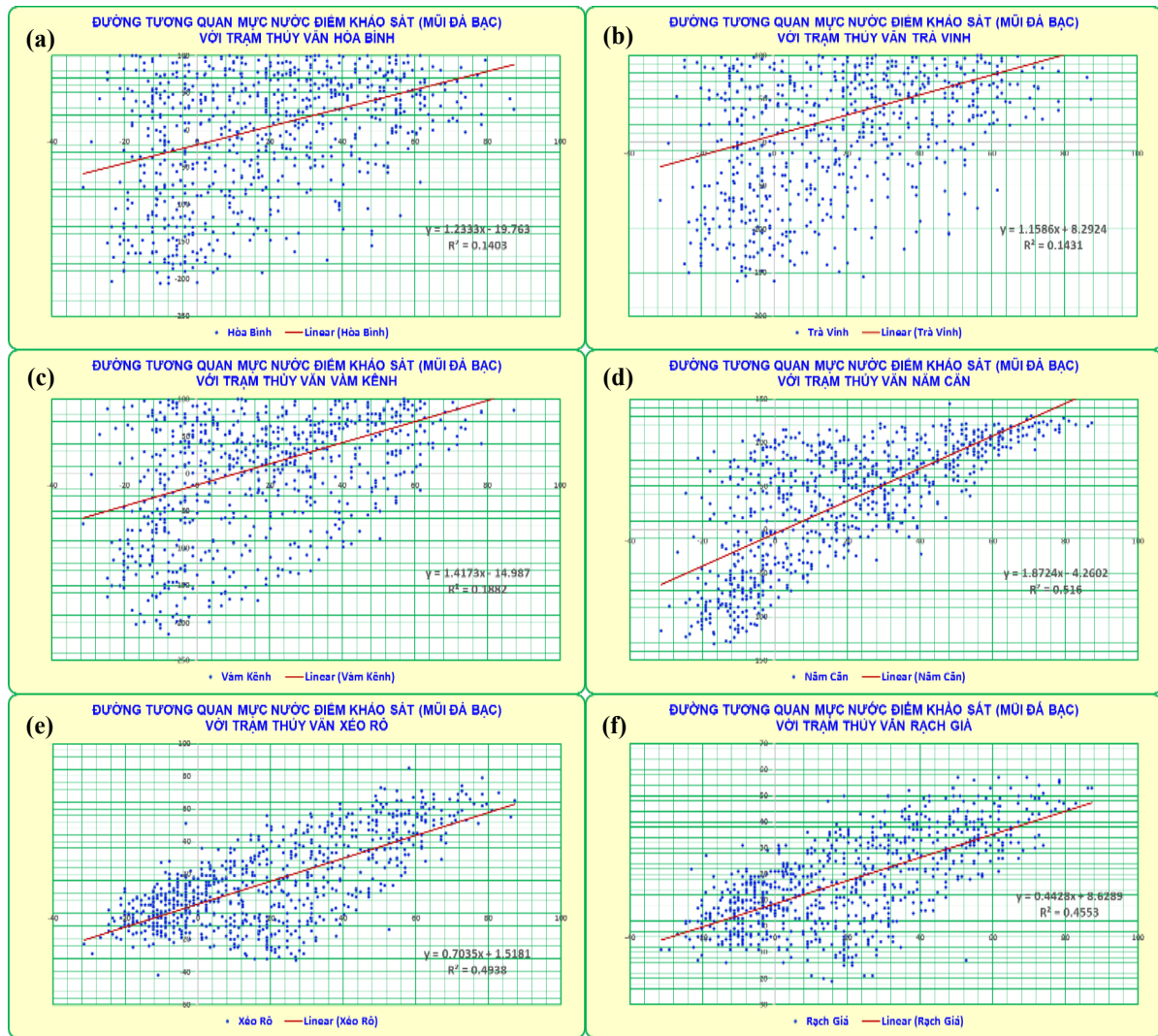
$$a_1 = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})x_t - \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})\bar{x}}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})x_t - \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})\bar{x}} = \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})(x_t - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \tag{2}$$

### 3. Kết quả tương quan điểm khảo sát và các trạm thủy văn tại tây Nam Bộ

Số liệu khảo tại Hòn Đá Bạc từ ngày 15/7/2022 đến 15/8/2022 và cùng với thời gian tương ứng đối với các trạm để tính tương quan kết quả được thể hiện trên Hình 3–4.



**Hình 3.** Đồ thị phương trình và hệ số tương quan điểm khảo sát (mũi Đá Bạc) với trạm thủy văn: (a) Sông Đốc; (b) Gành Hoà; (c) An Thuận; (d) Bến Trại.



**Hình 4.** Đồ thị phương trình và hệ số tương quan điểm khảo sát (mũi Đá Bạc) với trạm thủy văn: (a) Hoà Bình; (b) Trà Vinh; (c) Vàm Kênh; (d) Năm Căn; (e) Xẻo Rô; (f) Rạch Giá.

Các trạm thủy văn bên biển phía tây có vị trí gần cửa sông, có thể thời điểm tiến hành đo khảo sát (tháng 7, tháng 8) là thời kì gió tây nam hoạt động mạnh, hướng sóng, đà sóng tại khu vực ven biển Hòn Đá Bạc không khác biệt với các vị trí trạm thủy văn, do vậy chu kì mực nước lên, xuống trùng nhau, trong khi khu vực biển phía đông thời kì này hướng đón sóng, gió không trùng nhau. Bảng 2 là tổng hợp phương trình và hệ số tương quan tại các trạm.

**Bảng 2.** Tổng hợp phương trình tương quan Hòn Đá Bạc với các trạm thủy văn.

Tên trạm	Phương trình tương quan	Hệ số tương quan
Sông Đốc	$y = 0,889x + 18,199$	0,994
Gành Hào	$y = -0,285x + 43,746$	0,005
An Thuận	$y = 1,0796x - 17,53$	0,100
Bến Trại	$y = 1,3768x - 13,971$	0,166
Bình Đại	$y = 1,0556x - 15,195$	0,098
Hòa Bình	$y = 1,2333x - 19,763$	0,140
Trà Vinh	$y = 1,6224x - 0,9919$	0,282
Vàm Kênh	$y = 1,4173x - 14,987$	0,188
Năm Căn	$y = 1,8724x - 4,2602$	0,516
Xẻo Rô	$y = 0,7035x + 1,5181$	0,494
Rạch Giá	$y = 0,4428x + 8,6289$	0,455



#### 4. Kết luận

Số liệu mực nước các trạm thủy văn Rạch Giá, Xẻo Rô, Năm Căn, Sông Đốc có hệ số tương quan với số liệu đo khảo sát tại ven biển Cà Mau với mức từ 0,4 đến 0,5. Riêng số liệu trạm Sông Đốc có hệ số tương quan cao nhất (0,99). Số liệu các trạm khác thuộc ven biển phía đông (Bạc Liêu, Sóc Trăng, Bến Tre...) có hệ số tương quan rất thấp.

Qua tính toán cho thấy chỉ có trạm Sông Đốc có hệ số tương quan tốt có thể dùng số liệu trạm sông Đốc để tính toán cho điểm khảo sát Hòn Đá Bạc.

Hạn chế của kết quả nghiên cứu này là nghiên cứu mới chỉ đánh giá giá trị mực nước phía trong sông với khu vực ven biển, để xác định quan hệ mực nước giữa các vị trí quan trắc mực nước với số liệu đo bổ sung ven biển, chưa xem xét đến các quá trình tác động khác. Bên cạnh đó số liệu đo bổ sung để tính toán chỉ tổ chức đo 1 địa điểm, thời gian đo 30 ngày vào tháng 7, tháng 8 do đó chưa phản ánh đầy đủ quan hệ trong các tháng khác.

**Đóng góp của tác giả:** Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: L.Đ.Q., N.M.G.; Xử lý số liệu: H.M.N., N.T.T.; Viết bản thảo bài báo: N.M.G.; Chỉnh sửa bài báo: L.Đ.Q.

**Lời cảm ơn:** Bài báo hoàn thành có sự hỗ trợ về mặt dữ liệu của các Đài KTTV tỉnh Cà Mau, Kiên Giang, Bạc Liêu, Sóc Trăng, Bến Tre, dữ liệu khảo sát bổ sung lấy từ Đề tài nghiên cứu Khoa học cấp Bộ Nghiên cứu xây dựng công nghệ dự báo, cảnh báo mực nước biển dâng cao bất thường cho vùng ven biển Việt Nam.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

#### Tài liệu tham khảo

1. Huân, P.V.; Thành, H.T. Sơ đồ chi tiết phân tích điều hòa thủy triều. *Tạp chí khoa học ĐHQGHN* 2009, 25(1S), 66–75.
2. Huân, P.V. Dao động tự do và dao động mùa của mực nước Biển Đông. Luận án Tiến sĩ, Hà Nội, 1993.
3. Mạnh, Đ.V. và cs. Phát triển và hoàn thiện mô hình dự báo sóng bão, nước dâng do bão, thủy triều cho dải ven biển Việt Nam. Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Cơ học, 2011.
4. Thông, B.X. Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ “Nghiên cứu hiện tượng mực nước biển dâng dị thường không phải do bão xảy ra tại các vùng cửa sông, ven biển Việt Nam”, 2007.
5. Tiến, T.Q. Nghiên cứu nguyên nhân và xây dựng quy trình công nghệ cảnh báo, dự báo hiện tượng mực nước biển dâng dị thường tại miền Trung và Nam Bộ Việt Nam, Đề tài NCKH cấp nhà nước, 2018.
6. Thủy, N.B.; Trang, N.T.; Trinh, N.Q.; Hà, B.M. Tính toán phân tích dao động mực nước trong một số cảng biển có hình dạng khác nhau bằng mô hình số trị. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* 2012, 613, 25–29.
7. Akamatsu, H. On seiches in Nagasaki Bay. *Pap. Meteor. Geophys.* 1982, 33(2), 95–115.
8. Carr, J.H.; Stelzriede, M.E. Diffraction of Water Waves by Breakwaters, Gravity Waves. Circular 521. National Bureau of Standards, Washington, DC, 1952, pp. 109–125.
9. Chen, W.B.; Lin, L.Y.; Jang, J.H. Simulation of typhoon-induced storm surge storm tides and wind waves for the Northeastern coast of Taiwan Using a tide-surge-wave couple model. *Water Res.* 2017, 9, 549.
10. De Jong, M.P.C. Seiche characteristics of Rotterdam Harbour. *Coastal Eng.* 2004, 51, 373–386.

11. Garcies, M.; Gomis, D.; Monserrat, S. Pressure–forced seiches of large amplitude in inlets of the Balearic Islands. Part II: Observational study. *J. Geophys. Res.* **1996**, *101*, 6453–6467.
12. Hwang, L.S.; Tuck, E.O. On the oscillations of harbours of arbitrary shape. *J. Fluid Mech.* **1970**, *42*, 447–464.
13. Hibiya, T.; Kajiura, K. Origin of “Abiki” phenomenon (kind of seiches) in Nagasaki Bay. *J. Oceanogr. Soc. Japan* **1982**, *38*, 172–182.
14. Kim, S.Y.; Yasuda, T.; Mase, H. Numerical analysis of effects of tidal variations on storm surges and waves. *Appl. Ocean Res.* **2010**, *28*, 311–322.
15. Monserrat, S.; Vilibi, I.; Rabinovich, A.B. Atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band, 2006.
16. Kono, N. Summary of the Seiches in the west coast of Kyusyu, which happened from 24 to 28 February 2009, 2010.
17. Pugh, D.T.; Woodworth, P.L. Sea–level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sealevel changes. Cambridge University Press, Cambridge. 2014, ISBN 9781107028197.
18. Nguyen, T. The mechanism of after–runner storm surge along the Northern coast of Vietnam. *Tap chí Khoa học và Công nghệ biển* **2017**, *17*, 208–216.
19. Rabinovich, A.B. Seiches and Harbor Oscillations – Handbook of Coastal and Ocean Engineering (Edited by Kim, Y.C.), World Scientific Publ., Singapoure, 2009.
20. Kakinuma, T.; Fukita, K. A numerical study on longwave generation due to atmospheric–pressure variation. *Coastal Eng. J.* **2012**, *33*, 1–8.
21. Titov, V.V.; Synolakis, C.E. Extreme inundation flows during the Hokkaido Nansei–Oki tsunami. *Geophys. Res. Lett.* **1997**, *24(11)*, 1315–1318.
22. Whithmore, P.; Knight, B. Meteorological tsunami forecasting: Sensitivities demonstrated by the 2008 Boothbay, Marine. *J. Nat. Hazard* **2014**, 11–23.
23. Thuy, N.B.; Tanimoto, K.; Tanaka, N.; Harada K.; Iimura, K. Effect of open gap in coastal forest on tsunami Run–up – Investigations by experiment and numerical simulation. *Ocean Eng.* **2009**, *36*, 1258–1269.
24. Thuy, N.B., Dang, V.H.; Chien, D.D.; Trang, N.T.; Dung, N.M. Numerical analysis of the risk of anomalous water level in Habor. The 14<sup>th</sup> Asian Congress of Fluid Mechanics – 14ACFM October 15–19, 2013, Hanoi and Halong, Vietnam, 2013, pp. 971–977.

## Analysis of correlation between supplementary water levels and water levels at Southwest coastal water stations

Le Dinh Quyet<sup>1\*</sup>, Nguyen Minh Giam<sup>1</sup>, Huynh Minh Nhan<sup>1</sup>, Trinh Xuan Hung<sup>1</sup>, Le Xuan Hien<sup>1</sup>, Nguyen Thi Tuyet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Southern Regional Hydrometeorological Center; quyet.le74@gmail.com; nmgkttv@gmail.com; nmgkttv@gmail.com; baclieu@kttvnb.vn; camau@kttvnb.vn; kiengiang@kttvnb.vn

<sup>2</sup> Ho Chi Minh city University of Natural Resources and Environment; nttuyet@hcmunre.edu.vn

**Abstract:** In recent years, the Southwestern coastal area has been experiencing unusually high water levels. To predict and warn about this phenomenon, the main causes and mechanisms must be identified. To have a scientific basis for determining the cause of the unusual sea level rise, it is also necessary to calculate the correlation between the additional measured water level in the coastal area and the neighboring hydrological stations. The data put in to calculate is the hourly water level, in July and August 2022. The regression correlation using linear functions was one of the main methods used. The correlation can be



expressed when representing the regression equation  $Y = a_0 + a_1X_t$ . Where: Y is the value of the function;  $X_t$ : chronological number and  $a_0, a_1$ : regression coefficients. The coefficient  $a_1$  represents the slope of the regression line, which indicates whether the trend is increasing or decreasing over time. If  $a_1$  is negative, the trend is downward over time, and vice versa. The results showed that only Song Doc station has a high correlation coefficient with additional measured water level data in the Hon Da Bac coastal area. West Sea stations have a correlation coefficient of  $R^2 > 0.45$ . All stations on the East Sea have low correlation coefficients. This result can be used as a reference to build forecasting and warning models.

**Keywords:** Sea level rise; Ca Mau coastal water level; Causes sea dyke erosion; High waves overflowing the shore.

Bài báo khoa học

# Mô phỏng và xây dựng bản đồ ngập lụt hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai

Lê Thanh Quảng<sup>1\*</sup>, La Đức Dũng<sup>2</sup>, Trần Ngọc Anh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Đai Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ; lequangwru@gmail.com

<sup>2</sup> Tổng cục Khí tượng Thủy văn; dunglakttv@gmail.com

<sup>3</sup> Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa học tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội; tranngocanh@hus.edu.vn

\*Tác giả liên hệ: lequangwru@gmail.com; Tel.: +84–359285776

Ban Biên tập nhận bài: 15/1/2023; Ngày phản biện xong: 20/2/2023; Ngày đăng bài: 25/3/2023

**Tóm tắt:** Ngập lụt khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai chịu tác động bởi 4 nguyên nhân chính: mưa, thủy triều, xả lũ hồ chứa, lũ thượng nguồn bên phía Cam Pu Chia tràn về. Nghiên cứu đã ứng dụng mô hình MIKE FLOOD để mô phỏng và xây dựng bản đồ ngập lụt cho khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai. Bộ thông số mô hình được hiệu chỉnh và kiểm định với các chuỗi số liệu của các năm lũ lớn 1999 và 2000 cho kết quả tương quan tốt giữa số liệu tính toán và thực đo. Từ đó bộ mô hình được sử dụng để mô phỏng và đánh giá ngập lụt theo các kịch bản ảnh hưởng của tổ hợp các tác nhân gây ngập lụt: xả lũ hồ chứa, lũ thượng nguồn, mưa lớn và triều cường. Dựa trên kết quả tính toán thủy lực và xây dựng bản đồ ngập lụt sẽ xác định được mức độ ảnh hưởng của các tác nhân gây ngập tới từng khu vực cụ thể, từ đó hỗ trợ cho các cơ quan hữu quan đưa ra các giải pháp chống ngập thích hợp cho từng vùng, đồng thời làm cơ sở cho công tác quy hoạch phát triển kinh tế xã hội một cách bền vững.

**Từ khóa:** MIKE FLOOD; Ngập lụt.

## 1. Đặt vấn đề

Khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai nằm trên địa phận của 5 tỉnh: TPHCM, Đồng Nai, Bình Dương, Tây Ninh, Long An. Khu vực này là nơi tập trung đông dân cư với nhiều đô thị lớn, đồng thời là trung tâm kinh tế của cả nước. Hàng năm khu vực này luôn phải đối mặt và chịu ảnh hưởng của nhiều loại hình thiên tai khác nhau nhưng tiêu biểu nhất là lũ và ngập lụt. Trung bình mỗi năm xảy ra từ 1 đến 2 trận lũ, gây thiệt hại đáng kể cho khu vực. Trận lũ năm 1952 và năm 2000 là hai trận lũ lớn từng xảy ra trong lịch sử, bão lũ đã tàn phá và gây ngập lụt nghiêm trọng cho khu vực Nam Bộ, cuốn trôi nhiều nhà cửa và tài sản của người dân, nghiêm trọng nhất là có nhiều người chết và mất tích do lũ lụt. Hiện tượng ngập lụt do mưa lớn và triều cường ở các khu đô thị xảy ra thường xuyên, gây thiệt hại kinh tế và làm đảo lộn đời sống sinh hoạt của người dân. Hiện nay đã có nhiều biện pháp phòng chống ngập lụt được đề ra, nhiều công trình chống ngập được đầu tư xây dựng; tuy nhiên vẫn chưa đáp ứng được yêu cầu chống ngập thực tế nên ngập lụt vẫn xảy ra thường xuyên. Vì vậy, việc nghiên cứu đánh giá mức độ ngập lụt cho khu vực là vô cùng quan trọng, đây là cơ sở để xây dựng quy trình vận hành hồ chứa, đề ra các biện pháp phòng chống ngập lụt và hạn chế tác động do ngập lụt gây ra; đồng thời cũng là cơ sở để quy hoạch phát triển kinh tế-xã hội một cách bền vững.



Trong những năm gần đây, việc ứng dụng mô hình toán trong dự báo, cảnh báo và đánh giá ngập lụt được áp dụng rất nhiều trên thế giới [1–3], một số mô hình phổ biến hiện đang được sử dụng như: MIKE, HEC, DELFT3D... Ở Việt Nam, việc sử dụng mô hình toán để mô phỏng ngập lụt đã có từ lâu và ứng dụng cho nhiều hệ thống sông [4–13], một số mô hình được xây dựng và phát triển bởi chuyên gia trong nước [9–10], còn lại phần lớn ứng dụng những mô hình nước ngoài để mô phỏng ngập lụt mà tiêu biểu nhất là bộ mô hình MIKE [11–13]; do khả năng ứng dụng rộng rãi cho nhiều bài toán thủy lực, giao diện dễ sử dụng, tốc độ tính toán nhanh nên được sử dụng trong nhiều nghiên cứu về ngập lụt. Hiện nay, đã có một số nghiên cứu ứng dụng mô hình toán để mô phỏng và đánh giá ngập lụt cho khu vực thuộc hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai [14–18]. Tuy nhiên những nghiên cứu trước thường chỉ tập trung mô phỏng ngập lụt trong một phạm vi nhỏ, đồng thời các kịch bản xả lũ hồ chứa không còn quá phù hợp với những quy định mới trong quy trình vận hành liên hồ chứa được ban hành trong những năm gần đây [19–22]. Vì vậy, nghiên cứu đã ứng dụng mô hình MIKE FLOOD để mô phỏng ngập lụt tương ứng với các kịch bản cụ thể, đồng thời sử dụng kết quả đó để đánh giá mức độ ngập lụt cho khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai là phần lưu vực được giới hạn từ sau hồ Trị An, Dầu Tiếng, Phước Hòa và từ thượng lưu sông Vàm Cỏ Đông, Vàm Cỏ Tây ra tới cửa biển, diện tích khu vực khoảng 14000 km<sup>2</sup> thuộc địa phận của 5 tỉnh: TPHCM, Đồng Nai, Bình Dương, Tây Ninh, Long An (Hình 1). Vùng nghiên cứu thuộc khu vực nhiệt đới gió mùa cận xích đạo, một năm có hai mùa rõ rệt: mùa mưa và mùa khô. Mùa mưa thường bắt đầu từ tháng 5 đến hết tháng 11, lũ thường xuất hiện trong giai đoạn mùa mưa từ tháng 8 đến tháng 11; mùa khô từ tháng 12 tới tháng 5 năm sau; lượng mưa trung bình nhiều năm khoảng 2200 mm.

### BẢN ĐỒ HẠ LƯU HỆ THỐNG SÔNG ĐỒNG NAI



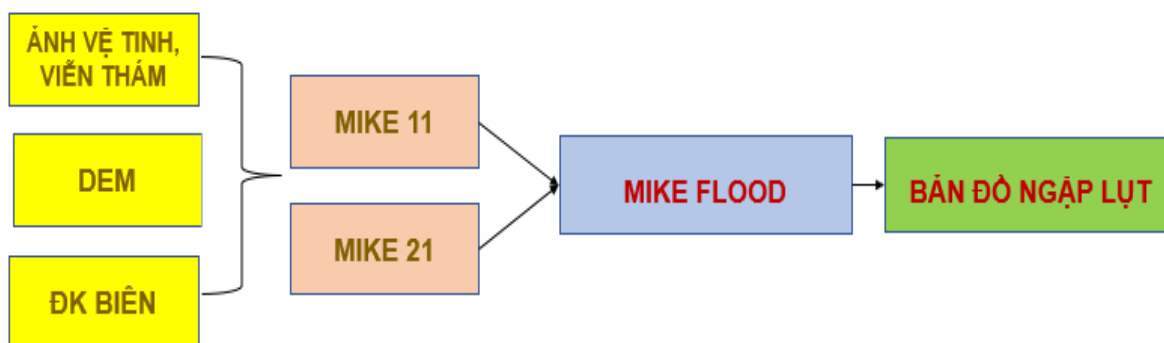
Hình 1. Bản đồ khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai.

Khu vực nghiên cứu có mạng lưới sông ngòi dày đặc, các sông lớn thuộc khu vực như: sông Đồng Nai, sông Sài Gòn, sông Vàm Cỏ Đông, sông Vàm Cỏ Tây, sông Bé; ngoài vai trò cung cấp nguồn nước, sông ngòi khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai còn là tuyến đường thủy quan trọng kết nối các khu vực khác ở trong và ngoài nước. Phía thượng lưu là ba hồ chứa lớn: hồ Trị An, hồ Dầu Tiếng, hồ Phước Hòa; các hồ chứa có vai trò đặc biệt quan trọng trong việc cung cấp nước ngọt, phát điện và đẩy mặn trong mùa khô. Vào giai đoạn mùa khô, các sông trên khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của bán nhật triều Biển Đông; tới giai đoạn mùa mưa từ tháng 8 đến tháng 11, khu vực còn chịu ảnh hưởng mạnh của việc xả lũ hồ chứa và lũ thượng nguồn bên phía Cam Pu Chia tràn về, càng về hạ lưu thì ảnh hưởng của lũ càng yếu và ảnh hưởng của thủy triều càng mạnh.

Địa hình của khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai chuyển tiếp từ đồi núi sang trung du tới đồng bằng, thấp dần từ thượng lưu về hạ lưu. Ngập lụt của khu vực nghiên cứu là do tổ hợp của một hoặc một số tác nhân gây ngập: xả lũ hồ chứa, lũ thượng nguồn bên phía Cam Pu Chia tràn về, mưa lớn và triều cường. Khu vực trung du và đồng bằng phía sau hồ chứa Trị An, Dầu Tiếng, Phước Hòa có địa hình tương đối cao nên phần lớn bị ngập do xả lũ hồ chứa với lưu lượng lớn vượt quá khả năng tiêu thoát lũ của lòng sông. Khu vực đồng bằng ven biển, ngập lụt chủ yếu do tác động của triều cường. Còn khu vực ở giữa, nơi chuyển tiếp từ trung du sang đồng bằng ven biển thì ngập lụt do chịu ảnh hưởng của tổ hợp tác động: mưa, lũ thượng nguồn, xả lũ hồ chứa, thủy triều. Trong những năm gần đây, đã có những quy định cụ thể về việc vận hành liên hồ chứa, nhiều công trình chống ngập lụt được đầu tư xây dựng. Tuy nhiên, việc đầu tư xây dựng và thiếu đồng bộ, chưa đáp ứng được yêu cầu thực tế, công tác quản lý vận hành còn chưa chặt chẽ nên hiệu quả chống ngập chưa cao.

## 2.2. Công cụ tính toán

Kế thừa bộ dữ liệu mô hình hình thủy lực cho vùng hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai của trường đại học Thủy Lợi và Viện quy hoạch Thủy Lợi miền Nam, nhóm nghiên cứu đã cập nhật bổ sung và phát triển xây dựng bộ mô hình MIKE FLOOD cho khu vực để phục vụ tính toán mô phỏng ngập lụt (Hình 2). Kết hợp với công nghệ GIS để xây dựng bản đồ ngập lụt và phân tích kết quả ngập lụt tương ứng với từng kịch bản.



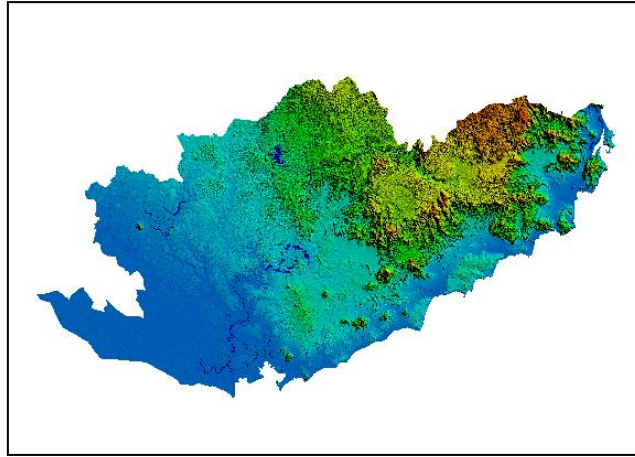
Hình 2. Sơ đồ nghiên cứu tính toán thủy lực và ngập lụt.

## 2.3. Thu thập và xử lý dữ liệu

### 2.3.1. Tài liệu địa hình, viễn thám

Dữ liệu bản đồ cao độ số (DEM) có độ phân giải  $30m \times 30m$ , tài liệu mặt cắt ngang chủ yếu được kế thừa từ “Dự án đê biển Vũng Tàu–Gò Công” và cập nhật thêm từ các đề tài dự án của cơ sở 2 trường Đại học Thủy Lợi từ năm 2000 đến nay, dữ liệu địa hình đáy biển khu vực vịnh Gành Rái được lấy từ nguồn dữ liệu địa hình toàn cầu GEBCO (Hình 3).

Dữ liệu ảnh viễn thám về mức độ ngập lụt được lấy từ bản đồ ngập lụt trực tuyến của đại học Liên Hợp Quốc (UNU) để so sánh với kết quả mô phỏng ngập lụt trong quá trình hiệu chỉnh và kiểm định mô hình.



**Hình 3.** Bản đồ cao độ số (DEM) lưu vực sông Đồng Nai.

### 2.3.2. Tài liệu khí tượng thủy văn

Tài liệu khí tượng, thủy văn dùng làm biên mô hình tính bao gồm các biên thượng lưu (lưu lượng), biên nhập lưu khu giữa (tính từ mưa, bốc hơi trong MIKE NAM), biên hạ lưu (mức nước). Tài liệu khí tượng thủy văn được thu thập từ số liệu quan trắc của Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ, đảm bảo tính liên tục, độ tin cậy và chính xác.

Biên trên là lưu lượng xả của các hồ chứa: Trị An, Dầu Tiếng, Phước Hòa và lưu lượng trên sông Vàm Cỏ Đông tại trạm thủy văn Cần Đăng, lưu lượng trên sông Vàm Cỏ Tây tại trạm thủy văn Mộc Hóa, số liệu liên tục từ năm 1980–2010. Ngoài ra, trên một số sông suối nhỏ, số liệu lưu lượng mức nước được giả thiết là một giá trị mặc định.

Biên dưới là mức nước trạm hải văn Vũng Tàu, sử dụng mức nước của các trạm: Biên Hòa, Thủ Dầu Một, Phú An, Nhà Bè, Tân An, Bến Lức để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình.

Số liệu mưa, bốc hơi: dùng chuỗi số liệu mưa ngày và số liệu bốc hơi ngày thời đoạn từ 1980–2010 của 18 trạm đo mưa và 12 trạm đo bốc hơi để tính toán lưu lượng nhập khu giữa trong mô hình thủy văn MIKE NAM (Hình 4).



**Hình 4.** Vị trí các trạm khí tượng thủy văn trên khu vực nghiên cứu.

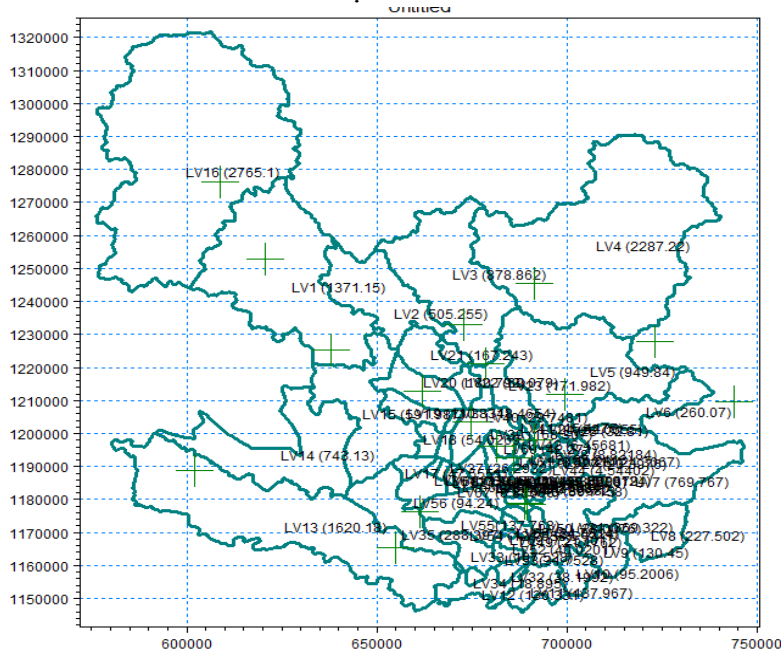
### 2.4. Thiết lập mô hình

Nghiên cứu sử dụng module thủy văn MIKE NAM để tính toán dòng chảy nhập khu giữa và sử dụng công cụ MIKE FLOOD kết nối các module thủy lực MIKE11, MIKE21FM để mô phỏng ngập lụt, công cụ GIS được sử dụng để xử lý số liệu đầu vào, xây dựng và phân tích bản đồ ngập lụt.



2.4.1. Tính toán dòng chảy nhập lưu khu giữa bằng mô hình MIKE NAM

Lưu vực của các sông suối trong mô hình được chia thành 69 tiểu lưu vực, diện tích mỗi tiểu lưu vực từ 4 đến 2300 km<sup>2</sup> (Hình 5). Lượng mưa, bốc hơi dùng tính là các trạm nằm trong khu vực nghiên cứu và vùng lân cận có ảnh hưởng. Sử dụng phương pháp đa giác Thiessen để xác định lượng mưa tính toán cho mỗi tiểu lưu vực.



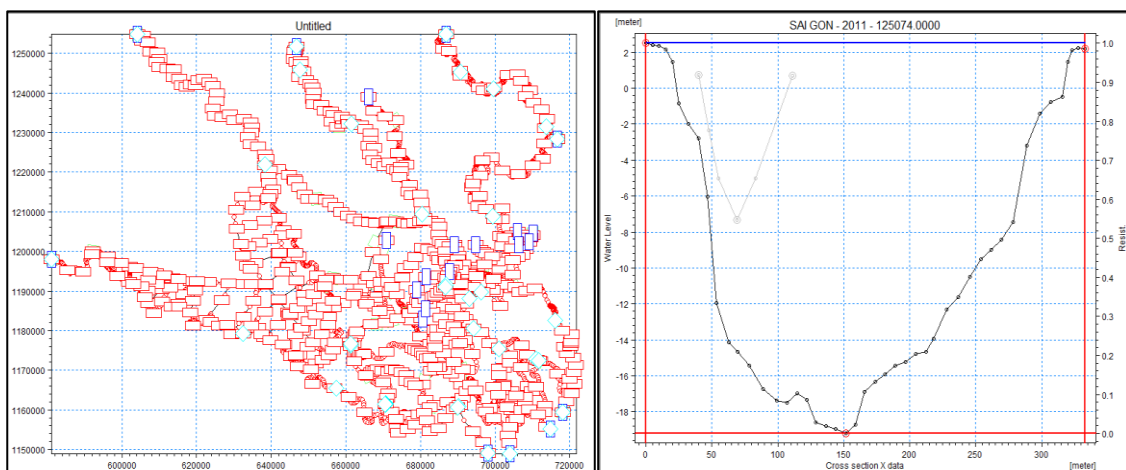
Hình 5. Phân chia các tiểu lưu vực trong mô hình MIKE NAM.

2.4.2. Sơ đồ tính toán thủy lực

Khu vực nghiên cứu là hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai được giới hạn bởi các biên thượng từ hồ Dầu Tiếng, Trị An, hồ Phước Hòa, Mộc Hóa và Cần Đăng. Sơ đồ thủy lực tính từ phía sau đập hồ Dầu Tiếng trên sông Sài Gòn, sau chân đập hồ thủy điện Trị An trên sông Đồng Nai, sau hồ Phước Hòa trên sông Bé, trên sông Vàm Cỏ Đông lấy từ sau trạm thủy văn Cần Đăng, trên sông Vàm Cỏ Tây từ Mộc Hóa ra tới biển Đông tại các cửa: Soài Rạp, Đồng Tranh, Lòng Tàu và Thị Vải.

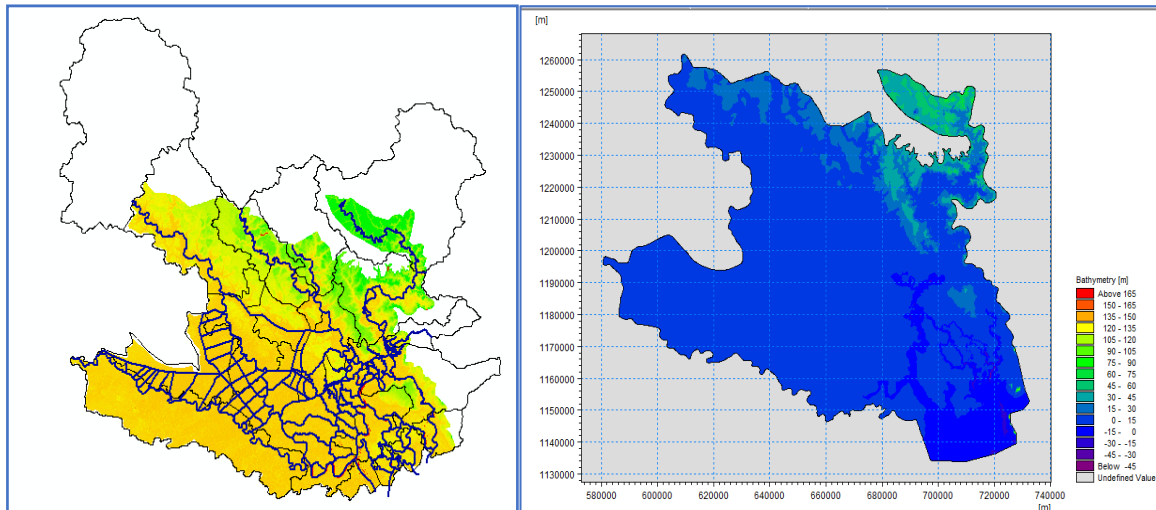
Các biên cho mô hình được lấy từ số liệu lưu lượng, bốc hơi, mưa từ 1980 cập nhật đến năm 2010, số liệu mực nước được cập nhật đến năm 2021.

Sơ đồ thủy lực bao gồm 108 nhánh sông, tổng số mặt cắt ngang sử dụng trong mô hình là 744 mặt cắt phân bố đều trên toàn bộ mạng lưới sông.



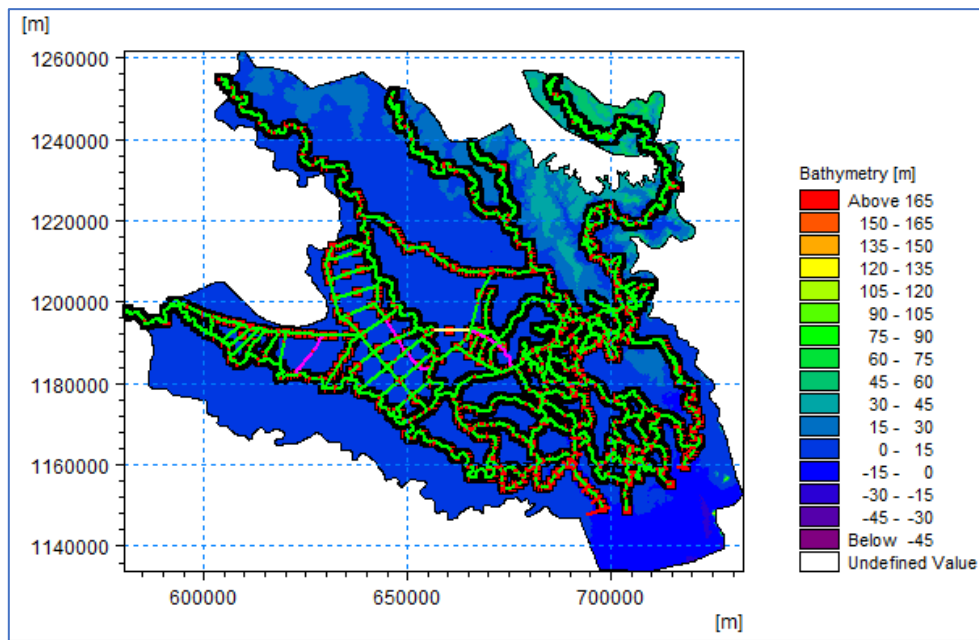
Hình 6. Mô hình thủy lực trong MIKE 11.

Để mô phỏng tương tác dòng chảy trên bãi, mô hình 2 chiều MIKE 21FM HD được thiết lập đảm bảo bao phủ những vùng có khả năng bị ngập, diện tích miền tính toán khoảng 966588 ha. Khu vực nghiên cứu được chia thành 207743 ô lưới, những khu vực có mức độ đô thị hóa cao hoặc những khu vực có độ cao địa hình thay đổi lớn thì kích thước cạnh ô lưới từ 30–100 m, những khu vực bằng phẳng địa hình ít thay đổi thì kích thước cạnh ô lưới từ 100–500 m, khu vực biển từ 500–2000 m (Hình 7).



**Hình 7.** Miền tính toán trong MIKE 21.

Sử dụng công cụ MIKE FLOOD kết nối mô hình một chiều (MIKE11) và mô hình hai chiều (MIKE21) để mô phỏng ngập lụt cho toàn vùng nghiên cứu, trong nghiên cứu sử dụng loại liên kết bên (lateral link) để kết nối hai mô hình lại với nhau phục vụ mô phỏng (Hình 8).

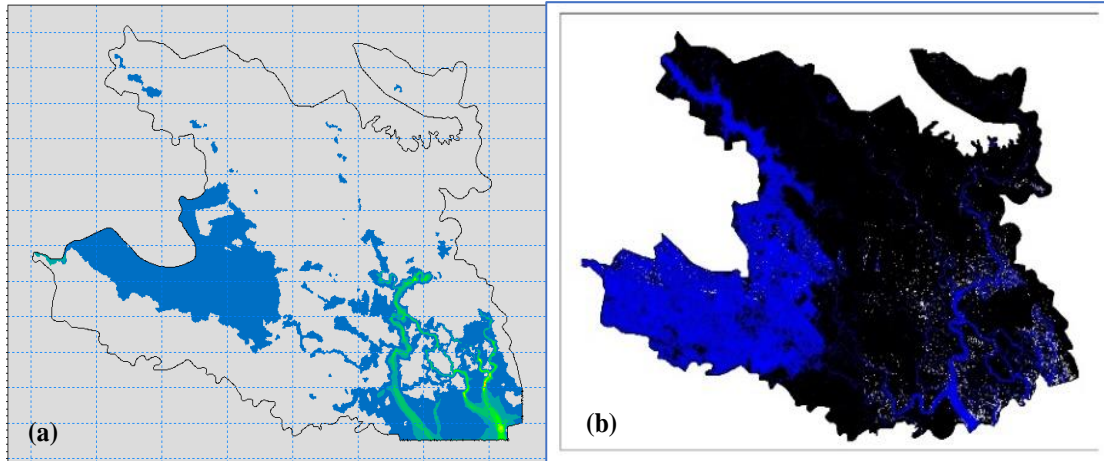


**Hình 8.** Kết nối mô hình thủy lực MIKE11 và MIKE 21.

Bộ thông số mô hình thủy lực thu được thông qua việc hiệu chỉnh và kiểm định với tài liệu thực đo. Sử dụng trận lũ năm 2000 để hiệu chỉnh mô hình thủy lực và cho hệ số tương quan khá tốt ( $Nash > 0,7$ ). Sau khi hiệu chỉnh mô hình sẽ sử dụng bộ thông số này để kiểm định với trận lũ năm 1999, kết quả kiểm định về mực nước cho hệ số tương quan khá tốt ( $Nash > 0,7$ ). Diện ngập từ kết quả của mô hình MIKE 21 với ảnh vệ tinh, kết quả khá tương đồng.

**Bảng 1.** Kết quả hiệu chỉnh mô hình thủy lực tại một số trạm thủy văn năm 2000.

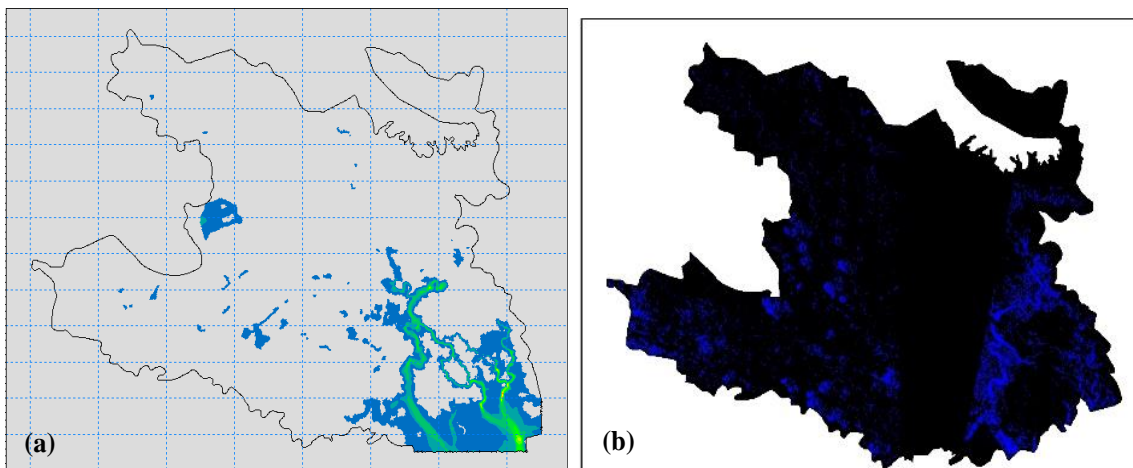
STT	Tên trạm	Hệ số Nash
1	Tân An	0,803
2	Bến Lức	0,875
3	Biên Hòa	0,714
4	Thủ Dầu Một	0,723
5	Phú An	0,919
6	Nhà Bè	0,958



**Hình 9.** So sánh kết quả diện ngập mô phỏng với diện ngập thực tế trên ảnh vệ tinh năm 2000: (a) Kết quả ngập mô phỏng năm 2000; (b) Ảnh vệ tinh năm 2000.

**Bảng 2.** Kết quả kiểm định mô hình thủy lực tại một số trạm thủy văn năm 1999.

STT	Tên trạm	Hệ số Nash
1	Tân An	0,81
2	Bến Lức	0,82
3	Biên Hòa	0,798
4	Thủ Dầu Một	0,752
5	Phú An	0,968
6	Nhà Bè	0,971



**Hình 10.** So sánh kết quả diện ngập mô phỏng với diện ngập thực tế trên ảnh vệ tinh năm 1999: (a) Kết quả ngập mô phỏng năm 1999; (b) Ảnh vệ tinh năm 1999.



### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Các kịch bản tính toán

Tổng cộng có 6 kịch bản tính toán được xây dựng để đánh giá mức độ ngập lụt khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai tương ứng với các mức ảnh hưởng của các tác nhân gây ngập: mưa, thủy triều, lũ thượng nguồn bên Cam Pu Chia tràn về, xả lũ hồ chứa. Các kịch bản cụ thể như sau:

Kịch bản 1: các hồ chứa Trị An, Phước Hòa, Dầu Tiếng xả lũ theo các cấp lũ nhỏ, lưu lượng trên sông Vàm Cỏ Đông và Vàm Cỏ Tây là lưu lượng lớn nhất lịch sử vào năm 2000, lượng mưa tính toán tương ứng với tần suất mưa 10% thống kê từ những trận mưa lớn nhất trong 7 ngày. mực nước biên dưới tương ứng với mực nước cao nhất lịch sử của trạm hải văn Vũng Tàu là 152 cm.

Kịch bản 2: các hồ chứa Trị An, Phước Hòa, Dầu Tiếng xả lũ theo các cấp lũ lớn, lưu lượng trên sông Vàm Cỏ Đông và Vàm Cỏ Tây là lưu lượng lớn nhất lịch sử vào năm 2000, lượng mưa tính toán tương ứng với tần suất mưa 5% thống kê từ những trận mưa lớn nhất trong 7 ngày. mực nước biên dưới tương ứng với mực nước cao nhất lịch sử của trạm hải văn Vũng Tàu là 152 cm.

Kịch bản 3: các hồ chứa Trị An, Phước Hòa, Dầu Tiếng xả lũ theo các cấp lũ rất lớn, lưu lượng trên sông Vàm Cỏ Đông và Vàm Cỏ Tây là lưu lượng lớn nhất lịch sử vào năm 2000, lượng mưa tính toán tương ứng với tần suất mưa 5% thống kê từ những trận mưa lớn nhất trong 7 ngày. mực nước biên dưới tương ứng với mực nước cao nhất lịch sử của trạm hải văn Vũng Tàu là 152 cm.

Kịch bản 4: các hồ chứa Trị An, Phước Hòa, Dầu Tiếng xả lũ theo các cấp lũ nhỏ, lưu lượng trên sông Vàm Cỏ Đông và Vàm Cỏ Tây là lưu lượng lớn nhất lịch sử vào năm 2000, lượng mưa tính toán tương ứng với tần suất mưa 5% thống kê từ những trận mưa lớn nhất trong 7 ngày. mực nước biên dưới tương ứng với mực nước cao nhất lịch sử của trạm hải văn Vũng Tàu là 152 cm.

Kịch bản 5: các hồ chứa Trị An, Phước Hòa, Dầu Tiếng xả lũ theo các cấp lũ lớn, lưu lượng trên sông Vàm Cỏ Đông và Vàm Cỏ Tây là lưu lượng lớn nhất lịch sử vào năm 2000, lượng mưa tính toán tương ứng với tần suất mưa 1% thống kê từ những trận mưa lớn nhất trong 7 ngày. mực nước biên dưới tương ứng với mực nước cao nhất lịch sử của trạm hải văn Vũng Tàu là 152 cm.

Kịch bản 6: các hồ chứa Trị An, Phước Hòa, Dầu Tiếng xả lũ theo các cấp lũ rất lớn, lưu lượng trên sông Vàm Cỏ Đông và Vàm Cỏ Tây là lưu lượng lớn nhất lịch sử vào năm 2000, lượng mưa tính toán tương ứng với tần suất mưa 1% thống kê từ những trận mưa lớn nhất trong 7 ngày. mực nước biên dưới tương ứng với mực nước cao nhất lịch sử của trạm hải văn Vũng Tàu là 152 cm.

**Bảng 3.** Các kịch bản mô phỏng ngập lụt.

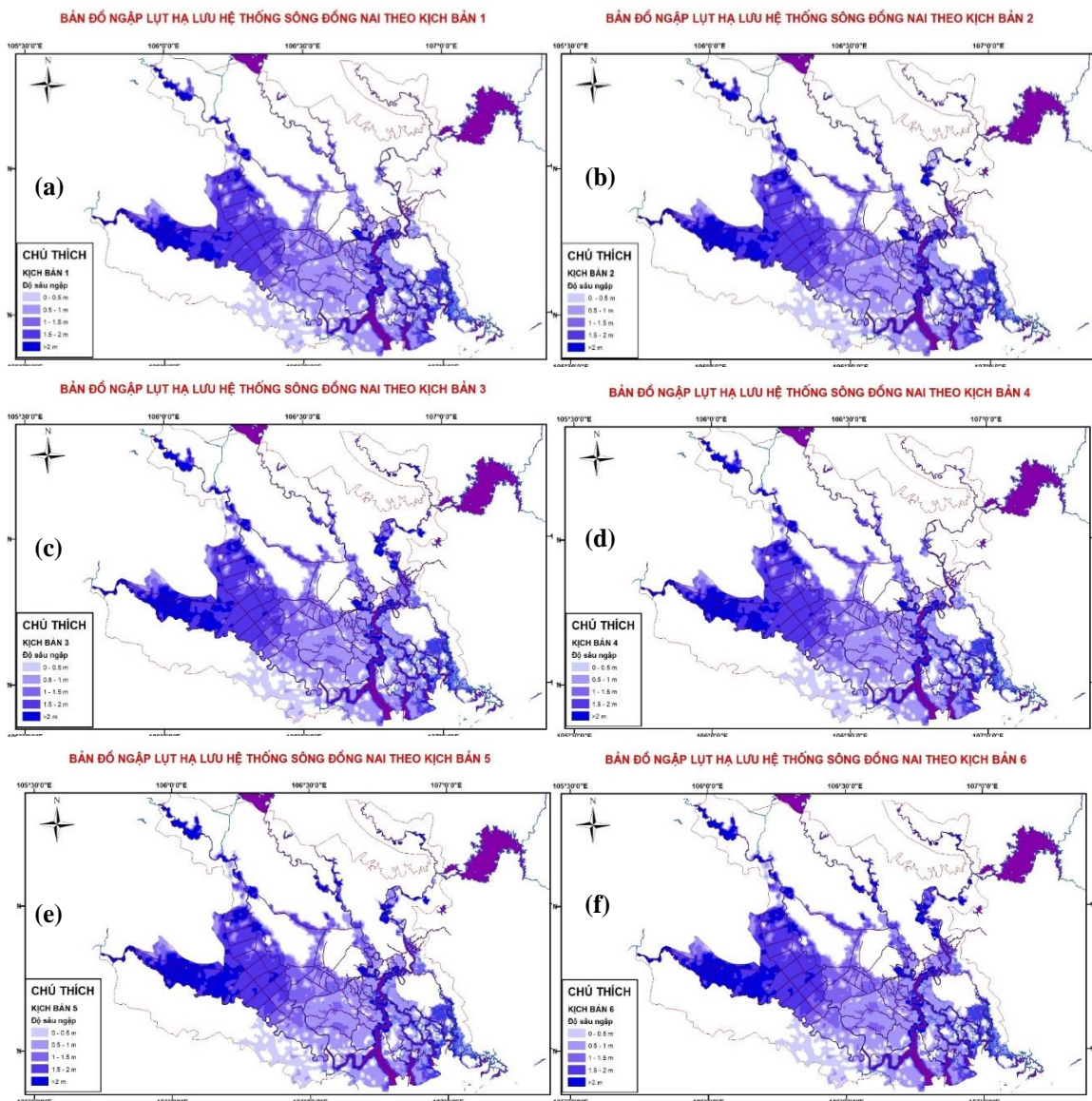
STT	Yếu tố	KB1	KB2	KB3	KB4	KB5	KB6
1	$Q_{\text{Trị An}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	2745	4633	6000	2745	4633	6000
2	$Q_{\text{Dầu Tiếng}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	150	200	300	150	200	300
3	$Q_{\text{Phước Hòa}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	1400	2400	3000	1400	2400	3000
4	$Q_{\text{VCĐ}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	1000	1000	1000	1000	1000	1000
5	$Q_{\text{VCT}} \text{ (m}^3\text{/s)}$	2500	2500	2500	2500	2500	2500
6	$H_{\text{Vũng Tàu}} \text{ (m)}$	152	152	152	152	152	152
7	Mưa (mm)	X10%	X5%	X5%	X5%	X1%	X1%

3.2. Kết quả mô phỏng và đánh giá ngập lụt cho khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai

Kết quả mô phỏng ngập lụt của các kịch bản (\*.dfsu) được xử lý thông qua công cụ Mike Zero Toolbox và ArcGis để phân tích tính toán và xây dựng bản đồ ngập lụt. Bản đồ ngập lụt và kết quả tổng hợp diện tích ngập lụt theo các độ sâu ngập của các kịch bản được thể hiện trên hình 11a–11f. Bảng tổng hợp diện tích ngập lụt theo các kịch bản được thống kê trong bảng 4.

Bảng 4. Bảng tổng hợp diện tích ngập lụt theo các kịch bản.

Diện tích ngập tương ứng độ sâu ngập (ha)							
STT	KB	< 0,5 m	0,5–1 m	1–1,5 m	1,5–2 m	> 2 m	Tổng
1	KB1	52250	134297	67625	82895	30049	367116
2	KB2	54015	128737	70924	86469	39393	379539
3	KB3	53007	127811	77370	88841	40716	387744
4	KB4	53121	129815	67432	85273	36536	372178
5	KB5	53129	126597	73994	83687	50417	387824
6	KB6	51919	123489	79403	86025	52078	392914



Hình 11. Bản đồ ngập lụt hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai theo: (a) Kịch bản 1; (b) Kịch bản 2; (c) Kịch bản 3; (d) Kịch bản 4; (e) Kịch bản 5; (f) Kịch bản 6.

- Kịch bản 1: tổng diện tích ngập là 367116 ha, nhìn chung diện ngập là rất lớn và tập trung chủ yếu ở lưu vực hệ thống sông Vàm Cỏ và rừng ngập mặn Cần Giờ. Đây là những khu vực đồng bằng trũng thấp nên rất dễ bị ngập do ảnh hưởng của các tác nhân gây ngập: lũ, mưa lớn, triều cường, thời gian ngập thường kéo dài. Ngập lụt còn xuất hiện ở một số khu vực nhỏ trũng thấp ven sông Sài Gòn–Đồng Nai, những khu vực này thường có thời gian ngập ngắn do tác động của xả lũ hồ chứa trên địa hình dốc khiến lũ lên nhanh và xuống cũng nhanh. Độ sâu ngập lớn ở khu vực thượng lưu và thấp dần về hạ lưu.

- Kịch bản 2: khi tăng lưu lượng xả lũ ở ba hồ chứa phía thượng lưu và tăng lượng mưa từ mưa tần suất 10% lên mưa tần suất 5% thì diện ngập và độ sâu ngập cũng tăng lên so với kịch bản 1. Tổng diện tích ngập lụt theo kịch bản 2 là 379539 ha (tăng 12423 ha so với kịch bản 1), nhìn chung diện ngập ở khu vực thuộc lưu vực sông Vàm Cỏ và rừng ngập mặn Cần Giờ không thay đổi nhiều, diện ngập chỉ tăng lên đáng kể ở các khu vực ven sông Sài Gòn–Đồng Nai

- Kịch bản 3: so với kịch bản 2 thì lượng mưa không thay đổi mà tăng lưu lượng xả lũ hồ Trị An, Dầu Tiếng, Phước Hòa nên làm tăng diện ngập và độ sâu ngập khu vực ven sông phía hạ du các hồ chứa thuộc các huyện Tân Uyên (Bình Dương), Thuận An (Bình Dương), Vĩnh Cửu (Đồng Nai), Biên Hòa (Đồng Nai), Củ Chi (TPHCM), thành phố Thủ Đức (TPHCM). Còn các khu vực thuộc lưu vực sông Vàm Cỏ và rừng ngập mặn Cần Giờ gần như không có thay đổi về diện ngập và độ sâu ngập. Tổng diện tích ngập trong kịch bản 3 là 387744 ha, tăng 8205 ha so với kịch bản 2.

- Kịch bản 4: so với kịch bản 1 thì lượng mưa tăng từ tần suất mưa 10% lên tần suất mưa 5% còn lưu lượng xả lũ hồ chứa không thay đổi nên nhìn chung diện ngập tăng không đáng kể so với kịch bản 1 mà chỉ làm thay đổi độ sâu ngập lụt. Sự thay đổi độ sâu ngập chủ yếu xuất hiện ở các khu vực đồng bằng trũng thấp thuộc lưu vực sông Vàm Cỏ, còn các khu vực bên phía sông Sài Gòn–Đồng Nai không có sự thay đổi nhiều về độ sâu ngập lụt. Tổng diện tích ngập lụt trong kịch bản 4 là 372178 ha, tăng 5062 ha so với kịch bản 1.

- Kịch bản 5: các yếu tố xả lũ hồ chứa, lũ biên giới, biên thủy triều vẫn giữ nguyên so với kịch bản 2, chỉ thay đổi tần suất mưa 5% thành tần suất mưa 1%. Nhìn chung diện ngập thay đổi không nhiều so với kịch bản 2, khi tăng lượng mưa thì một số khu vực trũng thấp ven sông Đồng Nai có sự gia tăng về diện ngập ở các huyện Long Thành (Đồng Nai), Biên Hòa (Đồng Nai), Tân Uyên (Bình Dương), các khu vực còn lại sự gia tăng diện ngập không nhiều. Tổng diện tích ngập trong kịch bản 5 là 387824 ha, tăng 8285 ha so với kịch bản 2.

- Kịch bản 6: là kịch bản gây bất lợi nhất cho việc tiêu thoát nước khi cả lưu lượng xả lũ hồ chứa và tần suất mưa thiết kế ở mức cao nhất trong 6 kịch bản được đưa ra. So với kịch bản 3, tần suất mưa của kịch bản 6 thay đổi từ 5% thành 1% và các điều kiện còn lại giống kịch bản 3. Nhìn chung diện tích ngập biến động không nhiều, chủ yếu thay đổi độ sâu ngập lụt ở khu vực thuộc lưu vực sông Vàm Cỏ và các khu vực trũng thấp ven sông Sài Gòn–Đồng Nai. Khu vực rừng ngập mặn Cần Giờ nằm sát biển có khả năng tiêu thoát nước nhanh, chủ yếu chịu ảnh hưởng thủy triều nên độ sâu ngập thay đổi không đáng kể. Tổng diện tích ngập trong kịch bản 6 là 392914 ha, tăng 4670 ha so với kịch bản 3.

#### 4. Kết luận

Qua kết quả mô phỏng ngập lụt theo các kịch bản trên có thể thấy khu vực hạ lưu hệ thống sông Đồng Nai là khu vực rất dễ bị ngập do tác động của một hay tổ hợp của các tác nhân gây ngập: lũ, xả hồ chứa, mưa lớn, triều cường. Kết quả nghiên cứu đã cho thấy được mức độ tác động của từng tác nhân gây ngập tới từng khu vực cụ thể.

Khu vực lưu vực sông Vàm Cỏ là khu vực đồng bằng trũng thấp nên rất dễ bị ngập lụt bởi các tác nhân gây ngập, phía thượng lưu chủ yếu bị ngập lụt do lũ biên giới và mưa lớn không tiêu thoát kịp, phía hạ lưu gần biển và có địa hình thấp hơn nên chủ yếu bị ngập do tác động của triều cường.

Khu vực thuộc lưu vực sông Sài Gòn–Đồng Nai đoạn từ sau hồ Phước Hòa, hồ Trị An, hồ Dầu Tiếng tới khu vực ngã ba Mũi Đèn Đỏ, vị trí nhập lưu của sông Sài Gòn vào sông Đồng Nai,



khu vực này có địa hình thấp dần từ thượng lưu tới hạ lưu, chuyển tiếp từ dạng địa hình trung du sang đồng bằng nên khi xả lũ hồ chứa với lưu lượng lớn vượt quá khả năng tiêu thoát nước của lòng dẫn khiến nước tràn bờ gây ngập khu vực hai bên bờ sông. Một số khu vực trũng thấp cục bộ, hệ thống tiêu thoát nước kém nên khi xảy ra mưa lớn cũng dẫn tới ngập lụt.

Nghiên cứu chưa tính toán chi tiết cho ngập lụt cục bộ khu vực đô thị do mưa lớn, tuy nhiên, kết quả xây dựng bản đồ ngập lụt và phân tích kết quả ngập chi tiết trong từng kịch bản có thể được tham khảo phục vụ cho công tác phòng chống thiên tai và quy hoạch phát triển kinh tế xã hội của khu vực một cách bền vững.

**Đóng góp tác giả:** Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: L.T.Q.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: L.T.Q., L.Đ.D., T.N.A.; Xử lý số liệu: L.T.Q.; Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình: L.T.Q.; Viết bản thảo bài báo: L.T.Q.; Chỉnh sửa bài báo: L.T.Q., L.Đ.D., T.N.A.

**Lời cảm ơn:** nghiên cứu được thực hiện dưới sự hướng dẫn và hỗ trợ của Tổng cục Khí tượng Thủy văn và Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả xin cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây và không có sự tranh chấp lợi ích gì trong nhóm tác giả.

#### **Tài liệu tham khảo**

1. Pagano, T.C. Evaluation of Mekong River commission operational flood forecasts, 2000–2012. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2014**, 18, 2645–2656.
2. Dat, T.T.; Tri, D.Q.; Truong, D.D.; Hoa, N.H. Application of Mike Flood Model in Inundation Simulation with the Dam–break Scenarios: A Case Study of DakDrinh Reservoir in Vietnam. *Int. J. Sci. Eng.* **2019**, 12(01), 60–70.
3. Yu, W.; Kim, Y.; Lee, D.E.; Lee, G. Hydrological assessment of basin development scenarios: Impacts on the Tonle Sap Lake in Cambodia. *Quat. Int.* **2018**, 503(A), 115–127.
4. Bình, H.T.; Anh, T.N.; Khá, Đ.Đ. Ứng dụng mô hình MIKE FLOOD tính toán ngập lụt hệ thống sông Nhật Lệ tỉnh Quảng Bình. *Tap chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội* **2010**, 3S, 285–294.
5. Đức, Đ.Đ.; Anh, T.N.; Như, N.Y.; Sơn, N.T. Ứng dụng mô hình MIKE FLOOD tính toán ngập lụt hệ thống sông Nhuệ – Đáy trên địa bàn thành phố Hà Nội. *Tap chí Khoa học Đại học Quốc gia Hà Nội* **2011**, 1S, 37–43.
6. Huân, H.V. và cs. Đề tài cấp Nhà nước KC.08–29: Nghiên cứu đề xuất các giải pháp khoa học công nghệ để ổn định lòng dẫn hạ du hệ thống sông Đồng Nai – Sài Gòn phục vụ phát triển kinh tế–xã hội vùng Đông Nam Bộ. Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam, 2005.
7. Kim, N.Q. Nghiên cứu giải pháp tổng thể kiểm soát ngập lụt vùng hạ lưu sông Đồng Nai – Sài Gòn và vùng lân cận. Cơ sở II, Trường Đại học Thủy lợi, 2013.
8. Bình, D.V. Impacts of upstream dam development on flow, sediment and morphological changes in Vietnamese Mekong delta. Ph.D Thesis, Kyoto University, 2019.
9. Đắc, N.T. Mô hình toán cho dòng và chất lượng nước trên hệ thống kênh sông. Nhà xuất bản Nông nghiệp, TP. HCM, 2005, tr. 234.
10. Niên, N.A.; Lanh, Đ.T.; Khang, N.D.; Dương, N.B. Một số kết quả trong cải tiến mô hình KOD.WQPS. *Tap chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn* **2008**, 5, 78–81.
11. DHI. MIKE 11 User Manual, Danish Hydraulic Institute, Copenhagen, 2017.
12. DHI. MIKE 21 User Manual, Danish Hydraulic Institute, Copenhagen, 2017.
13. DHI. MIKE Flood User Manual, Danish Hydraulic Institute, Copenhagen, 2017.

14. Phong, N.T. Nghiên cứu ngập lụt vùng ven sông Sài Gòn – Đồng Nai Thành phố Hồ Chí Minh do chế độ xả lũ các hồ Dầu Tiếng, Trị An, Thác Mơ kết hợp với mưa, triều cường và lũ trên sông Vàm Cỏ. Greenstone library software, 2011.  
<http://www.nsl.hcmus.edu.vn/greenstone/collect/hnkhbk/archives/HASH1e78.dir/doc.pdf>
15. Quỳnh, N.P.; Hải, Đ.Đ.; Lam, Đ.H.; Thương, T.V. Đánh giá biến động mực nước và ngập lụt vùng hạ du sông Sài Gòn dưới tác động của đô thị hóa, xây dựng công trình chống ngập và xả lũ các hồ chứa nước thượng lưu. *Tap chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi* **2018**, 49, 1–12.
16. Song, P.V.; Thanh, Đ.Đ.; Bảo, L.X. Kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của việc xả lũ hồ chứa Dầu Tiếng lên hạ du sông Sài Gòn. *Tap chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi* **2013**, 19, 55–66.
17. Dũng, Đ.Đ.; Huy, N.V. Báo cáo tình hình quản lý quy hoạch lưu vực sông Đồng Nai năm 2011, Viện Quy hoạch Thủy lợi Miền Nam, 2012.  
<https://siwrp.org.vn/admin/upload/BaoCaoRBODongNai2011.pdf>.
18. Niên giám Thống kê Việt Nam năm 2020. Nhà xuất bản Thống kê, Hà Nội, 2021, tr.1055.
19. Quyết định số 1895/QĐ-TTg ngày 25/12/2019 về việc ban hành quy trình vận hành liên hồ chứa trên lưu vực sông Đồng Nai.
20. Quyết định 05/2020/QĐ-TTg về Quy định mực nước báo động tương ứng với các cấp báo động lũ trên các sông thuộc phạm vi cả nước.
21. Quyết định số 5279/QĐ-BNN-TCTL về việc ban hành quy trình vận hành hồ chứa nước Phước Hòa tỉnh Bình Dương, Bình Phước.
22. Quyết định số 2700/QĐ-BCT về việc phê duyệt quy trình vận hành hồ chứa thủy điện Trị An.

## **Simulation and development of flood maps in downstream of Dong Nai river system**

**Le Thanh Quang<sup>1\*</sup>, La Duc Dung<sup>2</sup>, Tran Ngoc Anh<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Southern Regional Hydro–Meteorological Center; lequangwru@gmail.com;

<sup>2</sup> Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration; dunglaktv@gmail.com

<sup>3</sup> Faculty of Hydrology Meteorology and Oceanography, VNU University of Sciences, Vietnam national University, Hanoi; tranngocanh@hus.edu.vn

**Abstract:** Flooding in the downstream area of the DongNai river system is affected by 4 main causes: rain, tide, reservoir flood discharge, and upstream flood on the Cambodian side. The study has built the MIKE FLOOD modeling toolkit to simulate and build inundation maps for the downstream area of the DongNai river system. The model parameters are calibrated and tested with the real data series of the two severe floods in 1999 and 2000 giving a strong correlation between the calculated data and the actual measurement. Then, the model set is used to simulate and evaluate flooding according to the scenarios of reservoir flood discharge, upstream flood, heavy rain and high tide. The results of hydraulic calculations and the construction of a flood map could be use to determine the level of influence of the inundating agents on each specific area and support the relevant agencies to come up with more suitable solutions for flood control in each region, and at the same time serve as a basis for planning for socio–economic sustainable development...

**Keywords:** MIKE FLOOD; Flooding.

Bài báo khoa học

## Những nguyên nhân chính tác động đến ngập Thành phố Hồ Chí Minh

Nguyễn Minh Giám<sup>1\*</sup>, Lê Ngọc Quyên<sup>1</sup>, Nguyễn Nam Đức<sup>1</sup>, Đặng Quang Thanh<sup>1</sup>, Lê Đình Quyết<sup>1</sup>, Nguyễn Ngọc Nguyễn<sup>2</sup>, Nguyễn Thị Phương Chi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ: nmg@kttvnb.vn; quyentccb@gmail.com; ngnamduc@gmail.com; dangquangthanht@gmail.com; quiet.le74@gmail.com

<sup>2</sup> Sở Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh; nnnguyen82@gmail.com

<sup>3</sup> Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh; ntpchi@hcmunre.edu.vn

\*Tác giả liên hệ: nmg@kttvnb.vn; Tel.: +84-968248899

Ban Biên tập nhận bài: 27/1/2023; Ngày phản biện xong: 20/2/2023; Ngày đăng bài: 25/3/2023

**Tóm tắt:** Thành phố Hồ Chí Minh với vị trí địa lý và điều kiện tự nhiên tương đối thuận lợi, một thành phố năng động và phát triển mạnh mẽ. Song vẫn còn tồn tại nhiều bất cập, mà bất cập lớn nhất là tình trạng ngập ở thành phố. Thành phố đã đưa ra nhiều giải pháp nhằm giảm ngập lụt, nhưng thực tế thì hiệu quả của các giải pháp đó cũng không có tác dụng bao nhiêu mỗi khi có mưa lớn và triều cường lớn tình trạng ngập nước vẫn còn xảy ra. Có nhiều nguyên nhân gây ra ngập, trong báo cáo này sử dụng số liệu liên quan đến lượng mưa và mực nước triều tại các Trạm Khí tượng Tân Sơn Hòa, Trạm Thủy văn Phú An và Trạm Hải văn Vũng Tàu, thực hiện phân tích các yếu tố này và làm rõ thêm diễn biến theo thời gian của các yếu tố này đến ngập Thành phố Hồ Chí Minh.

**Từ khóa:** Khí tượng; Thủy văn; Triều cường; Mưa lớn; Ngập, Thành phố Hồ Chí Minh.

### 1. Mở đầu

Thành phố Hồ Chí Minh (TPHCM) nằm ở hạ lưu lưu vực sông Đồng Nai và giáp với biển Đông, nơi có địa hình thấp và khá bằng phẳng, chịu tác động trực tiếp dòng chảy lũ từ thượng lưu thông qua các sông Đồng Nai, Sài Gòn cũng như những tác động trực tiếp từ triều biển Đông tốc độ đô thị hóa tăng nhanh gắn liền với nhu cầu phát triển hạ tầng đô thị cùng với lún đất, kênh rạch và các vùng trũng bị san lấp dành cho xây dựng đô thị, nên thường xuyên xảy ra tình trạng ngập úng. Để chủ động đối phó với tình trạng ngập úng trên địa bàn, TPHCM đã có những đầu tư không nhỏ về công sức, vốn để giải quyết vấn đề này. Tuy nhiên có rất nguyên nhân gây ngập TPHCM do đó TPHCM vẫn tiếp diễn ngập triền miên [1-2].

Vấn đề ngập lụt không chỉ diễn ra tại Thành phố Hồ Chí Minh mà nó còn diễn ra ở nhiều thành phố trên thế giới. Các nhà khoa học đã nghiên cứu thực trạng ngập lụt và đưa ra các giải pháp để chống ngập lụt đô thị. Giáo sư Danai Thaitakoo, một nhà nghiên cứu của Đại học Chulalongkorn Thái Lan, đưa ra một số nguyên nhân gây ngập nước tại Bangkok như sau: mưa lớn, lún sụt mặt đất do khai thác nước ngầm, nước ngoại lai tràn về, triều cao, hệ thống tiêu thoát không đủ khả năng thoát nước, dòng chảy tràn gia tăng do quá trình đô thị hóa. Cũng theo Giáo sư Danai Thaitakoo Bangkok cần được quy hoạch chống ngập theo kiểu đê bao khép kín và sử dụng trạm bơm để tiêu thoát nước mưa cùng với hệ thống các cống ngăn triều hoạt động theo nguyên tắc điều khiển từ xa. Hệ thống radar khí tượng dự báo mưa và cảnh báo lũ sớm cần được đầu tư. R. Lasage và cộng sự Đánh giá hiệu quả của các chiến



lược thích ứng với ngập lụt cho TP.HCM kênh rạch và các vùng trũng bị san lấp dành cho xây dựng đô thị.... Ở Việt Nam, vấn đề nghiên cứu hiện trạng và giải pháp phòng chống ngập lụt đô thị tại TPHCM đã có nhiều nhà khoa học nghiên cứu về vấn đề trên như các Lê Huy Bá, Nguyễn Tất Đắc, Phùng Chí Sỹ, Lê Văn Trung, Nguyễn Kỳ Phùng, Tô Văn Trường, Nguyễn Kim Lợi, Hồ Long Phi, Lê Sâm, Lê Xuân Thuyên, Đào Nguyên Khôi, Ngân hàng Thế giới, Ngân hàng phát triển Châu Á... đã đưa một số nguyên nhân gây ngập lụt tại Thành phố Hồ Chí Minh và những giải pháp công trình và phi công trình chống ngập nước. Từ những nghiên cứu trong và ngoài nước cùng với những hoạt động phục vụ về khí tượng thủy văn và các ý kiến của nhiều chuyên gia về nguyên nhân gây ngập TPHCM. Dưới đây có thể phân loại ra 2 nguyên nhân chính: Nguyên nhân (khách quan) tự nhiên và nguyên nhân (chủ quan) con người. Trong báo cáo này lựa chọn những nguyên nhân chính sau:

Về nguyên nhân khách quan có các nguyên nhân chính sau:

i. Mưa với cường độ lớn – thời gian tập trung dài: Thời gian qua, thời tiết diễn biến thất thường dẫn đến xuất hiện nhiều trận mưa có cường độ lớn, thời gian mưa tập trung dài hơn thì mức độ ngập úng càng nghiêm trọng hơn [3–4].

ii. Thủy triều biển Đông cao: Do ảnh hưởng của triều biển Đông tại những vùng diện tích đất có cao độ nhỏ hơn mực nước thủy triều sẽ chịu ngập, đỉnh triều cao hơn các mức tính toán cũ. Ngập úng có thể lớn hơn khi có triều cường truyền vào trong sông kênh, kết hợp lũ từ các công trình thượng lưu xả về, đồng thời với mưa lớn xảy ra cùng với gió mùa Đông Bắc [4].

iii. Do lũ thượng nguồn: lũ trực tiếp từ các hồ thượng lưu các sông Đồng Nai, Sài Gòn ảnh hưởng trực tiếp đến TPHCM.

iv. Lún đất: với nhiều nghiên cứu về tình trạng lún mặt đất tại thành phố, đã làm hạ thấp các nền đất của TPHCM dẫn đến độ ngập tăng lên. Việc khai thác nước ngầm quá mức được nhận định là một trong những nguyên nhân trực tiếp góp phần gây hiện tượng sụt lún, “biến dạng” mặt đất, khiến tình trạng ngập ngày càng trầm trọng và khó khắc phục hơn. Theo nhiều kết quả nghiên cứu đo đạc, lũy kế từ tính từ năm 1990 đến 2022 TPHCM đã sụt lún khoảng 1m. Trong đó, 10 quận có mức độ sụt lún đáng kể, gồm các quận: 2 (nay là TP.Thủ Đức), 7, 8, 12, Gò Vấp, Tân Bình, Bình Thạnh, Phú Nhuận, Bình Tân và TP.Thủ Đức. Riêng Q.Tân Bình và Q.12 được ghi nhận có mức sụt lún nền lớn nhất [5].

v. Gió Đông Bắc: Khi gió Đông Bắc mạnh thổi về phía Nam và TPHCM trùng với kỳ triều cường làm cho gia tăng lượng nước từ cửa biển vào sông kênh rạch, nước dâng bất thường đồng thời lại tạo ra “đê lỏng” vùng cửa biển hạn chế rút nước ra biển [6]. Số liệu tại trạm hải văn Vũng Tàu lúc 3 giờ 30 ngày 25/01/2023 là 4,46 m cao nhất trong vòng 45 năm qua (tổ hợp triều cường cao + gió mùa đông bắc mạnh) [7].

Về nguyên nhân chủ quan có các nguyên nhân chính sau:

i. Đô thị hóa làm mất đi mặt phủ thấm nước: TPHCM nơi đây là điểm cuối của lưu vực sông Sài Gòn–Đồng Nai. Nước của cả lưu vực rộng lớn dồn về TPHCM và đổ ra biển phía Đông Nam, có diện tích lưu vực ảnh hưởng lớn gấp 20 lần. Chế độ thủy văn của TPHCM rất phức tạp do hệ thống kênh rạch chằng chịt. Đô thị hóa diễn ra, con người chiếm chỗ của nước và đẩy nước đi nơi khác. Đô thị hóa cũng xóa các mặt phủ thấm nước một cách đáng kể. Trước đây, đó là những nơi thấm nước hoặc lưu giữ nước nay trở thành chỗ ở, công trình, diện tích mặt phủ thấm nước của TPHCM mất đi phần lớn. Đô thị hóa còn làm biến mất các dòng chảy tự nhiên, lưu vực bị chia cắt hình thành các lưu vực mới. Một điều khá quan trọng là đô thị hóa tạo ra dòng chảy tràn lớn hơn rất nhiều so với trước đây. Thay thế kênh rạch bằng cách công hóa là một trong những nguyên nhân hủy hoại dòng chảy tự nhiên lớn, gây tác động đến nước.

ii. Tiêu tán năng lượng thủy triều vùng cửa sông bị suy giảm: Điều kiện triệt giảm năng lượng thủy triều vùng cửa sông đã bị suy giảm do hệ thống rừng ngập mặn vùng cửa sông bị thu hẹp làm cho sóng thủy triều ít bị suy giảm năng lượng nên có điều kiện đi sâu vào nội đô TPHCM gây ngập trong nội thành.

iii. Số liệu và phương pháp chưa đảm bảo: số liệu nghiên cứu chưa đáp ứng, dùng số liệu ngắn hạn để tính toán và phương pháp tính chưa phù hợp với TPHCM nên hoạch định cho các dự án, giải pháp mang tính dài hạn mau trở nên lạc hậu.

iv. Hệ thống sông rạch đã lâu ngày chưa nạo vét: Hệ thống sông, kênh, rạch tại TPHCM chẳng chịt là một lợi thế điều tiết khí hậu, đem lại không gian thoáng mát và thoát nước. Thế nhưng, không gian sông nước đang dần bị thu hẹp, phần lớn đã bị bồi lắng, tắc nghẽn dòng chảy, gây ngập. Việc nạo vét, khơi thông dòng chảy được các tuyến kênh, rạch còn rất nhiều hạn chế.

v. Ý thức của một số người dân còn hạn chế: tình trạng xả rác ra kênh rạch, cửa xả hệ thống cống thoát nước vẫn còn rất phổ biến làm thu hẹp dòng chảy, tắc nghẽn hệ thống thoát nước, hồ ga, cửa xả. Nhiều nơi bị lấn chiếm, san lấp trái phép làm thu hẹp dòng chảy, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến khả năng thoát nước của khu vực đặc biệt có nhiều đoạn sông, kênh, rạch bị khai tử.

vi. Hệ thống cống thoát nước chưa đáp ứng: hệ thống cống thoát nước quá tải cho nên không đáp ứng được nhu cầu thoát nước đặc biệt khi có mưa to và thời gian mưa kéo dài [8–9].

vii. Công tác quy hoạch còn hạn chế, thiếu nhạc trưởng: để chống ngập hiệu quả, việc chống ngập cần phải tìm nguyên nhân từng điểm ngập từ đó xây dựng quy hoạch phải đồng bộ nhiều ngành, kế hoạch quản lý xử lý lâu dài đầu tư đồng bộ theo quy hoạch. Nhiều quy hoạch được phê duyệt hiện đã không còn phù hợp, nhưng chưa kịp thời bổ sung, điều chỉnh. [10].

viii. Tiến độ triển khai quy hoạch còn rất chậm: việc triển khai chậm các dự án trong quy hoạch đã dẫn đến chất lượng, điều kiện triển khai các giải pháp chống ngập không đáp ứng yêu cầu thực tế. Điều này có thể thấy rõ ở nhiều tuyến đường dù đã triển khai dự án chống ngập nhưng vẫn xuất hiện ngập.

ix. Chưa tính toán được hết các cực trị khí tượng thủy văn: nên thông số thiết kế theo quy hoạch đã không còn phù hợp với tình hình thực tế khiến một số tuyến thoát nước dù mới được đầu tư cũng trở nên quá tải.

x. Tiêu chuẩn thiết kế quy định nhiều khi không còn phù hợp trong điều kiện biến đổi khí hậu nên một số tuyến đường khi gặp mưa vượt tần suất thiết kế vẫn xuất hiện tình trạng ngập.

xi. Bùng nổ dân số cơ học: những năm gần đây, dân số tại TPHCM gia tăng đột biến dẫn đến phá vỡ quy hoạch, kèm theo tốc độ đô thị hóa quá nhanh, bê tông hóa bề mặt ngày càng tạo sức ép cho các nhiều mặt trong đó việc sử dụng nước và thải nước gia tăng nhiều ra hệ thống thoát nước không đáp ứng được việc thoát nước gây ngập.

xii. Hiện trạng cao độ nền thấp: cốt nền xây dựng đô thị không đồng bộ đã không tạo độ dốc phù hợp cho việc thoát nước và nhiều khu vực còn thấp hơn mức nước sông khi có triều cường nên không thể tiêu thoát tự nhiên ra ngoài.

xiii. Tầm nhìn về quản lý và phát triển đô thị còn hạn chế: thành phố lớn như TPHCM, tầm nhìn về phát triển đô thị là cực kỳ quan trọng, vì nó quyết định đến sự bố trí và phát triển các khu dân cư, hệ thống giao thông thủy-bộ và hệ thống tiêu thoát nước. Chưa có tầm nhìn về phương án bền vững và phù hợp nhu cầu phát triển của Thành phố, cần có những nguyên tắc phát triển cho vùng đất cao và thấp để TPHCM phát triển bền vững trong nguy cơ biến đổi khí hậu và nước biển dâng, lún đất [11].

## **2. Phương pháp nghiên cứu và tài liệu thu thập**

### *2.1. Giới thiệu khu vực nghiên cứu*

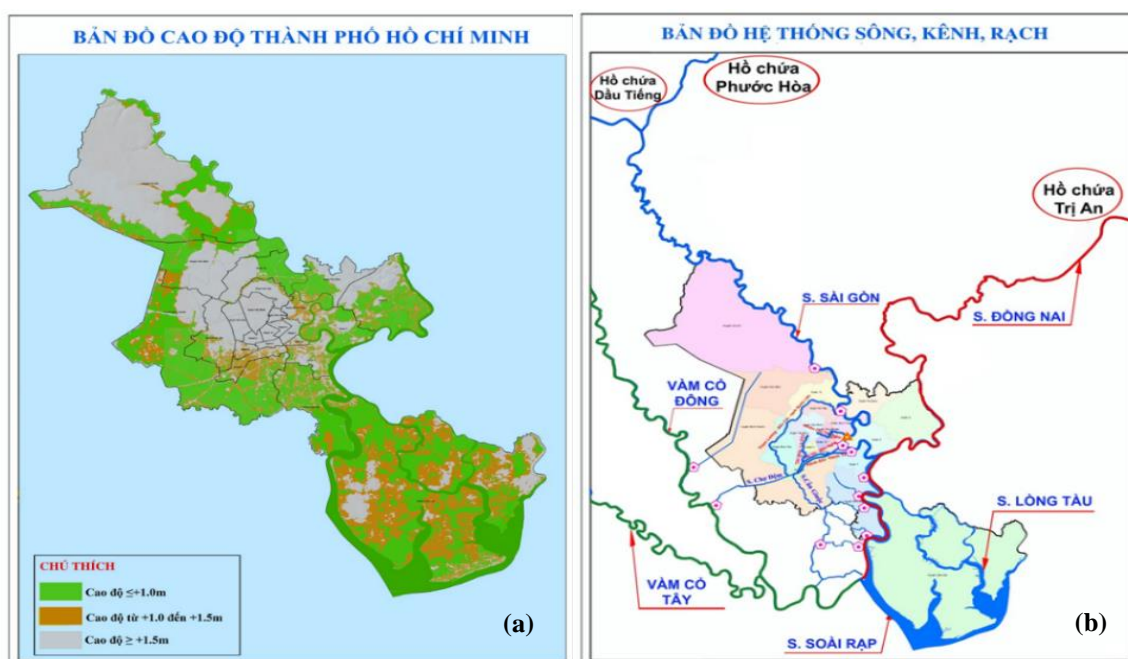
Thành phố Hồ Chí Minh là một trong những thành phố lớn nhất Việt Nam, đồng thời là một trong những trung tâm kinh tế, chính trị, văn hóa và giáo dục quan trọng nhất của Việt Nam. Hiện nay, Thành phố Hồ Chí Minh (TPHCM) là thành phố trực thuộc Trung

ương được xếp loại đô thị loại đặc biệt của Việt Nam, cùng với Thủ đô Hà Nội. Tổng diện tích thành phố 2.095,06 km<sup>2</sup> với dân số trên 10 triệu người. Theo Quyết định số 2076/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ ban hành ngày 22/12/2017 về việc phê duyệt Điều chỉnh quy hoạch xây dựng vùng Thành phố Hồ Chí Minh đến năm 2030 và tầm nhìn đến năm 2050 đã chỉ ra định hướng phát triển của Vùng Thành phố Hồ Chí Minh bao gồm toàn bộ ranh giới hành chính Thành phố Hồ Chí Minh và 07 tỉnh lân cận là Bà Rịa–Vũng Tàu, Bình Dương, Bình Phước, Tây Ninh, Long An, Đồng Nai, Tiền Giang. Tổng diện tích toàn vùng khoảng 30.404 km<sup>2</sup>. Thành phố Hồ Chí Minh là thành phố ven biển, có sông rạch chằng chịt, nền đất thấp nên bị ảnh hưởng rất lớn của thủy triều. Đặc biệt, theo Trung Tâm Điều hành Chương trình Chống ngập nước (trước đây) thành phố có tổng số kênh rạch là 2.953 tuyến với tổng chiều dài là 4.369 km nằm trọn trong 3 con sông lớn là sông Đồng Nai, sông Sài Gòn, Vàm Cỏ. Tình trạng ngập chịu tác động rất lớn từ chế độ tiêu thoát nước của 3 con sông này. Vào thời điểm triều cường dâng cao, nhiều khu vực không có mưa vẫn xảy ra ngập vì cốt nền thấp hơn cả mực triều (Bảng 1 và Hình 1a). Vì thế mà trong những năm gần, thành phố thường xuyên phải triển khai hàng loạt công trình chống ngập như làm bờ bao, cống ngăn triều, nâng cấp cống thoát nước, nâng đường... nhưng tình trạng ngập vẫn gia tăng. Ngoài ra phía thượng lưu thành phố có 3 hồ chứa như Dầu Tiếng, Phước Hòa và Trị An ảnh hưởng trực tiếp đến TPHCM, lũ từ lưu vực sông Mê Kông thông qua hệ thống kênh rạch nối liền các sông Vàm Cỏ với vùng TPHCM làm cho mực nước sông, kênh tăng cao. Thủy triều vào thành phố trên sông Vàm Cỏ tại 3 cửa chính: Kênh Xáng Lớn, Bến Lức, Thủ Bộ; trên sông Sài Gòn–Đồng Nai có 10 cửa chính: Rạch Tra, Vàm Thuật, Thị Nghè, Bến Nghé, Tân Thuận, Phú Xuân, Mương Chuối, Sông Kinh, Kinh Lộ và Kinh Hàng [12].

**Bảng 1.** Diện tích và cao độ địa hình TPHCM (\*).

Cao độ	Diện tích	%
≤ +1,0m	876,3 km <sup>2</sup>	chiếm 41,8%
+1,0 đến +1,5m	455 km <sup>2</sup>	chiếm 21,72%
≥ +1,5m	783,44 km <sup>2</sup>	chiếm 37,39%

\*Nguồn: Trung Tâm Điều hành Chương trình Chống ngập nước TPHCM (TTCN) (trước đây)



**Hình 1.** (a) Bản đồ cao độ TPHCM; (b) Sơ đồ hệ thống sông, rạch tại TPHCM (Nguồn: TTCN).

## 2.2. Tài liệu thu thập

Thượng nguồn các sông TPHCM đều chịu tác động của các hồ chứa (Hình 1b), nhiều năm qua Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ cùng với Ban Chỉ Huy Phòng thủ dân sự – Phòng chống Thiên tai và Tìm Kiếm cứu Nạn Thành Phố Hồ Chí Minh và chủ các hồ chứa Dầu Tiếng, Trị An, Thác Mơ phối hợp để điều tiết nước về Thành phố Hồ Chí Minh không ảnh hưởng nhiều của lũ thượng nguồn do đó trong báo cáo này không phân tích diễn biến lũ thượng nguồn. Trong mùa khô của Nam Bộ khí gió mùa phát triển mạnh thổi về vùng biển Nam Bộ dưới sự ảnh hưởng của lực Coriolis làm dòng hải lưu có hướng gần như vuông góc với bờ biển Nam Bộ chảy mạnh vào sông làm mực nước sông và độ mặn xâm nhập sâu gây hiện nước dâng, độ mặn nước sông tăng cao bất thường. Do đó trong báo cáo này không phân tích về diễn biến lũ và gió mùa Đông Bắc gây ngập cho TPHCM. Tài liệu sử dụng bao gồm mưa ngày từ năm 1980 đến 2022 của Trạm Khí tượng Tân Sơn Hòa (TPHCM), số liệu mực nước giờ từ năm 1980 đến 2022 của Trạm Thủy văn Phú An (sông Sài Gòn) và các tài liệu báo cáo liên quan đến tình hình khí tượng thủy văn và ngập tại TPHCM [7].

## 2.3. Phương pháp thực hiện

### 2.3.1. Phương pháp thu thập, tổng hợp tài liệu

Phương pháp này được thực hiện trên cơ sở kế thừa, phân tích và tổng hợp các nguồn tài liệu và số liệu thông tin có liên quan một cách có chọn lọc như số liệu từ các báo cáo, tài liệu quốc tế và trong nước, từ những nghiên cứu/báo cáo đã được công bố.

### 2.3.2. Phương pháp chuyên gia

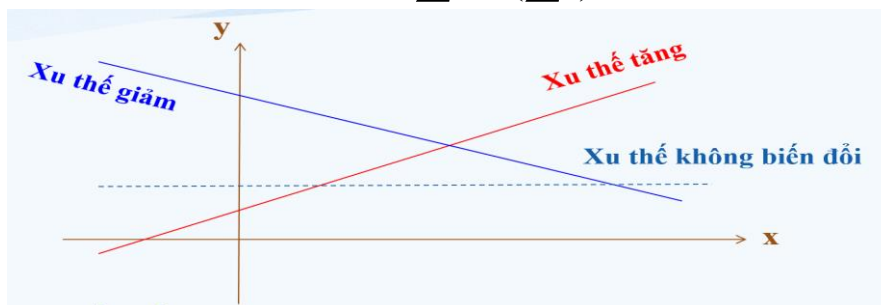
Phương pháp này huy động được kinh nghiệm và hiểu biết của những chuyên gia liên ngành về lĩnh vực nghiên cứu, từ đó sẽ cho các kết quả có tính thực tiễn và khoa học cao. Phương pháp này được thực hiện thông qua việc tham vấn ý kiến của các chuyên gia trong các lĩnh vực khí tượng thủy văn và ngập.

### 2.3.3. Phương pháp xác định xu thế

Thực hiện thu thập các nguồn tài liệu về mưa, mực nước. Xử lý, phân tích, kiểm tra và tổng hợp một cách chọn lọc, đánh giá và sử dụng cho yêu cầu, mục đích của nghiên cứu. Xem xét chuỗi thời gian của yếu tố khí tượng thủy văn; Để xác định xu thế của các yếu tố sử dụng phương trình hồi quy tuyến tính. Xem xét hệ số góc của đường xu thế tuyến tính (Hình 2):  $y = a_0 + a_1x$ ; n cặp số liệu  $(x_i, y_i)$ .

$$a_1 = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2)$$



Hình 2. Đường xu thế tuyến tính.

Trong đó x là yếu tố nào đó; x là thời gian; xu thế tăng:  $a_1 > 0$ ; xu thế giảm:  $a_1 < 0$ ; xu thế không biến đổi:  $a_1 \sim 0$ .



### 2.3.4. Phương pháp phân tích thống kê, mô tả

Thống kê mô tả được sử dụng trong nghiên cứu nhằm mô tả tập hợp dữ liệu khí tượng thủy văn, bao gồm lượng mưa, mực nước nhiều năm (1980–2022) dưới dạng số và biểu đồ trực quan. Các biểu đồ, các đường xu thế, hệ số được tính toán và biểu diễn trên nền tảng của Excel, python trên Visual Studio 2022. Từ chuỗi số liệu mực nước giờ thực hiện tính các đặc trưng thống kê:

Mực nước trung bình năm, tháng, ngày:

$$H_{Av} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i \quad (3)$$

Với năm: ( $n = 1 \times 24 \times (365,366)$ ); tháng: ( $n = 24 \times (28, 29, 30, 31)$ ); ngày: ( $n = 24$ )

Mực nước cao nhất năm, tháng, ngày:

$$H_{Max} = \text{Max}_{(t_1;t_2)} (H_1, H_2, H_3, \dots, H_{(t_1;t_2)}) \quad (4)$$

Với năm: ( $t_1 = 365, t_2 = 366$ ); tháng: ( $t_1 = 28, 29; t_2 = 30, 31$ ); ngày: ( $t_1 = 24$ )

Mực nước thấp nhất năm, tháng, ngày:

$$H_{Min} = \text{Min}_{(t_1;t_2)} (H_1, H_2, H_3, \dots, H_{(t_1;t_2)}) \quad (5)$$

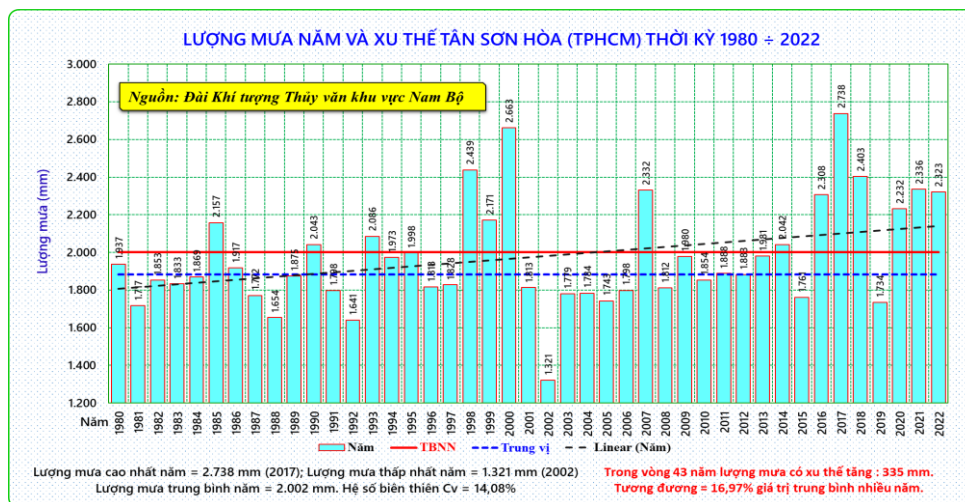
Với năm: ( $t_1 = 365, t_2 = 366$ ); tháng: ( $t_1=28, 29; t_2 = 30, 31$ ); ngày: ( $t_1 = 24$ )

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Diễn biến lượng mưa

#### 3.1.1. Lượng mưa năm

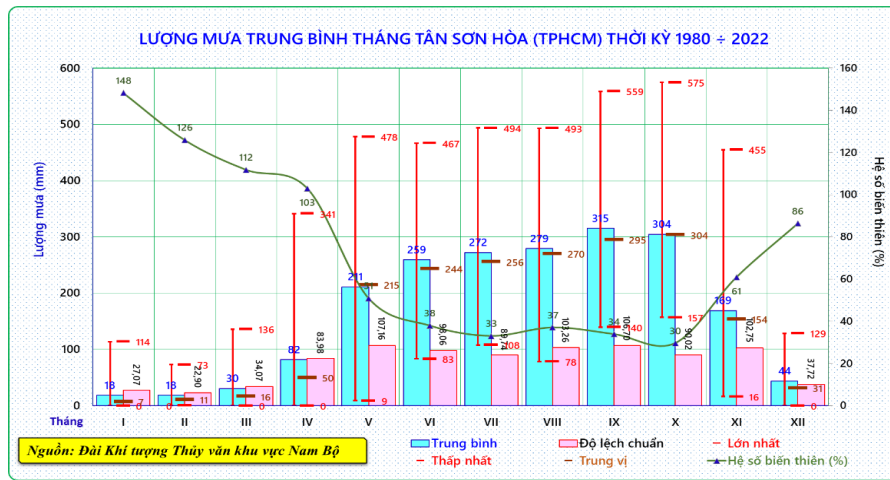
Lượng mưa trung bình nhiều năm (TBNN) (1980–2022) tại Tân Sơn Hòa (TPHCM) là 2.002 mm, năm có lượng mưa cao nhất 2017 là 2.738 mm, năm có lượng mưa thấp nhất 2002 là 1.321 mm với hệ số biến thiên lượng mưa năm  $C_v = 14,09\%$ , trong vòng 43 năm lượng mưa tăng thêm 335 mm khoảng 16,97% giá trị TBNN đây là lượng mưa gia tăng đáng kể đóng góp gia tăng ngập được trình bày tại Hình 3.



**Hình 3.** Lượng mưa năm và xu thế tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

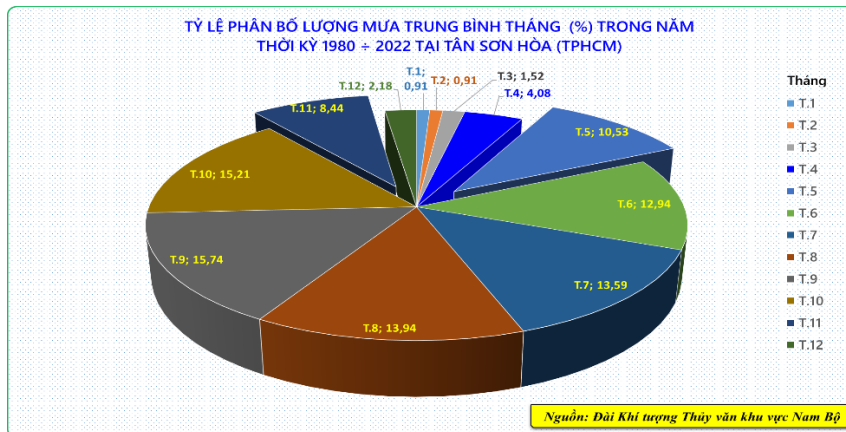
#### 3.1.2. Lượng mưa tháng

Lượng mưa tháng TPHCM có 2 mùa: mùa mưa (từ tháng 5 đến tháng 11) và mùa khô (từ tháng 12 đến tháng 4 năm sau). Lượng mưa được tập trung trong mùa mưa với hệ số biến thiên  $C_v$  từ 30–61% các tháng mùa lượng mưa không nhiều nhưng hệ số biến thiên  $C_v$  rất lớn 86–148%. Biến thiên của lượng mưa tháng trong mùa mưa rất lớn tháng thấp nhất trong mùa mưa chỉ có 9 mm, nhưng có lúc lên đến gần 600 mm. Diễn biến lượng mưa tháng được trình bày tại Hình 4.



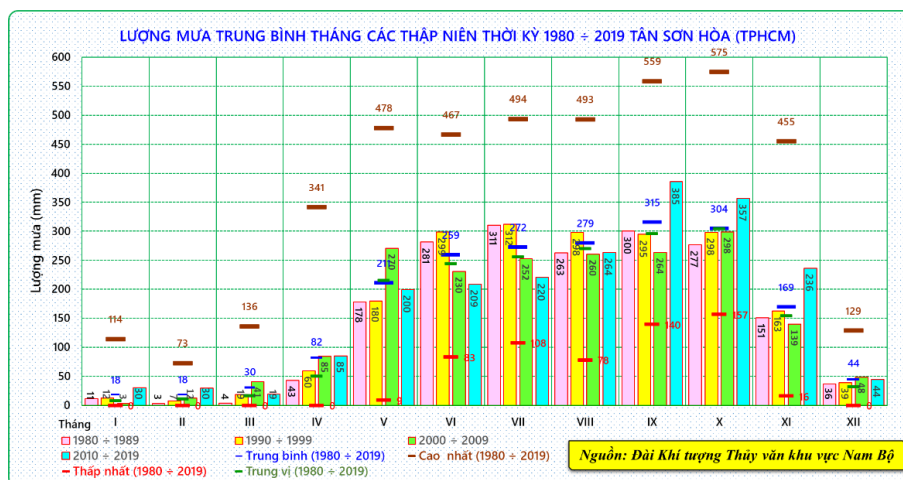
Hình 4. Hệ số biến thiên và lượng mưa tháng tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

Thời kỳ 1980–2022, trung bình lượng mưa các tháng mùa mưa tại Tân Sơn Hòa (TPHCM) chiếm tỷ lệ 90,40% tập trung nhiều từ tháng 7 đến tháng 10; Năm tháng còn lại của mùa khô chỉ còn 9,60%. Tỷ lệ phân bố lượng mưa tháng trong năm như Hình 5.



Hình 5. Tỷ lệ phân bố lượng mưa tháng trong năm tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

Qua số liệu thông các thập kỷ, thời kỳ 2010–2019 các tháng đầu mùa mưa 5, 6, 7 lượng mưa trung bình thấp hơn các thập niên trước đó, ngược lại các tháng 9, 10, 11 đều cao hơn các thập niên trước đó, các tháng này là triều cao nêu trùng với mưa lớn gây ngập, diễn biến mưa từng thập niên trình bày tại Hình 6.

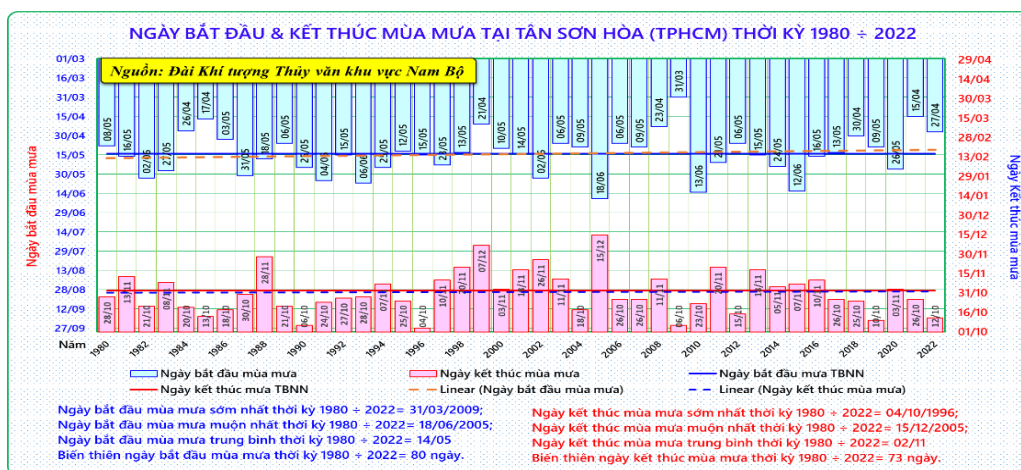


Hình 6. Lượng mưa trung bình tháng 4 thập niên 1980–2019 tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

### 3.1.3. Thời kỳ bắt đầu và kết thúc mùa mưa

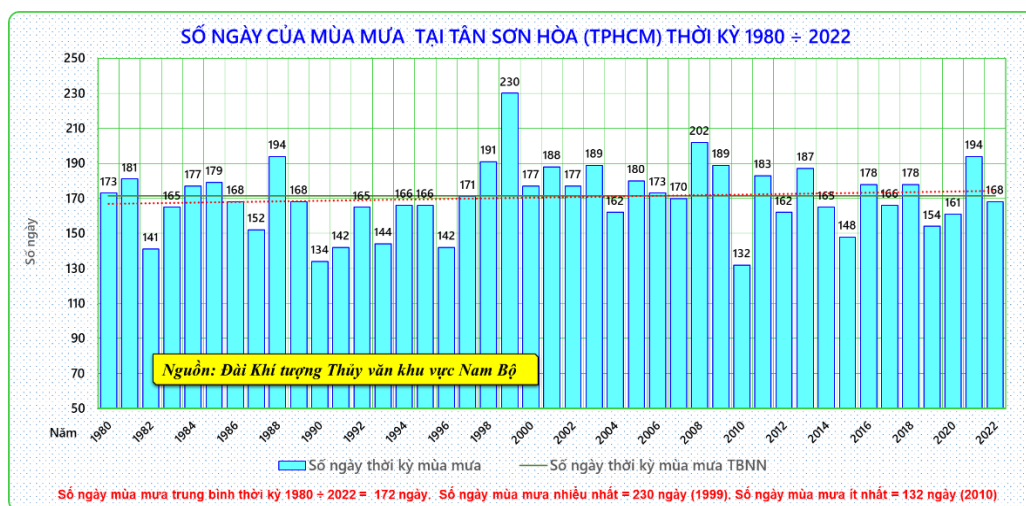
Thời kỳ bắt đầu của mùa mưa trung bình tại TPHCM thời kỳ 1980–2022 là ngày 14/5, ngày bắt đầu mùa mưa sớm nhất là ngày 31/3/2009 và ngày mưa muộn nhất 18/06/2005. Chênh lệch năm sớm nhất và muộn nhất các năm là 80 ngày được trình bày tại Hình 7.

Thời kỳ kết thúc của mùa mưa trung bình tại TPHCM thời kỳ 1980–2022 là ngày 02/11, ngày kết thúc mùa mưa sớm nhất là ngày 04/10/1996 và ngày mưa kết thúc muộn nhất 15/12/2005. Chênh lệch năm sớm nhất và muộn nhất qua các năm là 73 ngày được trình bày tại Hình 7.



**Hình 7.** Thời kỳ bắt đầu và kết thúc mùa mưa tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

Số ngày mùa mưa tùy thuộc diễn biến ngày bắt đầu và kết thúc mùa, những ngày này biến động rất lớn làm cho số ngày của mùa mưa có nhiều thay đổi. Số ngày mùa mưa trung bình 172 ngày, số ngày mùa mưa mùa mưa nhiều nhất 230 năm 1999, số ngày mùa mưa ít nhất 132 ngày năm 2010 được trình bày tại Hình 8.

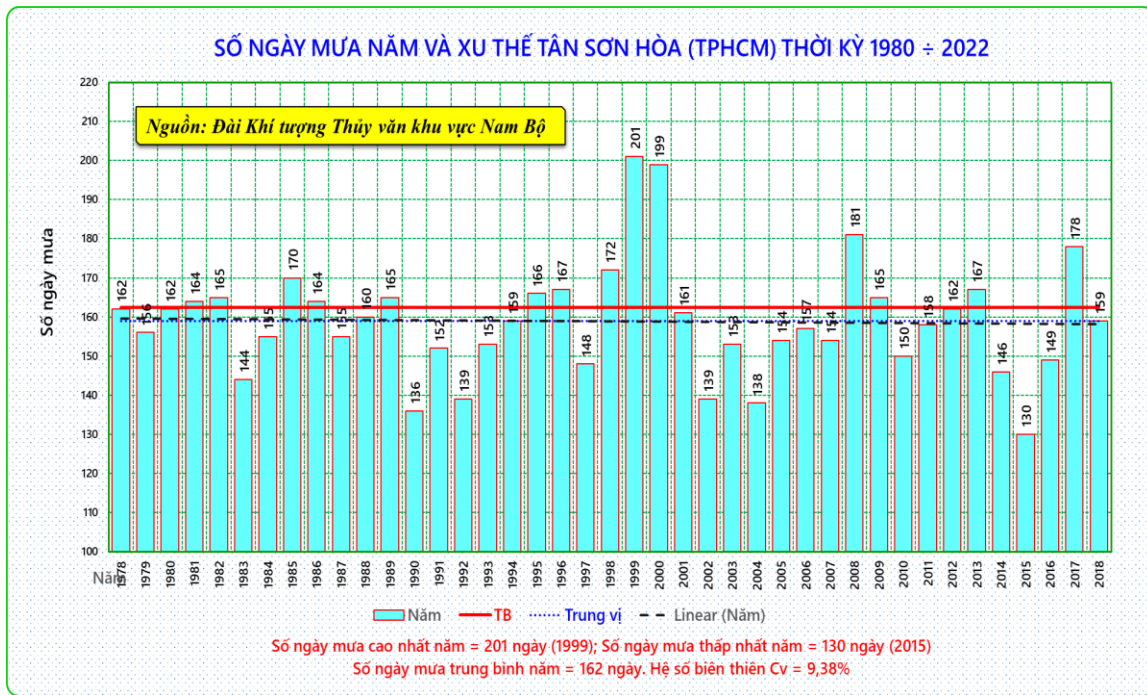


**Hình 8.** Số ngày của mùa mưa tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

## 3.2. Diễn biến ngày mưa

### 3.2.1. Số ngày mưa năm

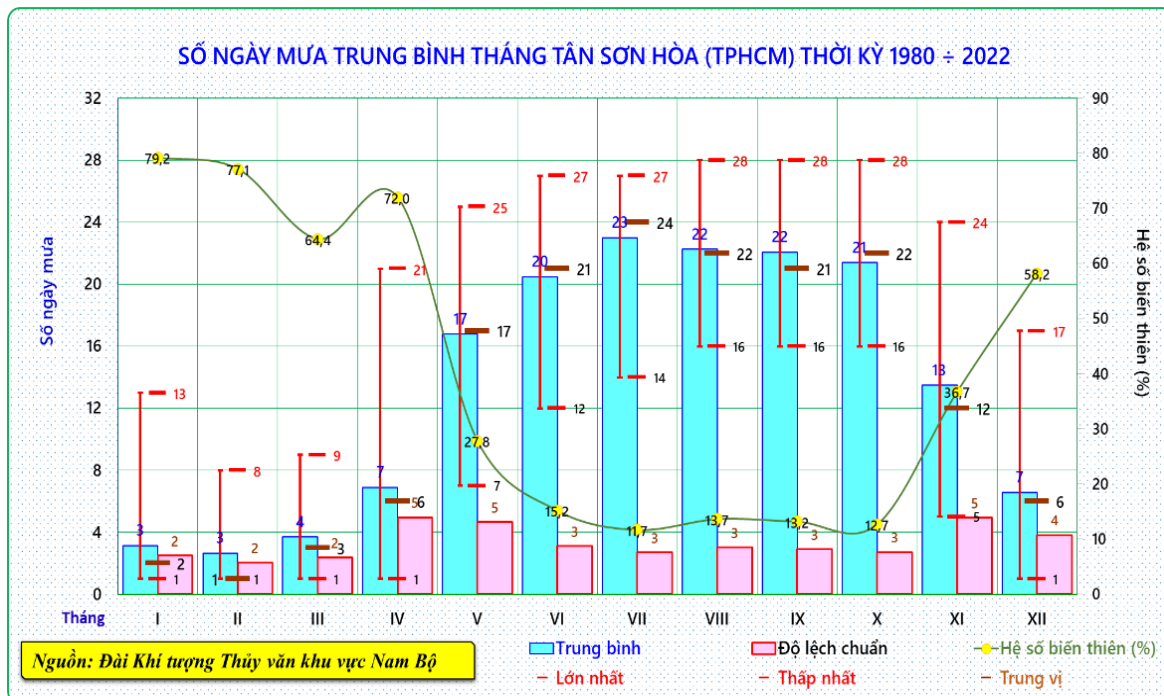
Số ngày mưa trung bình năm thời kỳ 1980–2022 là 162 ngày, năm 1999 có số ngày mưa nhiều nhất là 201 ngày, năm 2015 có số ngày mưa ít nhất là 130 ngày. Trong 43 năm số ngày mưa năm tại Tân Sơn Hòa (TPHCM) có xu thế giảm nhưng lượng mưa lại tăng lên dẫn đến các ngày mưa có lượng mưa lớn tăng lên gây ngập được trình bày tại Hình 9.



**Hình 9.** Số ngày mưa năm và xu thế tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

### 3.2.2. Số ngày mưa tháng

Số ngày mưa các tháng từ tháng 5 đến tháng 10 phổ biến trên 15 ngày mưa, từ tháng 7 đến tháng 10 có mưa tháng trên 27 ngày, các tháng mùa khô có hệ số biến thiên lớn và số ngày mưa 1 đến 17 ngày được trình bày tại Hình 10. **Error! Reference source not found.**

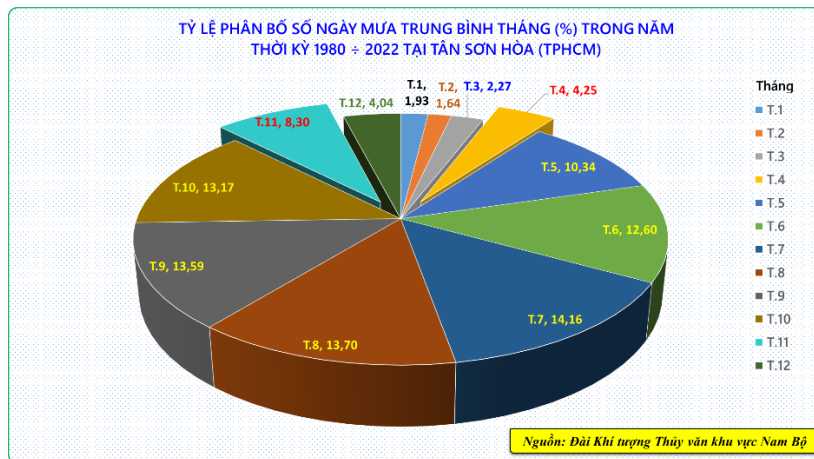


**Hình 2.** Số ngày mưa trung bình tháng tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

Số ngày mưa của mùa mưa thời kỳ 1980–2022 tại Tân Sơn Hòa (TPHCM) trung bình chiếm tỷ lệ 85,87%; Năm tháng còn lại của mùa khô số ngày mưa chỉ còn 14,13%, năm 1982 số ngày mưa tập trung trong mùa mưa với tỷ lệ số ngày mưa lên đến 99,39%, năm 1999 có



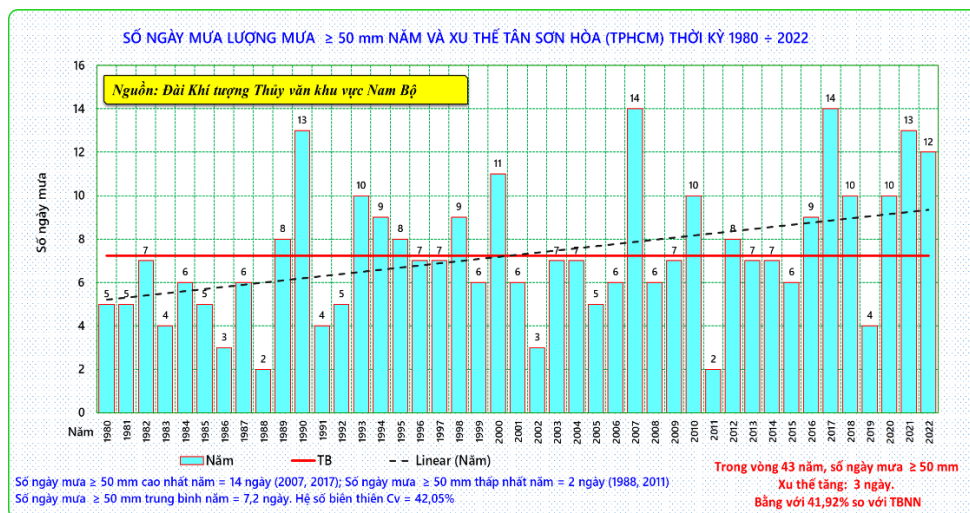
số ngày mưa trong mùa tỷ lệ thấp 75,12% được trình bày tại Hình 11 **Error! Reference source not found..**



Hình 3. Tỷ lệ phân bố số ngày mưa tháng trong năm tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

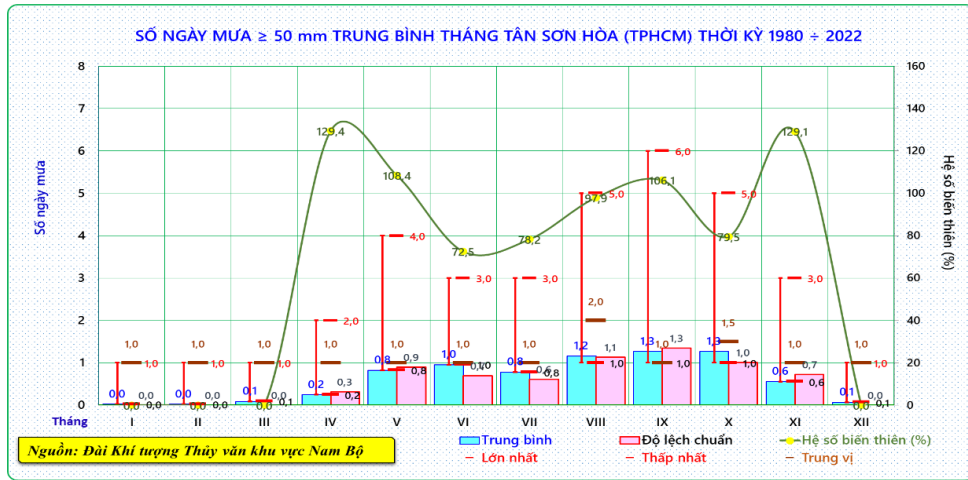
### 3.2.3. Số ngày mưa $\geq 50$ mm

Số ngày mưa to trên 50 mm trong vòng 43 năm qua tăng thêm 3 ngày tương đương với giá trị 401,92% so với TBNN được trình bày tại Hình 12.



Hình 4. Số ngày mưa  $\geq 50$  mm năm tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

Số ngày có lượng mưa trên 50 mm tập trung chủ yếu từ tháng 8 đến tháng 11, các tháng này là thời kỳ triều cường cao ở TPHCM thường gây ngập được trình bày tại Hình 13.

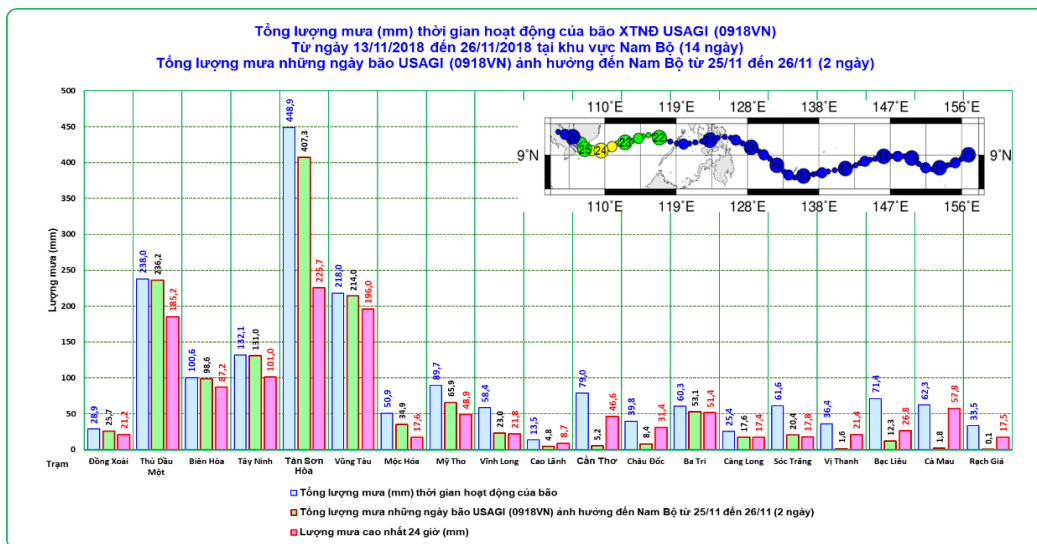


Hình 5. Số ngày mưa  $\geq 50$  mm tháng tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

### 3.2.4. Mưa do bão ảnh hưởng trực tiếp

Mưa do xoáy thuận nhiệt đới bao gồm bão và áp thấp nhiệt đới (XTNĐ) ở Nam Bộ thường xảy ra khi XTNĐ đổ bộ hoặc có ảnh hưởng từ khu vực Ninh Thuận–Bình Thuận đến Cà Mau–Kiên Giang. Nhìn chung mưa XTNĐ nhiều hơn ở khu vực Đông Nam Bộ, hoặc các tỉnh ven biển Tây Nam Bộ. Mưa XTNĐ thường tập trung chủ yếu trong ngày XTNĐ đổ bộ, ảnh hưởng trực tiếp hoặc XTNĐ đã đi qua [13].

Một vùng áp suất thấp hình thành trên khu vực trung tâm phía Bắc của Thái Bình Dương, vùng áp thấp di chuyển vào Tây Bắc Thái Bình Dương đã mạnh lên thành áp thấp nhiệt đới (ATNĐ) vào ngày 9 tháng 11, đổ bộ vào tại Philippines ngày 20 tháng 11. Đây là một cơn bão có đường đi tương đối dài. Đến sáng ngày 23 tháng 11 thì mạnh lên thành bão ở biển Đông với tên quốc tế là Usagi. Do ảnh hưởng của không khí lạnh mạnh và tương tác với đất liền, sức gió của bão đã suy yếu xuống còn cấp 8 giật cấp 10 trên vùng bờ biển Vũng Tàu–Thành phố Hồ Chí Minh sáng ngày 25 tháng 11. Trưa cùng ngày bão đổ bộ vào Cần Giờ (TP. Hồ Chí Minh), sau suy yếu thành ATNĐ và cuối cùng là một vùng thấp trên khu vực TP. Hồ Chí Minh. Đã có lượng mưa 2 ngày là 449 mm gây ngập toàn thành phố.



Hình 6. Số ngày mưa  $\geq 50$  mm tháng tại Tân Sơn Hòa (TPHCM).

### 3.3. Diễn biến mực nước

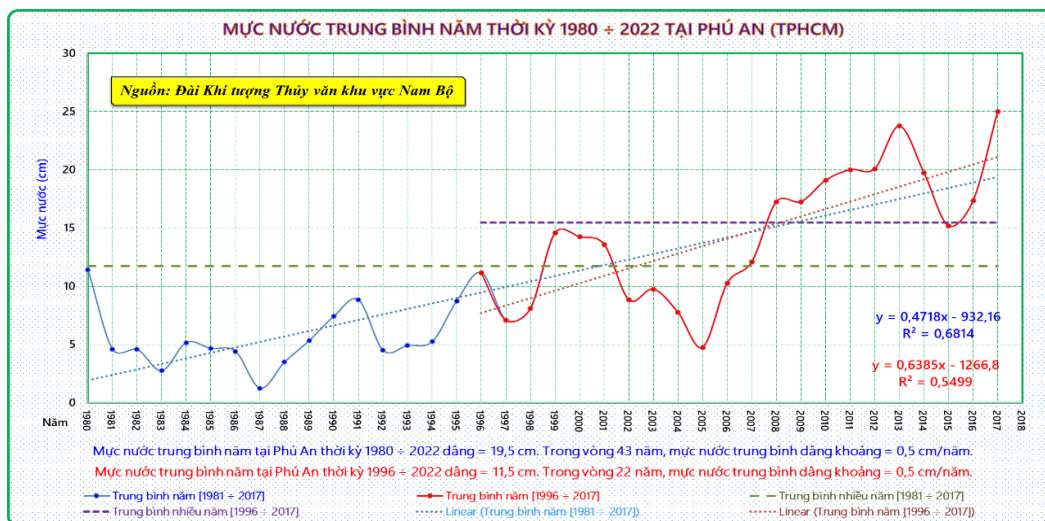
Trạm Phú An đặt bên bờ phải sông Sài Gòn, trong khu vực Công viên Cảnh Du Lịch Bạch Đằng, trên đường Tôn Đức Thắng, phường Bến Nghé, Quận I, TPHCM. Chế độ dòng

chảy trên sông Đồng Nai–Sài Gòn đoạn chảy qua Phú An hoàn toàn chịu ảnh hưởng của chế độ bán nhật triều không đều của biển Đông. Từ tháng 7 đến tháng 12 dòng chảy có ảnh hưởng của lũ thượng nguồn của Hồ Dầu Tiếng–Phước Hòa nhưng dòng chảy vẫn thể hiện chế độ triều rõ rệt. Mức nước cao nhất trong năm thường rơi vào thời gian từ tháng 10 đến tháng 1 năm sau, mức nước thấp nhất trong năm hay xuất hiện vào hai tháng 6 và 7.

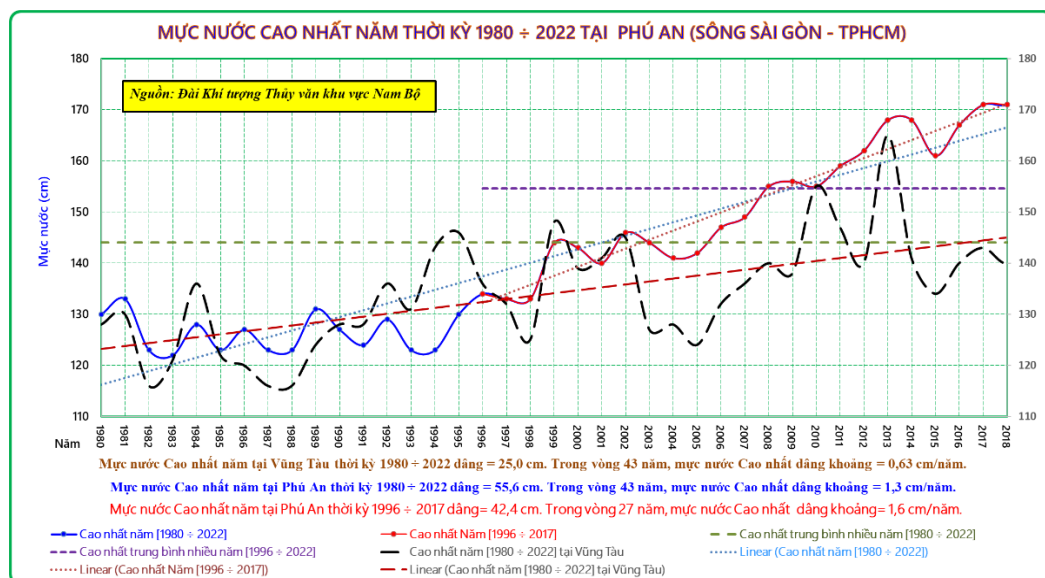
### 3.3.1 Diễn biến mực nước trung bình, cao nhất, thấp nhất

Mức nước trung bình thời kỳ 1980 ÷ 2022 tại trạm Phú An là 12 cm. Mức cao nhất đo được tại trạm Phú An là 174 cm (2019). Mức nước thấp nhất tại Phú An là -256 cm (2005). Trong vòng 43 năm qua:

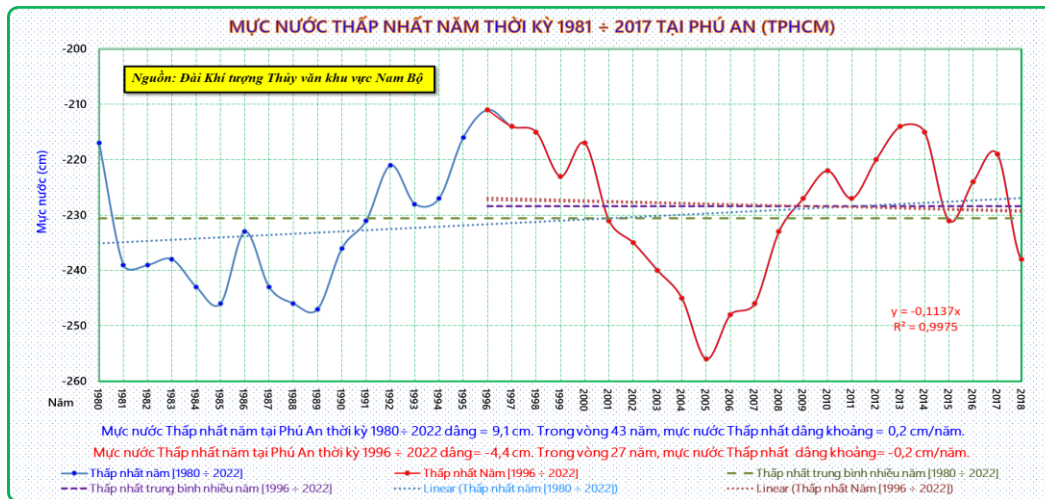
Mức nước trung bình tăng 19,5 cm, (trung bình mỗi năm tăng 0,5 cm); Mức nước cao nhất tăng 55,6 cm, (trung bình mỗi năm tăng 1,3 cm) tăng gấp đôi so với trạm hải văn Vũng Tàu; Mức nước thấp nhất tăng 9,1 cm, (trung bình mỗi năm tăng 0,2 cm); Tính thời kỳ 1996 ÷ 2022 trong vòng 22 năm qua: Mức nước trung bình tăng 11,5 cm, (trung bình mỗi năm tăng 0,5 cm); Mức nước cao nhất tăng 42,4 cm, (trung bình mỗi năm tăng 1,6 cm); Mức nước thấp nhất giảm -4,4 cm, (trung bình mỗi năm giảm -0,2 cm); Chi tiết được trình bày tại các Hình 15, Hình 16, Hình 17.



Hình 7. Mực nước trung bình năm tại Phú An (TPHCM).



Hình 8. Mực nước cao nhất năm tại Phú An (TPHCM) và Vũng Tàu.



Hình 9. Mức nước thấp nhất năm tại Phú An (TPHCM).

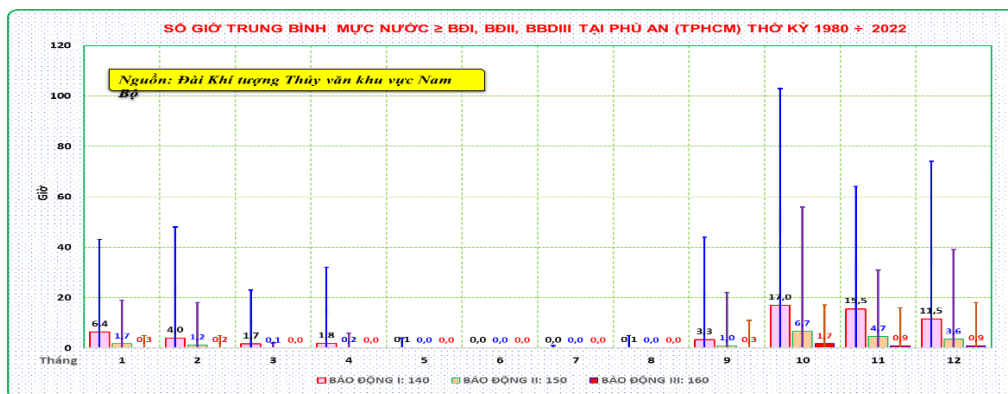
### 3.3.2. Số giờ, số ngày mực nước $\geq$ báo động I, báo động II, báo động III

Theo Quyết định số 05/2020/QĐ–TTg ngày 31 tháng 01 năm 2020 “Quy định mực nước tương ứng với các cấp báo động lũ trên các sông thuộc phạm vi cả nước” Mực nước tương ứng với các cấp báo động tại Phú An là cấp I = 1,40 m, cấp II = 1,50 m, cấp III = 1,60 m.

Số liệu mực nước (H) giờ trạm Phú An từ năm 1980 đến 2022 có những kết quả sau:

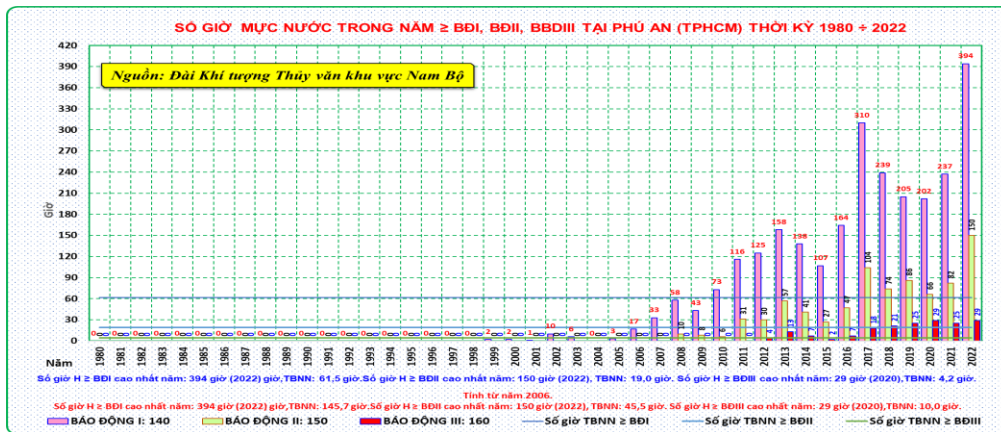
a) Số giờ mực nước  $\geq$  báo động I, báo động II, báo động III

Mực nước giờ tại Phú An mực nước tương ứng với các cấp báo động tại Phú An từ báo động I trở lên bắt đầu từ tháng 9 đến tháng 4 năm sau (Hình 18). Trước năm 2006 không có mực nước trên báo động I trở lên, từ 2006 xuất hiện mực nước cấp báo động ngày càng nhiều. Năm có số giờ  $H \geq$  BĐI cao nhất: 394 giờ (2022), TBNN: 61,5 giờ. Năm có số giờ  $H \geq$  BĐII cao nhất: 150 giờ (2022), TBNN: 19,0 giờ. Năm có số giờ  $H \geq$  BĐIII cao nhất: 29 giờ (2020), TBNN: 4,2 giờ (Hình 19). Tính từ năm 2006: Số giờ  $H \geq$  BĐI cao nhất năm: 394 giờ (2022) giờ, TBNN: 145,7 giờ. Số giờ  $H \geq$  BĐII cao nhất năm: 150 giờ (2022), TBNN: 45,5 giờ. Số giờ  $H \geq$  BĐIII cao nhất năm: 29 giờ (2020), TBNN: 10,0 giờ.



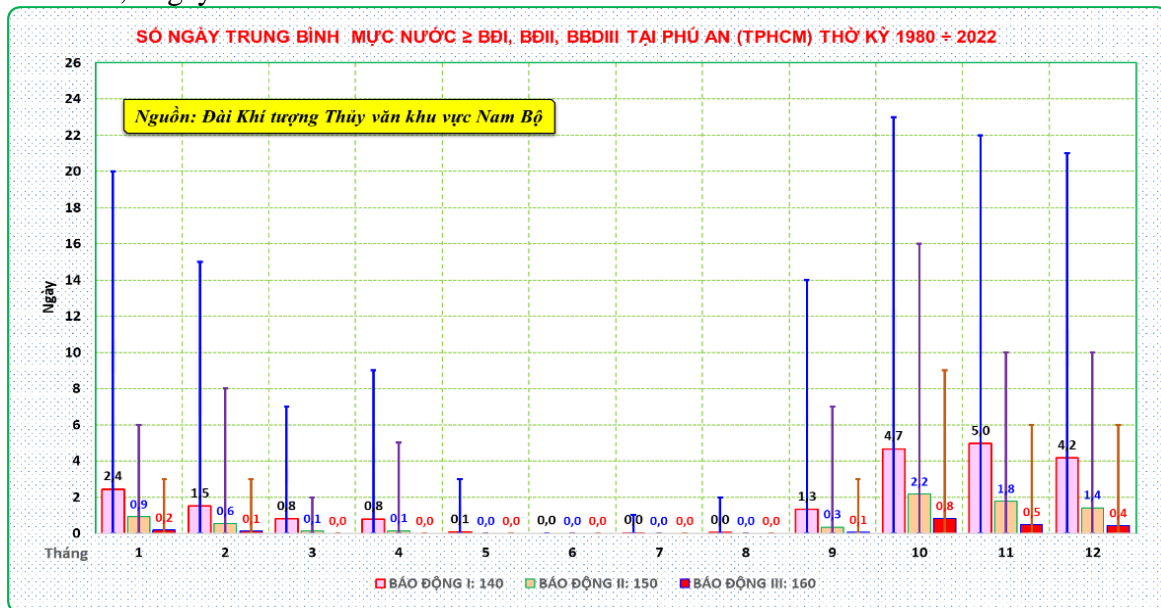
Hình 108. Số giờ mực nước  $\geq$  báo động I, báo động II, báo động III tháng tại Phú An (TPHCM).



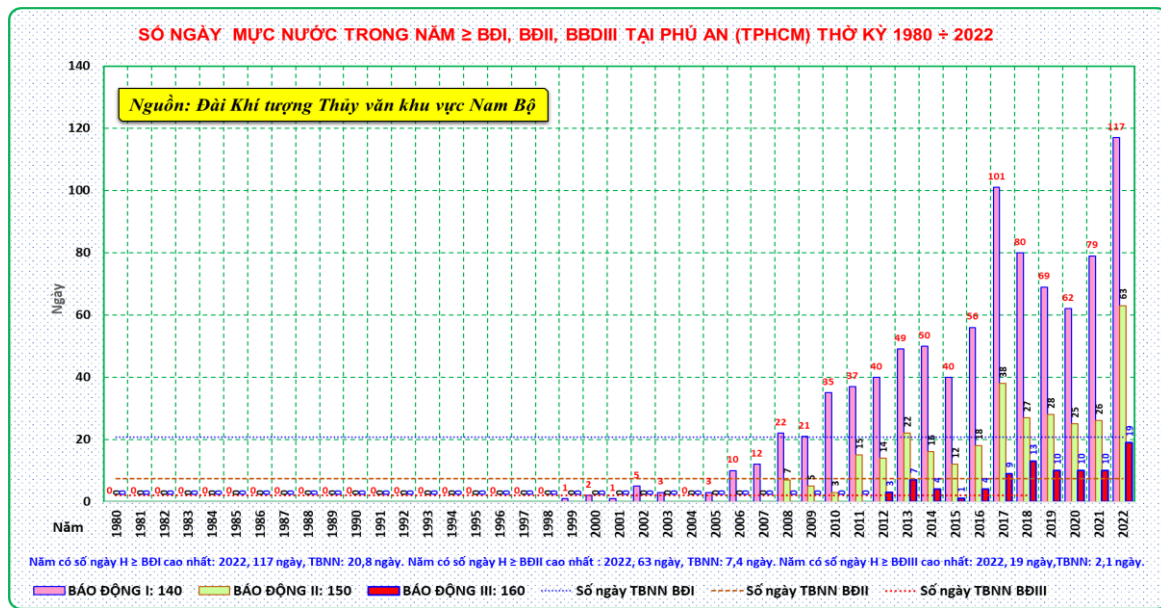


**Hình 19.** Số ngày mực nước  $\geq$  báo động I, báo động II, báo động III.

Mực nước ngày tại Phú An mực nước tương ứng với các cấp báo động tại Phú An từ báo động I trở lên bắt đầu từ tháng 9 đến tháng 4 năm sau (Hình 18, Hình 20). Trước năm 2006 không có mực nước trên báo động I trở lên, từ 2006 xuất hiện mực nước cấp báo động ngày càng nhiều. Năm có số ngày H  $\geq$  BĐI cao nhất: 117 ngày (2022), TBNN: 61,5 ngày. Năm có số ngày H  $\geq$  BĐII cao nhất: 150 ngày (2022), TBNN: 19,0 ngày. Năm có số ngày H  $\geq$  BĐIII cao nhất: 29 ngày (2020), TBNN: 4,2 ngày (Hình 21). Tính từ năm 2006, năm có số ngày H  $\geq$  BĐI cao nhất: 117 ngày (2022) ngày, TBNN: 49,1 ngày. Tính từ năm 2006, năm có số ngày H  $\geq$  BĐI cao nhất: 117 ngày (2022) ngày, TBNN: 49,1 ngày. Năm có số ngày H  $\geq$  BĐII cao nhất: 63 ngày (2022), TBNN: 17,7 ngày. Năm có số ngày H  $\geq$  BĐIII cao nhất: 19 ngày (2022), TBNN: 5,0 ngày.



**Hình 20.** Số ngày mực nước  $\geq$  báo động I, báo động II, báo động III tháng tại Phú An (TPHCM).



Hình 11. Số ngày mực nước  $\geq$  báo động I, báo động II, báo động III năm tại Phú An (TPHCM).

### 3.4. Thiệt hại do ngập

Mưa lớn kéo dài, triều cao và tốc độ thoát nước không kịp thời thường gây ngập trên diện rộng, tắc nghẽn giao thông, tác động tiêu cực đến các hoạt động kinh tế, ô nhiễm môi trường và ảnh hưởng đến sức khỏe cộng đồng. Tại hội thảo tìm giải pháp chống ngập do Báo Tiền Phong tổ chức hồi năm 2018, ông Lê Văn Thành (Viện Nghiên cứu Phát triển TP.HCM) đã thông tin, các khu vực bị ảnh hưởng do ngập nước chiếm đến khoảng 2/3 diện tích toàn Thành phố, tác động tiêu cực đến đời sống, sinh hoạt, việc làm của gần 3 triệu người dân; ước tính thiệt hại do ngập nước tại TP.HCM lên đến 1.500 tỷ mỗi năm, Đề bước đầu đánh giá thiệt hại cho ngập Đài Khí tượng Khu vực Nam Bộ đã triển khai thực hiện đề tài “Điều tra khảo sát và đánh giá thiệt hại do ngập lụt đến kinh tế-xã hội; xây dựng bản đồ thiệt hại do ngập lụt phục vụ công tác chống ngập, quy hoạch đô thị trên địa bàn Thành phố Hồ Chí Minh” kết quả nghiên cứu làm cơ sở khoa học xác định lượng hóa các dạng thiệt hại kinh tế.

## 4. Kết luận

Mùa mưa ở TPHCM diễn ra từ đầu tháng 5 tới tháng 11 hàng năm cùng với triều biển Đông rất mạnh từ tháng 9 đến tháng 2 năm sau. Thời kỳ này khi mưa lớn, nhất là khi có thêm triều cao, tác động của bão lũ là nguyên nhân gây nên ngập lụt ở nhiều nơi, làm thiệt hại đến tài sản và cả tính mạng của người dân. Với những số liệu đo đạc gần nửa thế kỷ qua đã cho thấy hai yếu tố mưa lớn; triều cường cao cùng với 4 yếu tố chính là đô thị hóa làm mất đi mặt phủ thấm nước và dòng chảy tự nhiên; lún đô thị diễn ra trên diện rộng, hệ thống thoát nước không đáp ứng kịp thời cho tiêu thoát nước, rừng ngập mặn cửa sông bị thu hẹp là những nguyên nhân chủ yếu dẫn tới việc ngập lụt tại TPHCM. Theo thời gian này, mực nước các sông trong TPHCM dâng lên rất rõ, đặc biệt số ngày trên mực nước trên các mức báo động tăng rõ rệt. Lượng mưa cũng tăng lên theo thời gian. Để phục vụ công tác chống ngập Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ đã triển khai thực hiện thử nghiệm đề tài “Nghiên cứu, xây dựng và triển khai thử nghiệm hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo tại Thành phố Hồ Chí Minh” thử nghiệm cho thành phố Thủ Đức có tính ứng dụng và thực tiễn cao nâng cao hiệu quả phục vụ phòng chống ngập nước [14]. Để nâng cao hơn nữa dự báo, cảnh báo chi tiết mưa lớn, triều cao, ngập lụt đô thị thời gian tới cần xây dựng hệ thống cảnh báo sớm đồng bộ bao gồm nâng cấp hệ thống radar thời tiết, các

phần mềm công cụ dự báo cảnh báo mưa lớn, triều cường, ngập lụt đô thị, thông báo kịp thời rộng rãi đến mọi người và đào tạo nguồn nhân lực vận hành trên.

**Đóng góp của tác giả:** Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: Đ.Q.T.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: L.Đ.Q.; Thu thập nguyên nhân ngập: N.N.N.; Thu thập số liệu và chỉnh lý: N.P.C.; Tính toán và xử lý số liệu: N.N.Đ.; Viết bản thảo bài báo: N.M.G.; Chỉnh sửa bài báo: L.N.Q.

**Lời cảm ơn:** Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ đã cho khai thác sử dụng số liệu và các báo cáo tạo điều kiện để nhóm tác giả trình bày những kết quả nghiên cứu của mình.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

### **Tài liệu tham khảo**

1. Quân, M.H.H. Chủ tịch TPHCM chỉ ra 5 nguyên nhân khiến thành phố chưa thể hết ngập. <https://laodong.vn/xa-hoi/chu-tich-tphcm-chi-ra-5-nguyen-nhan-khien-thanh-pho-chua-the-het-ngap-860668.lido>.
2. Khánh, T. Nhận diện hàng loạt nguyên nhân gây ngập lụt triền miên ở TP.HCM, 2022. Trục tuyến: <https://danviet.vn/hang-loat-nguyen-nhan-gay-ngap-lut-o-tphcm-20220717181244315.htm>.
3. Bình, N. Ngập úng ở TP. Hồ Chí Minh (Bài 2): Nguyên nhân nào khiến cứ mưa là ngập? 2020. Trục tuyến: <https://moitruong.net.vn/ngap-ung-o-tp-ho-chi-minh-bai-2-nguyen-nhan-nao-khien-cu-mua-la-ngap-1859.html>.
4. Học, Đ.X. Nguyên nhân và các giải pháp chống ngập úng ở TP Hồ Chí Minh. [http://tapchivatuyentap.tlu.edu.vn/Portals/10/So%2024/So%2024%20\\_00001.pdf](http://tapchivatuyentap.tlu.edu.vn/Portals/10/So%2024/So%2024%20_00001.pdf).
5. Nga, N.; Mai, H. Đến lúc TP.HCM tính chuyện sống chung với nước. 2022. Trục tuyến: <https://thanhnien.vn/den-luc-tphcm-tinh-chuyen-song-chung-voi-nuoc-1851492255.htm>.
6. Tiến, T.Q. Nghiên cứu nguyên nhân và xây dựng quy trình công nghệ cảnh báo, dự báo hiện tượng mực nước biển dâng dị thường tại miền Trung và Nam Bộ Việt Nam. Bộ Khoa học và Công nghệ, 2016, tr. 224.
7. Đài Khí tượng Thủy văn Khu vực Nam Bộ. Số liệu và Báo cáo, Đài Khí tượng Thủy văn Khu vực Nam Bộ, 2022.
8. Trường, T.V. Tiêu thoát nước ở Thành phố Hồ Chí Minh. Trục tuyến: <http://www.vncold.vn/Web/Content.aspx?distid=136>.
9. Nữ, H.T.T.; Quyên, T.T.; Anh, V.T.V.; Thảo, N.T.H.; Văn, C.T. Ứng dụng mô hình thủy văn đô thị mô phỏng mức độ ngập do gia tăng mực nước triều và khả năng thoát nước cho hệ thống kênh Tân Hóa – Lò Gốm ở thành phố Hồ Chí Minh. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2022**, 740, 22–35.
10. Hòa, N.M. Ảnh hưởng của quy hoạch không gian đến hiện tượng ngập nước ở TPHCM. 2016. Trục tuyến: <https://www.tapchikientruc.com.vn/chuyen-muc/anh-huong-cua-quy-hoach-khong-gian-den-hien-tuong-ngap-nuoc-o-tphcm.html>.
11. Trường, T.V. Nhìn lại bài toán ngập lụt Thành phố Hồ Chí Minh. Trục tuyến: [http://www.vncold.vn/Modules/CMS/Upload/10/PhatTrienNuoc/181207/NgapLut\\_TP\\_HCM\\_TVT.pdf](http://www.vncold.vn/Modules/CMS/Upload/10/PhatTrienNuoc/181207/NgapLut_TP_HCM_TVT.pdf)
12. Giám, N.M.; Quyên, L.; Nguyễn, N.N. Những yếu tố khí tượng – thủy văn tác động đến ngập lụt Thành phố Hồ Chí Minh. Hội nghị khoa học, lần thứ X1 – 2018. Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên TPHCM, 2018.
13. Thanh, Đ.Q. Đặc điểm mưa khu vực Nam bộ khi có ảnh hưởng của xoáy thuận nhiệt đới, Báo cáo luận văn Thạc sĩ Trường Đại học Khoa học Tự Nhiên Hà Nội, 2019,

14. Quyền, L.N. và cs. Nghiên cứu, xây dựng và triển khai thử nghiệm hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo tại Thành phố Hồ Chí Minh. Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp Thành phố, 2022.

## **The main causes of flooding in Ho Chi Minh City**

**Nguyen Minh Giam<sup>1\*</sup>, Le Ngoc Quyen<sup>1</sup>, Nguyen Nam Duc<sup>1</sup>, Dang Quang Thanh<sup>1</sup>, Le Dinh Quyet<sup>1</sup>, Nguyen Ngoc Nguyen<sup>2</sup>, Nguyen Thi Phuong Chi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Southern Region Hydrometeorological Center; nmg@kttvnb.vn; quyentccb@gmail.com; ngnamduc@gmail.com; dangquangthanht@gmail.com; quyet.le74@gmail.com

<sup>2</sup> Ho Chi Minh city Environment and Natural Resources Department; nnguyen82@gmail.com

<sup>3</sup> Ho Chi Minh City University of Natural Resources and Environment; ntpchi@hcmunre.edu.vn

**Abstract:** Ho Chi Minh City with its geographical location and relatively favorable natural conditions, a dynamic and strongly developed city. But there are still many inadequacies, the biggest of which is the flooding in the city. The City has come up with many solutions to reduce flooding, but in reality, the effectiveness of those solutions is not very effective when there is heavy rain and high tide and flooding still occur. There are many causes of flooding, in this report using data related to rainfall and tide water level at Tan Son Hoa meteorological station, Phu An hydrological station and Vung Tau marine station, perform an analysis of these factors and further clarify the evolution over time of these factors to flood Ho Chi Minh City.

**Keywords:** Meteorology; Hydrology; Flood–tide; Heavy rain; Flooding; Ho Chi Minh City.



Bài báo khoa học

## Xây dựng Phương án dự báo xâm nhập mặn trên các sông chính của tỉnh Bến Tre

Đặng Hoàng Lam<sup>1\*</sup>, Nguyễn Phước Định<sup>2</sup>, Nguyễn Văn Sỹ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Bến Tre, Đài Khí tượng Thủy văn Khu vực Nam Bộ, Tổng cục Khí tượng Thủy văn, Bộ Tài Nguyên và Môi trường; danghoanglam91@gmail.com

<sup>2</sup> Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Bến Tre, Đài Khí tượng Thủy văn Khu vực Nam Bộ, Tổng cục Khí tượng Thủy văn, Bộ Tài Nguyên và Môi trường; dinhnguyenphuoc1976@gmail.com

<sup>3</sup> Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Bến Tre, Đài Khí tượng Thủy văn Khu vực Nam Bộ, Tổng cục Khí tượng Thủy văn, Bộ Tài Nguyên và Môi trường; nguyenvansy.cl@gmail.com

\*Tác giả liên hệ: danghoanglam91@gmail.com; Tel.: +84-988562602

Ban Biên tập nhận bài: 12/1/2023; Ngày phản biện xong: 22/2/2023; Ngày đăng bài: 25/3/2023

**Tóm tắt:** Hằng năm vào mùa khô, các sông trên địa bàn tỉnh Bến Tre thường bị xâm nhập mặn, gây ảnh hưởng đến sản xuất, dân sinh từ tháng 02–04, độ mặn  $4^0/00$  xâm nhập cách các cửa sông trung bình 40–50 km. Do đó, cần có dự báo về tình hình xâm nhập mặn của tỉnh nhằm giúp địa phương có kế hoạch sản xuất phù hợp. Trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp kết hợp mô hình MIKE 11, MIKE 21 và hiển thị kết quả bản đồ trên nền ArcGis. Kết quả nghiên cứu cho thấy: đối với thời hạn dự báo 10 ngày, phương án dự báo có độ đủ tin cậy trên cả ba sông chính; đối với dự báo thời hạn tháng, phương án có độ tin cậy rất tốt trên sông Cổ Chiên, đủ độ tin cậy đối với sông Hàm Luông và không đủ độ tin cậy đối với sông Cửa Đại; đối với dự báo thời hạn mùa, phương án có độ tin cậy rất tốt đối với sông Cổ Chiên, đủ độ tin cậy đối với sông Hàm Luông và không đủ độ tin cậy đối với sông Cửa Đại. Phương án dự báo đã được Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Bến Tre áp dụng vào nghiệp vụ dự báo cho mùa khô năm 2022 và những năm tiếp theo, nhất là dự báo thời hạn 10 ngày và thời hạn tháng.

**Từ khóa:** Mô hình Mike 11; Mike 21; ArcGis; Xâm nhập mặn; Bến Tre.

### 1. Đặt vấn đề

Xâm nhập mặn là vấn đề rất được quan tâm không chỉ trong nước mà còn ở ngoài nước, nhất là các năm gần đây. Để tính toán về mặn, các nhà nghiên cứu đã sử dụng nhiều phương pháp để tính toán và mô phỏng phỏng quá trình xâm nhập mặn. Phương pháp chủ yếu là phương pháp mô hình hóa hay các mô đun thủy lực kết hợp với mô đun tính toán lan truyền và vận chuyển chất. Trong vài năm gần đây, trên thế giới có một số nghiên cứu về tác động của Biến đổi khí hậu cũng đã được công bố sử dụng mô hình MIKE 21 để tiến hành đánh giá tác động của Biến đổi khí hậu đến độ mặn trên sông Mê Công. [1] đã công bố các nghiên cứu sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo để dự báo biến động độ mặn do Biến đổi khí hậu gây ra trên vùng cửa sông Savannah.

[2] sử dụng mô hình mô phỏng Spatio-thời gian độ mặn theo mô hình số MIKE 21 dưới các điều kiện thủy văn khác nhau. [3] nghiên cứu sự biến đổi độ mặn và báo cáo rằng mô hình có khả năng mô phỏng độ mặn bề mặt biển một cách thích hợp. [4] đã dự đoán sự thay đổi độ mặn theo mùa bằng một mô hình mô phỏng hồ chứa năng động (DYRESM) ở

Hồ Dexter Pit. Kết quả chỉ ra mối liên hệ phù hợp giữa giá trị mô phỏng muối và quan trắc. Nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng của xâm nhập mặn ở cửa sông Châu Giang và sử dụng bền vững tài nguyên nước tại sông Châu Giang [5] đã đánh giá tầm quan trọng của nước thượng nguồn, hồ chứa đến quá trình đẩy lùi mặn trong thời kỳ khô hạn năm 2006–2007 và 2007–2008.

Một số nhà khoa học Việt Nam điển hình là cố Giáo sư Nguyễn Như Khuê, Nguyễn Ân Niên, Nguyễn Tất Đắc, Nguyễn Văn Điệp, Nguyễn Minh Sơn, Trần Văn Phúc, Nguyễn Hữu Nhân [6–8]... đã xây dựng thành công các mô hình thủy lực mạng sông kết hợp tính toán xâm nhập triều mặn như VRSAP, EKSAL, FWQ87, SAL, SALMOD, HYDROGIS... Các báo cáo trên chủ yếu tập trung xây dựng thuật toán tính toán quá trình xâm nhập mặn thích hợp với điều kiện địa hình, KTTV ở đồng bằng sông Cửu Long. Kết quả được nhìn nhận khả quan và bước đầu một số mô hình đã thử nghiệm ứng dụng dự báo xâm nhập mặn. Trong khuôn khổ Chương trình Bảo vệ Môi trường và Phòng tránh thiên tai, KC - 08, [9] đã sử dụng các mô hình: SAL, VRSAP, KOD và HydroGis để dự báo xâm nhập mặn cho một số sông chính theo các thời đoạn dài hạn (6 tháng), ngắn hạn (nửa tháng) và hàng ngày cho khu vực đồng bằng sông Cửu Long.

Ở ĐBSCL tùy theo quy mô, đặc trưng của khu vực nghiên cứu mà các tác giả chọn quy mô mạng lưới sông, các dữ liệu cần phải đưa vào mô hình, quan trọng nhất vẫn là quá trình hiệu chỉnh và kiểm định mô hình, các nghiên cứu [10–20] xây dựng mô hình Mike 11 để tính toán mực nước và xâm nhập mặn cho ĐBSCL. Từ đó, xây dựng các kịch bản dự báo cho xâm nhập mặn trong tương lai theo các kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng đã được công bố. Trong các nghiên cứu đó, có một nghiên cứu [11] sử dụng mô hình Mike 11 để dự báo xâm nhập mặn của Khu vực Nam Bộ. Kết quả của nghiên cứu đã hỗ trợ hỗ trợ nghiệp vụ dự báo, cảnh báo xâm nhập mặn cho các Đài KTTV tỉnh thuộc khu vực Nam Bộ.

Và ở tỉnh Bến Tre cũng đã có nghiên cứu dự tính xâm nhập mặn trên địa bàn tỉnh theo kịch bản Biến đổi Khí hậu đến 2050 bằng Mô hình Mike 11 [21]; nghiên cứu dự báo xâm nhập mặn vào các cửa sông của Bến Tre năm 2021 bằng mô hình ARIMA kết hợp với GIS, nhưng chỉ dự báo đến 7 ngày và chỉ dự báo ở khu vực gần cửa sông [22].

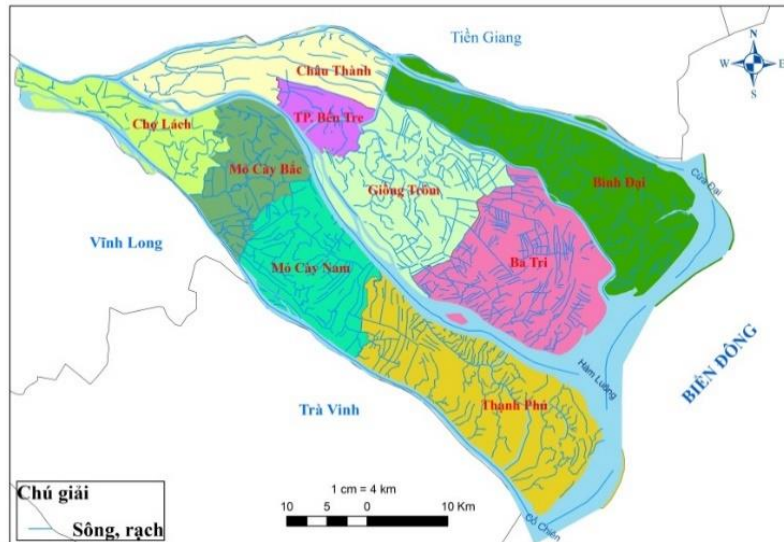
Đã có nhiều đề tài và nghiên cứu đã ứng dụng nhiều mô hình vào để tính toán mặn, nghiên cứu xâm nhập mặn trong và ngoài nước nói chung, cũng như ĐBSCL và tỉnh Bến Tre nói riêng mà Đài KTTV tỉnh Bến Tre thì chủ yếu sử dụng phương pháp thống kê, tham khảo kết quả dự báo của Đài Khí tượng Thủy văn Khu vực Nam Bộ kết hợp với kinh nghiệm của dự báo viên là chính để đưa ra dự báo xâm nhập mặn cho tỉnh. Do đó, cần thiết phải xây dựng phương án dự báo xâm nhập mặn ứng dụng mô hình vào dự báo nghiệp vụ của Đài KTTV tỉnh Bến Tre. Mục đích nghiên cứu xây dựng được phương án dự báo xâm nhập mặn trên các sông chính của tỉnh Bến Tre với độ tin cậy ổn định cho từng thời hạn dự báo 10 ngày, hạn tháng và hạn mùa, nhằm phục vụ cho công tác dự báo của các dự báo viên về xâm nhập mặn ở địa bàn tỉnh Bến Tre bằng mô hình Mike 11 kết hợp Mike 21 và ArcGis.

## **2. Phương pháp nghiên cứu và dữ liệu sử dụng**

### *2.1. Giới thiệu khu vực nghiên cứu*

Bến Tre là một tỉnh có chiều dài bờ biển 65 km, nằm ở phía Đông Nam Đồng bằng sông Cửu Long. Bốn con sông chính đổ ra các bốn cửa: Hàm Luông, Cổ Chiên, Cửa Đại, Ba Lai (có công đập Ba lai năm 2002) bao bọc và chia Bến Tre thành ba phần: cù lao An Hóa, cù lao Bảo và cù lao Minh. Bốn con sông này cùng với hệ thống kênh rạch chằng chịt là nguồn cung cấp nước trực tiếp cho toàn bộ hoạt động sản xuất và sinh hoạt của tỉnh, tạo điều kiện thuận lợi cho Bến Tre trong phát triển kinh tế vườn, nông nghiệp, đồng thời cũng tạo cho Bến Tre nhiều khó khăn do chịu ảnh hưởng nặng nề của thiên tai, nhất là triều cường, xâm nhập mặn, sạt lở bờ sông, bờ biển... Hằng năm vào mùa khô, các sông trên địa

bàn tỉnh thường xuyên bị nhiễm mặn, và thường ảnh hưởng đến dân sinh và sản xuất từ tháng 02, độ mặn  $4^{0/00}$  xâm nhập cách cửa sông trung bình 40–50 km.

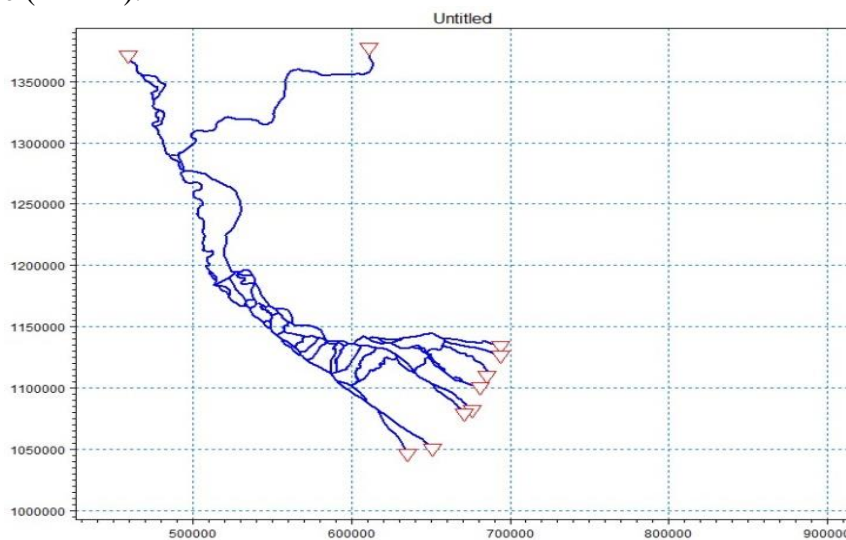


Hình 1. Bản đồ tỉnh Bến Tre.

Mùa khô 2019–2020, xâm nhập mặn diễn biến phức tạp, gay gắt, khốc liệt và vượt mức xâm nhập mặn lịch sử mùa khô 2015–2016. Do góp phần của công tác dự báo, cảnh báo sớm xâm nhập mặn chính xác, kết hợp với kinh nghiệm phòng chống xâm nhập mặn của địa phương nên mặc dù mùa khô 2019–2020 xâm nhập sớm hơn, sâu hơn, kéo dài hơn nhưng thiệt hại về nông nghiệp thấp hơn so với mùa khô 2015–2016.

## 2.2. Thiết lập mô hình

Nghiên cứu đã tiến hành xây dựng bộ mô hình cho khu vực tỉnh Bến Tre với mạng sông được giản lược chỉ còn 47 sông, kênh chính từ Kratie tới các cửa sông ven biển với 1946 điểm nút nhằm phù hợp với số liệu tự cung cấp được nhiều nhất có thể từ Đài KTTV tỉnh Bến Tre (Hình 2).



Hình 2. Sơ đồ hóa mô hình MIKE 11.

Phạm vi của mô hình MIKE 11 trong nghiên này bao gồm: (1) Trên khu vực của Capuchia gồm: dòng chính Sông Mê Kông từ Kratie và Sông Tolesap; (2) Trên khu vực của

Việt Nam gồm các nhánh dòng chính sông Cửu Long: Sông Tiền, sông Hậu, Cổ Chiên, Cung Hầu, Hàm Luông, Cửa Đại, Cửa Tiểu, và các kênh cấp 1, cấp 2.

Biên trên: Mực nước đo được lúc 7 giờ sáng tại trạm Kratie và Prekdam.

Biên dưới: Biên dưới là giá trị thực đo tại các trạm thủy văn tại các cửa sông (do mô hình đã cắt mạng sông đến vị trí các trạm thủy văn gần biển nhất): Cửa Tiểu, Cửa Đại, Hàm Luông, Cổ Chiên, Cung Hầu, Định An, Trần Đề.

Biên mặn: Đối với các biên trên thì độ mặn bằng không; Đối với các biên mặn phía biển: Giá trị biên mặn tại các trạm biên cửa sông là hằng số, được tính bằng trung bình giá trị độ mặn cao nhất quan trắc được qua các năm. Giá trị độ mặn tại các biên của các cửa sông như bảng 2. Biên tại cửa sông Ba Lai là biên đóng.

**Bảng 1.** Thống kê biên trên và số liệu các trạm thủy văn dùng để tính toán triều cho các biên dưới.

TT	Trạm	Sông/Cửa Sông	Tài liệu sử dụng	Loại biên
1	Kratie	Mé Công	H	Biên trên
2	Prekdam	Biển Hồ	H	Biên trên
3	Bình Đại	Cửa Tiểu	H,S	Biên dưới
4	Bình Đại	Cửa Đại	H,S	Biên dưới
5	An Thuận	Hàm Luông	H,S	Biên dưới
6	Bến Trại	Cổ Chiên	H,S	Biên dưới
7	Bến Trại	Hậu	H,S	Biên dưới

**Bảng 2.** Giá trị độ mặn tại các trạm dùng làm biên mặn.

STT	Tên trạm	Giá trị độ mặn (mg/l)
1	Vàm Kênh (Cửa Tiểu)	23
2	Bình Đại (Cửa Đại)	23
3	An Thuận (Hàm Luông)	24
4	Bến Trại (Sông Cổ Chiên)	18
5	Sông Hậu	18

### 2.3. Dữ liệu sử dụng

Tài liệu mặt cắt sông kế thừa từ buổi tập huấn chuyên gia công nghệ về mô hình Mike 11 được tổ chức và tháng 09 năm 2021 tại thành phố Hồ Chí Minh do sự phối hợp giữa tổ chức GIZ, Viện Quy hoạch Thủy lợi Miền Nam thực hiện.

Số liệu mực nước từ tháng 01 đến tháng 06 các năm 2016, 2018, 2020 tại các trạm: An Thuận, Bình Đại, Bến Trại, Chợ Lách, Mỹ Hóa (được cung cấp từ Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Bến Tre), Mỹ Tho (Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Tiền Giang), Trà Vinh (Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Trà Vinh), Kratie và Prekdam (Trung tâm Khí tượng Thủy văn Quốc Gia).

Số liệu lưu lượng tại Mỹ Thuận năm 2016, 2018, 2020.

Số liệu độ mặn tại tất cả các trạm quan trắc trên địa bàn tỉnh Bến Tre các năm 2016, 2018, 2020 (được cung cấp từ Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Bến Tre). Số liệu được đo vào giờ lẻ trong ngày.

### 2.4. Hiệu chỉnh kiểm và kiểm định mô hình

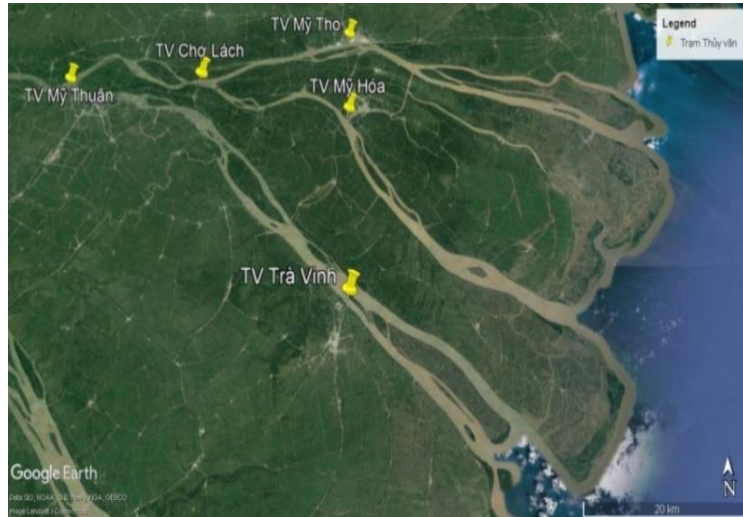
#### 2.4.1. Hiệu chỉnh và kiểm định mô đun MIKE 11 HD

a) Hiệu chỉnh: Với trọng tâm chú ý vào khu vực tỉnh Bến Tre, mô hình được hiệu chỉnh từ tháng 1/2016–6/2016 tại trạm thủy văn ở khu vực tỉnh Bến Tre có số liệu đo đạc trong thời kỳ hiệu chỉnh như hình 3.

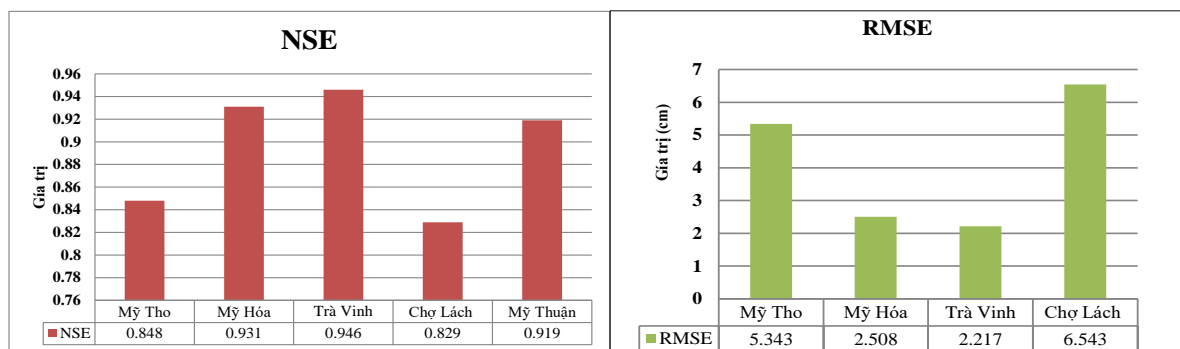


Mô hình đã hiệu chỉnh hệ số nhám Manning (n) tại 17 vị trí trên mạng thủy lực của mô hình. Với hệ số chung  $n = 0,018$ . Tại 17 vị trí hiệu chỉnh hệ số n dao động từ 0,003 đến 0,01.

Kết quả hiệu chỉnh mô đun MIKE 11 HD thể hiện ở hình 4 bởi 02 chỉ số đánh giá: hệ số Nash (*Nash–Sutcliffe efficiency*) (NSE), sai số bình phương trung bình RMSE (Root mean square error) để đánh giá mức độ phù hợp giữa số liệu tính toán của mô hình và số liệu thực đo [10, 23]. Phân tích, ta thấy được kết quả:  $2,5 < RMSE < 6,5$ ,  $0,84 < NSE < 0,94$ . Với kết quả này cho ta thấy mức độ tính toán của mô hình ở mức rất tốt.

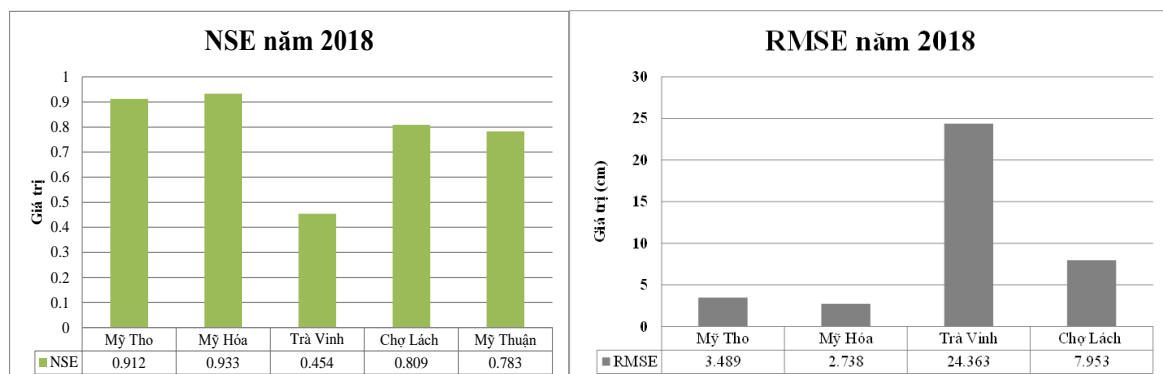


Hình 3. Bản đồ vị trí các trạm hiệu chỉnh và kiểm định mô đun HD.



Hình 4. Biểu đồ giá trị NSE, RMSE đối với năm hiệu chỉnh 2016 tại các trạm.

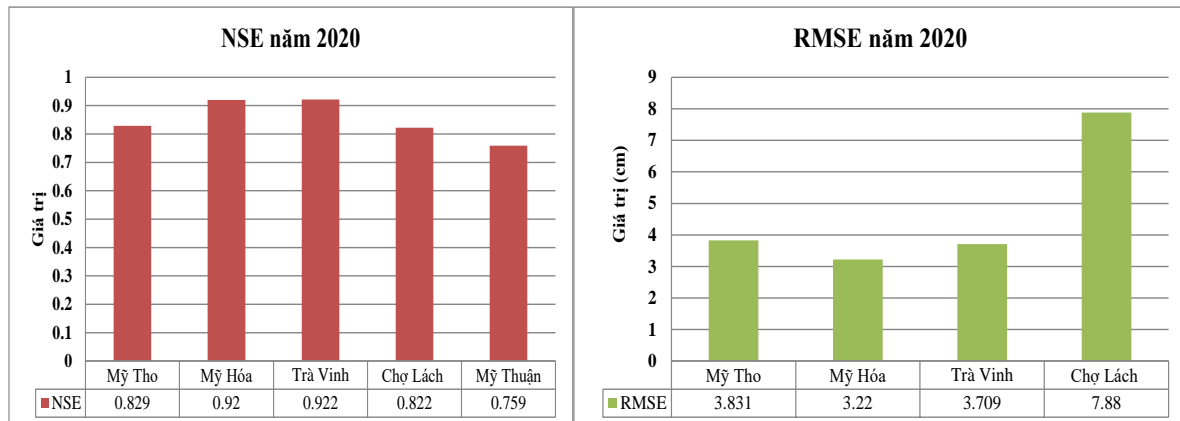
b) Kiểm định: Mô hình được hiệu chỉnh từ tháng 1/2018–6/2018 và từ tháng 1/2020–6/2020 tại trạm thủy văn ở khu vực tỉnh Bến Tre có số liệu đo đạc trong thời kỳ hiệu chỉnh như hình 3.



Hình 5. Biểu đồ giá trị NSE, RMSE đối với năm kiểm định 2018 tại các trạm.

Kết quả kiểm định mô đun MIKE 11 HD bằng số liệu năm 2018 thể hiện ở hình 5, bởi 02 chỉ số số đánh giá. Phân tích ta thấy được kết quả:  $2,7 < RMSE < 7,9$ ,  $0,78 < NSE < 0,93$ . Riêng đối với trạm Trà vinh các chỉ số đánh giá chỉ ở mức đạt. Với kết quả này cho ta thấy mức độ tính toán mô phỏng của mô hình ở mức tốt đến rất tốt đối với các trạm còn lại. Tốt nhất là trạm Mỹ Hóa.

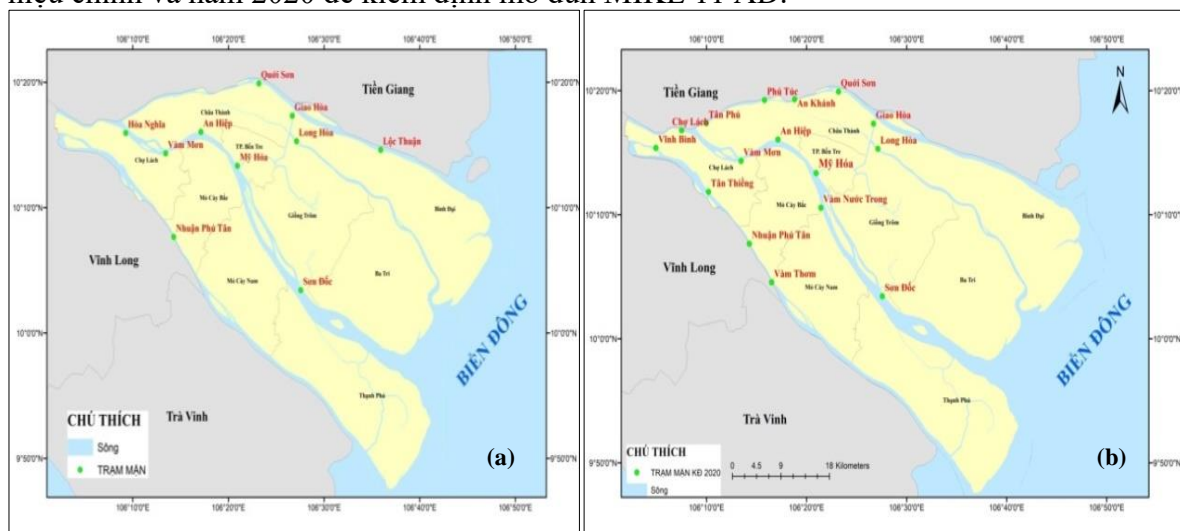
Kết quả kiểm định mô đun MIKE 11 HD bằng số liệu năm 2020 thể hiện ở hình 6, bởi 02 chỉ số số đánh giá. Phân tích ta thấy được kết quả:  $3,2 < RMSE < 7,9$ ;  $0,83 < NSE < 0,92$ . Với kết quả này cho ta thấy mức độ tính toán mô phỏng của mô hình ở mức rất tốt đối với các trạm. Sử dụng bộ thông số được hiệu chỉnh bởi mô đun MIKE 11 HD nói trên, nghiên cứu tiến hành hiệu chỉnh và kiểm định mô đun MIKE 11 AD ở mục 2.4.2.



Hình 6. Biểu đồ giá trị NSE, RMSE đối với năm kiểm định 2020 tại các trạm.

#### 2.4.2. Hiệu chỉnh và kiểm định mô đun MIKE 11 AD

Để đánh giá giá trị hiệu chỉnh và kiểm định, nghiên cứu đánh giá 02 tiêu chí sau: Chênh lệch giữa giá trị độ mặn tính toán và thực đo; Chênh lệch khoảng cách xâm nhập mặn 1‰ và 4‰ giữa tính toán và thực đo. Nghiên cứu dùng số liệu độ mặn năm 2016 để hiệu chỉnh và năm 2020 để kiểm định mô đun MIKE 11 AD.



Hình 7. Vị trí các trạm mặn để hiệu chỉnh 2016 (a) và các trạm mặn kiểm định 2020 (b).

a) Hiệu chỉnh: Để đánh giá kết quả giữa độ mặn tính toán so với độ mặn thực đo tại các trạm của mô hình, nghiên cứu chọn 10 trạm có vị trí thể hiện ở hình 7a. Trích xuất kết quả tính toán của mô hình mô phỏng xâm nhập mặn mùa khô năm 2016 cho ta được kết quả tính toán về độ mặn cao nhất tại các trạm và ranh mặn trên các sông để so sánh với số liệu thực đo như bảng 3 và bảng 4.

**Bảng 3.** So sánh độ mặn lớn nhất (Smax) tính toán và thực đo tại các trạm 2016.

STT	Tên trạm	Sông	Tính toán (‰)	Thực đo (‰)	$\Delta S_{max}$ (‰)
1	Sơn Đốc	Hàm Luông	20,2	27,4	- 7,5
2	Mỹ Hóa	Hàm Luông	11,7	12,4	- 0,7
3	An Hiệp	Hàm Luông	8,8	9,9	-1,1
4	Vàm Mơn	Hàm Luông	6,8	6,7	+ 0,1
5	Hòa Nghĩa	Hàm Luông	3,1	3,0	+ 0,1
6	Nhuận Phú Tân	Cổ Chiên	5,1	5,9	- 0,8
7	Giao Hòa	Cửa Đại	8,0	9,4	- 1,4
8	Quới Sơn	Cửa Đại	5,2	5,1	+ 0,1
9	Long Hòa	Ba Lai	5,6	6,7	-1,1
10	Lộc Thuận	Cửa Đại	21,5	26,1	- 4,6

**Bảng 4.** So sánh kết khoảng cách xâm nhập mặn sâu nhất tính toán và thực đo tại các trạm mùa khô 2016.

STT	Sông	Ranh mặn	Tính toán (km)	Thực đo (km)	$\Delta X$ (km)
1	Hàm Luông	4‰	70	70	Tương đương
		1‰	85	79	+ 6
2	Cổ Chiên	4‰	56	58	- 2
		1‰	65	68	-3
3	Cửa Đại	4‰	54	52	+ 2
		1‰	76	68	+ 8

Độ mặn tính toán và thực đo cao nhất mùa khô chênh lệch rất ít (dao động trong khoảng -1,4 đến +0,1), riêng tại trạm Sơn Đốc độ chênh lệch cao hơn, lên đến -7,5‰ (Bảng 3). Chiều sâu xâm nhập mặn giữa tính toán và thực đo ở mức tương đương nhau đối với ranh mặn 4‰, cho kết quả chênh lệch thấp nhất ở sông Hàm Luông và Cổ Chiên. Mô hình cho kết quả tính toán có chênh lệch nhiều hơn đối với ranh mặn 1‰ (từ -3 đến +8 km). Chênh lệch nhiều nhất đối với sông Cửa Đại (Bảng 3). Với kết quả hiệu chỉnh như trên, nghiên cứu cho rằng đã đáp ứng được yêu cầu của quá trình hiệu chỉnh mô đun MIKE 11 AD, tiến tới kiểm định mô đun MIKE 11 AD.

b) Kiểm định: Để đánh giá kết quả giữa độ mặn tính toán so với độ mặn thực đo tại các trạm của mô hình, nghiên cứu chọn 15 trạm có vị trí thể hiện ở hình 7b. Trích xuất kết quả tính toán của mô hình mô phỏng xâm nhập mặn mùa khô năm 2020 cho ta được kết quả tính toán về độ mặn cao nhất tại các trạm và ranh mặn trên các sông để so sánh với số liệu thực đo như bảng 5 và bảng 6.

Độ mặn tính toán và thực đo cao nhất mùa khô trên sông Hàm Luông chênh lệch ít (dao động trong khoảng -2,7 đến +0,6), riêng tại trạm Sơn Đốc độ chênh lệch cao hơn, lên đến -6,3‰; trên sông Cổ Chiên chênh lệch ít hơn trong khoảng -0,2 đến +2,1; trên sông Cửa Đại chênh lệch nhiều hơn trong khoảng -0,4 đến + 8,3 (Bảng 5). Chiều sâu xâm nhập mặn giữa tính toán và thực đo ở mức tương đương với nhau ở cả 03 sông đối với ranh mặn 4‰ và ranh mặn 1‰ (từ -3 đến + 3 km) (Bảng 6).

**Bảng 5.** So sánh độ mặn lớn nhất (Smax) tính toán và thực đo tại các trạm 2020.

STT	Tên trạm	Sông	Tính toán	Thực đo	$\Delta S_{max}$ (‰)
1	Sơn Đốc	Hàm Luông	21,9	28,2	- 6,3
2	Mỹ Hóa	Hàm Luông	14,5	17,2	- 2,7
3	An Hiệp	Hàm Luông	12,1	13,9	- 1,8
4	Vàm Mơn	Hàm Luông	10,6	11,0	- 0,4
5	Chợ Lách	Hàm Luông	7,3	6,7	+ 0,6
6	Vàm Thơm	Cổ Chiên	9,4	8,6	+ 0,8

STT	Tên trạm	Sông	Tính toán	Thực đo	$\Delta S_{max}$ (‰)
7	Nhuận Phú Tân	Cổ Chiên	8,3	6,2	+ 2,1
8	Tân Thiềng	Cổ Chiên	3,2	4,2	- 1,0
9	Vĩnh Bình	Cổ Chiên	1,7	1,9	- 0,2
10	Giao Hòa	Cửa Đại	18,2	12	+ 6,2
11	Quới Sơn	Cửa Đại	16,8	9,6	+ 7,2
12	An Khánh	Cửa Đại	16,1	7,3	+ 8,1
13	Phú Túc	Cửa Đại	13,1	5,6	+ 7,5
14	Tân Phú	Cửa Đại	6,6	7,0	- 0,4
15	Long Hòa	Ba Lai	17,2	9,5	+ 8,3

**Bảng 6.** So sánh khoảng cách xâm nhập mặn sâu nhất tính toán và thực đo tại các trạm 2020.

STT	Sông	Ranh mặn	Tính toán	Thực đo	$\Delta X$ (km)
1	Hàm Luông	4‰	88	86	+ 2
		1‰	100	100	Tương đương
2	Cổ Chiên	4‰	64	67	- 3
		1‰	80	83	- 3
3	Cửa Đại	4‰	90	87	+ 3
		1‰	102	101	Tương đương

Với kết quả hiệu chỉnh như trên, nghiên cứu cho rằng đã đáp ứng được yêu cầu của quá trình kiểm định mô đun MIKE 11 AD, tiến tới áp dụng mô hình đã được hiệu chỉnh và kiểm định cả 02 mô đun MIKE 11 HD và MIKE 11 AD để xây dựng phương án dự báo xâm nhập mặn trên các sông chính của tỉnh Bến Tre. Với bộ thông số của mô đun MIKE 11 AD có hệ số khuếch tán chung là 200 và thông số này được hiệu chỉnh tại 30 điểm trên mạng thủy lực.

### 3. Kết quả và thảo luận

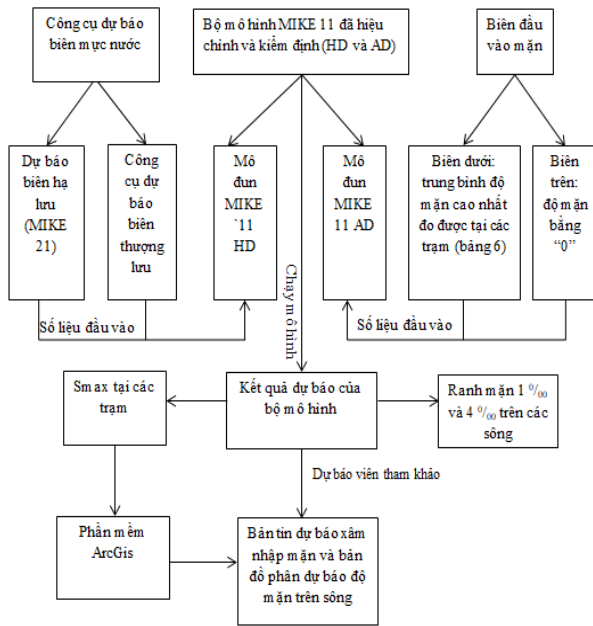
#### 3.1. Sơ đồ phương án dự báo xâm nhập mặn

Phương án dự báo là cách thức cụ thể để phân tích, tính toán, dự báo, cảnh báo các yếu tố hoặc hiện tượng khí tượng thủy văn tại địa điểm hoặc khu vực. Phương án dự báo xâm nhập mặn được thực hiện theo sơ đồ hình 8. Công cụ dự báo biên được thực hiện như sau:

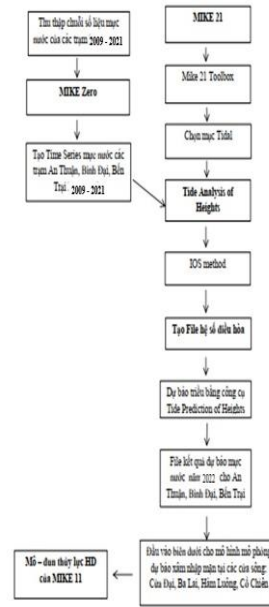
Đối với dự báo biên thương lưu: (1) Dự báo thời hạn 10 ngày: Trên website của Mekong River Commission [http://ffw.mrcmekong.org/bulletin\\_wet.php](http://ffw.mrcmekong.org/bulletin_wet.php) có báo cáo mực nước tuần 7 ngày và dự báo mực nước 7 ngày tiếp theo. Nghiên cứu này sử dụng báo cáo theo tuần 7 ngày trong mùa khô để lấy số liệu mực nước tuần 7 ngày đã qua và dự báo mực nước 7 ngày tiếp theo, dự báo viên tiếp tục dự báo thêm mực nước 3 ngày kế tiếp theo xu thế để được mực nước dự báo 10 ngày. Tổng cộng ta có số liệu thực đo 7 ngày trước đó và mực nước 10 ngày dự báo tại trạm Prekdam và Kratie để làm biên mực nước đầu vào tại biên trên để dự báo xâm nhập mặn trên địa bàn tỉnh 10 ngày; (2) Dự báo thời hạn tháng, mùa sử dụng phương pháp năm tương tự qua 04 bước như hình 10. Trong nghiên cứu này, dự báo trên cơ sở số liệu quan trắc đã có của trạm Kratie và Prekdam trong quá khứ. Từ đó chọn số liệu của năm tương tự để làm số liệu dự báo cho các thời hạn dự báo khác nhau.

Dự báo biên hạ lưu: Nghiên cứu sử dụng bộ công cụ MIKE 21 để dự báo mực nước triều vùng cửa sông bằng phương pháp hằng số triều điều hòa. Các bước thực hiện như sơ đồ hình 9. Dữ liệu sử dụng là mực nước theo giờ của 03 trạm An Thuận, Bình Đại, Bến Trại từ năm 2009–2021.

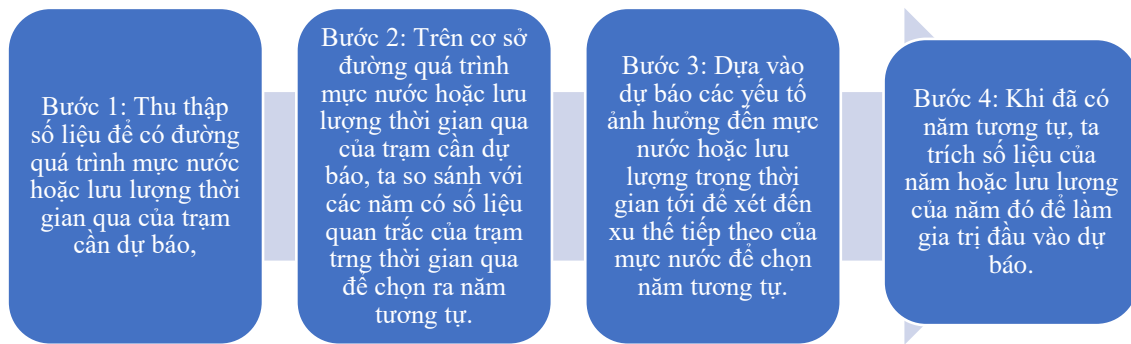




Hình 8. Sơ đồ phương án dự báo xâm nhập mặn.



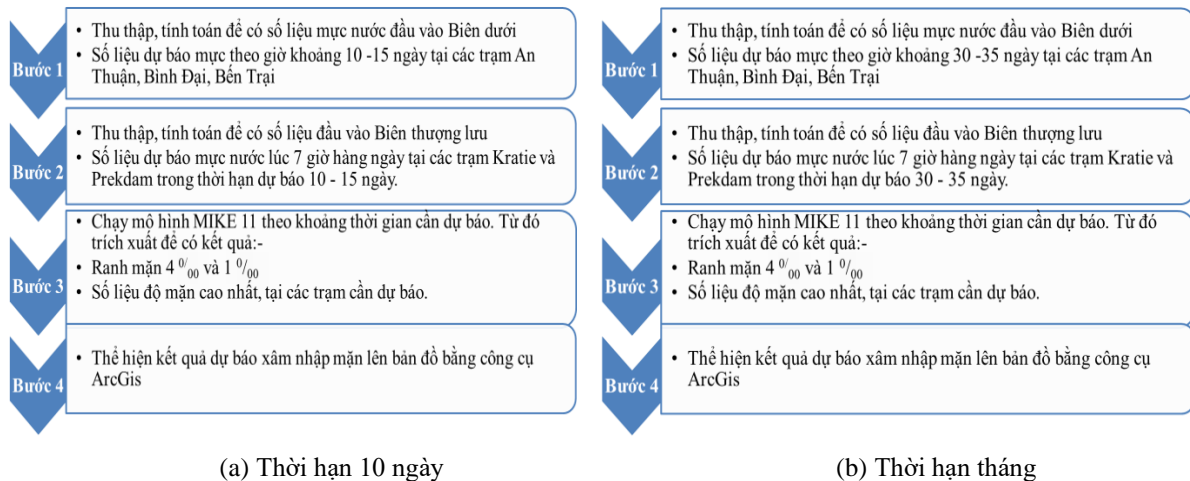
Hình 9. Sơ đồ thực hiện dự báo biên mực nước hạ lưu bằng MIKE 21.

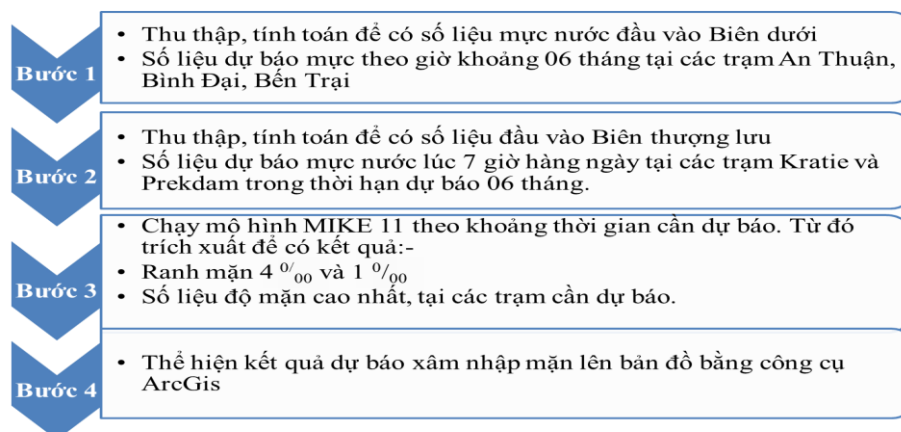


Hình 10. Sơ đồ các bước thực hiện dự báo biên thượng lưu thời hạn tháng, mùa.

### 3.2. Phương án dự báo xâm nhập mặn

Phương án dự báo xâm nhập mặn trong nghiên cứu này được thực hiện theo các thời hạn: thời hạn 10 ngày (Hình 11a), thời hạn tháng (Hình 11b) và thời hạn mùa (Hình 11c). Các bước thực hiện cơ bản giống nhau, chỉ khác ở độ dài của chuỗi số liệu đưa vào tại hai biên để phù hợp với từng thời hạn dự báo.





(c) Thời hạn mùa

**Hình 11.** Sơ đồ phương án dự báo xâm nhập mặn theo từng thời hạn dự báo.

### 3.3. Dự báo xâm nhập mặn cho năm 2022

Nghiên cứu xác định độ tin cậy cho một lần dự báo của độ mặn bằng cách xác định khoảng chênh lệch giữa trị số dự báo, cảnh báo với trị số thực đo độ mặn trong thời điểm dự báo theo 02 đánh giá: một là theo đánh giá của người dự báo viên khi tham khảo kết quả mô hình và hai là theo các chỉ tiêu đánh giá theo Thông tư số 42/2017/TT-BTNMT ngày 23 tháng 10 năm 2017 của Bộ Tài nguyên và Môi trường [24] về Quy định kỹ thuật đánh giá chất lượng dự báo, cảnh báo thủy văn:

Chất lượng dự báo, cảnh báo độ mặn lớn nhất được xác định là “đủ độ tin cậy” khi sai số dự báo, cảnh báo độ mặn lớn nhất nhỏ hơn hoặc bằng 30% độ mặn lớn nhất thực tế và được xác định là “không đủ độ tin cậy” khi sai số dự báo, cảnh báo độ mặn lớn nhất lớn hơn 30% độ mặn lớn nhất thực tế.

Trường hợp dự báo, cảnh báo phạm vi xuất hiện xâm nhập mặn theo chiều dài sông: Chất lượng dự báo, cảnh báo phạm vi xuất hiện xâm nhập mặn được xác định là “đủ độ tin cậy” khi xuất hiện độ mặn dự báo tại các vị trí cách không quá 25% so với khoảng cách dự báo và được xác định là “không đủ độ tin cậy” khi xuất hiện độ mặn dự báo tại các vị trí cách quá 25% so với khoảng cách dự báo.

Để đánh giá độ tin cậy của phương án dự báo, nhóm đã tiến hành dự báo xâm nhập mặn cho năm 2022 với các thời hạn từ mục 3.3.1 đến 3.3.3.

Số liệu biên hạ lưu theo từng thời hạn dự báo, nghiên cứu sử dụng mực nước dự báo năm 2022 từ công cụ dự báo biên hạ lưu đã đề cập ở mục 3.1.

#### 3.3.1. Dự báo 10 ngày (01–10/03/2022)

Nghiên cứu này sử dụng báo cáo “Weekly Dry Season Situation Report in the Lower Mekong River Basin 22–28 February 2022” ngày 28/02/2022 để lấy số liệu mực nước tuần 7 ngày và dự báo mực nước 7 ngày tiếp theo, dự báo viên tiếp tục dự báo thêm mực nước 3 ngày kế tiếp để được mực nước dự báo 10 ngày. Tổng cộng ta có số liệu thực đo 7 ngày trước đó và mực nước 10 ngày dự báo tại trạm Prekdam và Kratie để làm biên mực nước đầu vào tại biên trên để dự báo xâm nhập mặn trên địa bàn tỉnh từ 01–10/03/2022.

Kết quả dự báo thể hiện từ hình 12 đến hình 14. Từ độ mặn cao nhất tại các trạm được trích xuất từ kết quả của mô hình dự báo xâm nhập mặn 10 ngày, ta thể hiện lên bản đồ dự báo bằng công cụ ArcGis ở hình 14. Bản đồ cho ta thấy được cho cái nhìn trực quan, dễ hiểu về độ mặn cao nhất tại các trạm quan tâm, khoảng cách xâm nhập mặn của từng độ mặn quan tâm theo các màu chú thích, quan trọng là ranh mặn 1 ‰ và 4 ‰ trên các sông.

Độ mặn lớn nhất giữa dự báo và thực đo thấp, dao động + 0.3 đến + 3.8 (hình 12). Với chênh lệch này đối với dự báo viên là rất tốt để tham khảo đưa ra chỉ số dự báo cho bản bản

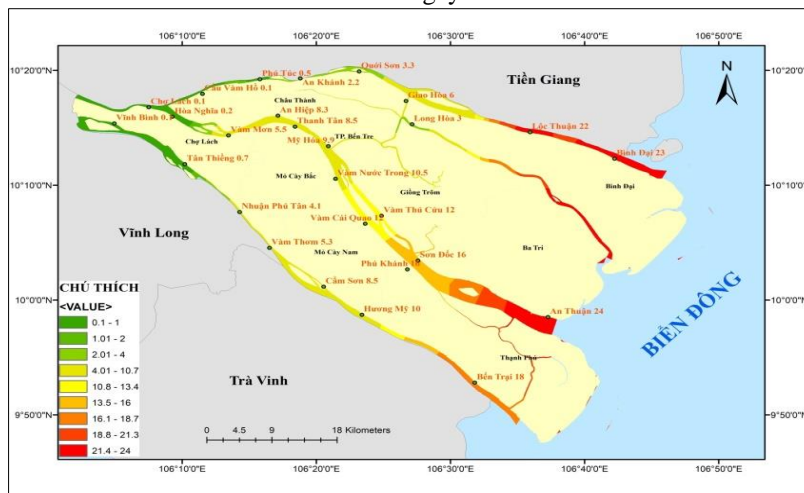
10 ngày. Nếu đánh giá theo quy định của Thông tư 42 bên trên và dự báo viên lấy luôn kết quả của mô hình để đưa ra chỉ số dự báo thì có các trạm đủ độ tin cậy gồm: Phú Khánh, Hòa Nghĩa, Cẩm Sơn, Vàm Thơm; còn lại các trạm khác là không đủ độ tin cậy.

STT	Tên trạm	Sông	Dự báo	Thực đo	$\Delta S_{max}(\%_{00})$	Sai số cho phép TT 42
1	Phú Khánh	Hàm Luông	16.0	13.5	+2.5	4.05
2	Mỹ Hóa	Hàm Luông	9.9	7.2	+2.7	2.2
3	An Hiệp	Hàm Luông	8.3	4.2	+3.8	1.3
4	Vàm Môn	Hàm Luông	5.5	2.5	+3.0	0.8
5	Hòa Nghĩa	Hàm Luông	0.2	0.2	Tương đương	0.06
6	Cẩm Sơn	Cổ Chiên	8.5	7.2	+1.3	2.16
7	Vàm Thơm	Cổ Chiên	5.3	5.0	+0.3	1.5
8	Nhuận Phú Tân	Cổ Chiên	4.1	1.6	+2.5	0.5
9	Tân Thiêng	Cổ Chiên	0.7	0.4	+0.3	0.1
10	Giao Hòa	Cửa Đại	6.0	3.6	+2.4	1.1
11	Quới Sơn	Cửa Đại	3.3	1.1	+2.2	0.33
12	An Khánh	Cửa Đại	2.2	0.1	+2.1	0.03
13	Phú Túc	Cửa Đại	0.5	0.1	+0.4	0.03
14	Long Hòa	Ba Lai	3.0	2.0	+1.0	0.6

STT	Sông	Ranh mặn	Dự báo	Thực đo	$\Delta X$ (km)	Sai số cho phép TT42
1	Hàm Luông	4 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	65 (Phú Sơn)	60 (An Hiệp)	+5km	16.25
		1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	70 (Long Thới)	69 (Long Thới)	+1km	17.5
2	Cổ Chiên	4 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	55 (Nhuận Phú Tân)	52 (Khánh Thạnh Tân)	+3km	13.75
		1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	60 (Vĩnh Thành)	58 (Hưng Khánh Trung)	+2km	15.0
3	Cửa Đại	4 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	43 (Quới Sơn)	41 (Giao Long)	+2km	10.75
		1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	62 (Phú Túc)	50 (Tân Thạch)	+12km	15.5

**Hình 12.** Bảng sai số cho phép Smax thời hạn 10 ngày.

**Hình 13.** Bảng sai số ranh mặn sâu nhất thời hạn 10 ngày.



**Hình 14.** Bản đồ dự báo xâm nhập mặn tỉnh Bến Tre từ 1-10/3/2022.

Để đánh giá dự báo ranh mặn ta phân tích hình 13, ta thấy được chênh lệch giữa ranh mặn dự báo và ranh mặn thực tế trên cả 3 sông rất thấp (dao động trong khoảng +1 đến +5 km), riêng đối với ranh mặn 1<sup>0</sup>/<sub>00</sub> trên sông Cửa Đại ở mức cao (+12 km). Với chênh lệch này đối dự báo viên là rất tốt để tham khảo đưa ra chỉ số dự báo chiều sâu xâm nhập mặn cho bản bản 10 ngày.

Còn nếu đánh giá theo quy định của Thông tư 42 và dự báo viên lấy luôn kết quả của mô hình để đưa ra chỉ số dự báo chiều sâu xâm nhập mặn, thì tất cả chênh lệch giữa chiều sâu ranh mặn dự báo và thực đo đều nằm trong giới hạn sai số cho phép (Hình 13). Vì thế mô hình dự báo 10 ngày về ranh mặn được đánh giá là đủ độ tin cậy.

### 3.3.2. Dự báo thời hạn tháng (03/2022)

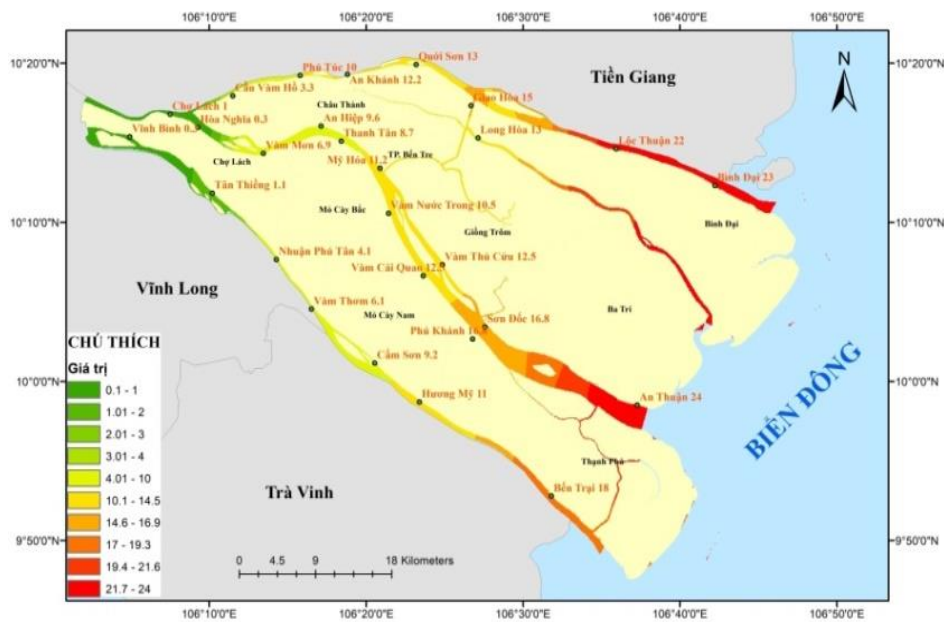
Theo dõi mực nước tại trạm Kratie đến ngày 28/02/2022 và các năm trong khoảng thời gian từ 15/10–28/05 và dung tích hồ TonleSap theo tháng từ tháng 01 đến tháng 02 năm 2022 và dung tích của hồ TonleSap qua các năm, ta thấy có sự tương tự về xu thế và độ cao

mức nước giữa năm 2022 và năm 2021 tại trạm Kratie; có sự tương tự về dung tích hồ của năm 2022 và năm 2021. Do đó, nghiên cứu chọn số liệu mức nước từ tháng 03/ 2021 của 02 trạm Kratie và Prekdam để làm số liệu biên đầu vào tại biên thượng lưu dự báo xâm nhập mặn tháng 03/2022.

STT	Tên trạm	Sông	Dự báo	Thực đo	$\Delta S_{max}$ (‰)	Sai số cho phép TT4
1	Phú Khánh	Hàm Luông	16.8	13.5	+3.3	4.1
2	Mỹ Hóa	Hàm Luông	11.2	7.2	+4.0	2.2
3	An Hiệp	Hàm Luông	9.6	4.2	+5.4	1.3
4	Vàm Môn	Hàm Luông	6.9	2.5	+4.4	0.8
5	Hòa Nghĩa	Hàm Luông	3.3	0.2	+3.1	0.06
6	Cầm Sơn	Cổ Chiên	9.2	7.7	+1.5	2.3
7	Vàm Thơm	Cổ Chiên	6.1	5.3	+0.8	1.6
8	Nhuận Phú Tân	Cổ Chiên	4.1	2.9	+1.2	0.9
9	Tân Thiêng	Cổ Chiên	1.1	1.8	-0.7	0.5
10	Giao Hòa	Cửa Đại	15.0	5.2	+10.8	1.6
11	Quới Sơn	Cửa Đại	13.0	1.9	+10.1	0.6
12	An Khánh	Cửa Đại	12.0	0.2	+11.8	0.06
13	Phú Túc	Cửa Đại	10.0	0.1	+9.9	0.03
14	Long Hòa	Ba Lai	13.0	4.7	+8.6	1.41

STT	Sông	Ranh mặn	Dự báo	Thực đo	$\Delta X$	Sai số cho phép
1	Hàm Luông	4 <sup>0/00</sup>	68	54	+14	17
		1 <sup>0/00</sup>	75	68	+7	18.75
2	Cổ Chiên	4 <sup>0/00</sup>	55	51	+4	13.75
		1 <sup>0/00</sup>	66	72	-6	16.5
3	Cửa Đại	4 <sup>0/00</sup>	73	42	+31	18.25
		1 <sup>0/00</sup>	77	51	+36	19.25

**Hình 15.** Bảng sai số cho phép Smax thời hạn tháng. **Hình 16.** Bảng sai số ranh mặn sâu nhất thời hạn tháng.



**Hình 17.** Bản đồ dự báo xâm nhập mặn tình Bến Tre tháng 3/2022.

Kết quả dự báo tháng 03/2022 thể hiện từ hình 15 đến hình 17. Từ độ mặn cao nhất tại các trạm được trích xuất từ kết quả của mô hình dự báo xâm nhập mặn 01 tháng, ta thể hiện lên bản tin đồ dự báo bằng công cụ ArcGis ở hình 17.

Phân tích kết quả ta thấy được: Độ mặn lớn nhất trong thời hạn dự báo giữa giá trị dự báo và thực đo thấp ở sông Hàm Luông và sông Cổ Chiên (dao động từ - 0,7 đến + 5,4) nhưng chênh lệch lớn hơn nhiều ở sông Cửa Đại và Ba Lai, dao động từ + 8,6 đến + 11,8 (Hình 15). Với chênh lệch này đối với dự báo viên là rất tốt để tham khảo đưa ra chỉ số dự báo độ mặn cao nhất tại các trạm trên các sông Hàm Luông và Cổ Chiên cho bản tin 01 tháng, nhưng ngược lại kết quả chỉ số dự báo độ mặn cao nhất tại các trạm trên sông Ba Lai và Cửa Đại là không tốt để dự báo viên tham khảo.



Nếu đánh giá độ tin cậy theo quy định của Thông tư 42 nói trên và dự báo viên lấy luôn kết quả của mô hình để đưa ra chỉ số dự báo thì có các trạm đủ độ tin cậy gồm: Phú Khánh, Cẩm Sơn, Vàm Thom; còn lại các trạm khác là không đủ độ tin cậy.

Để đánh giá dự báo ranh mặn tháng 03/2022 ta phân tích hình 16, ta thấy được chênh lệch giữa ranh mặn dự báo và ranh mặn thực tế trên 02 sông Hàm Luông và Cổ Chiên thấp (dao động trong khoảng -6 đến +7 km), riêng đối với ranh mặn 4<sup>0</sup>/<sub>00</sub> trên sông Hàm Luông ở mức cao (+14 km). Với chênh lệch này đối dự báo viên là rất tốt để tham khảo đưa ra chỉ số dự báo chiều sâu xâm nhập mặn trên sông Hàm Luông và Cổ Chiên cho bản tin thời hạn tháng, tuy nhiên cần lưu ý khi đưa ra giá trị khoảng cách ranh mặn 4<sup>0</sup>/<sub>00</sub> trên sông Hàm Luông. Mặc khác, trên sông Cửa Đại chênh lệch giữa ranh mặn dự báo và ranh mặn thực tế rất cao (từ +31 đến +36 km), với chênh lệch này dự báo viên không thể áp dụng tham khảo kết quả dự báo theo thời hạn tháng đối với sông Cửa Đại.

Nếu đánh giá độ tin cậy theo quy định của Thông tư 42 và dự báo viên lấy luôn kết quả của mô hình để đưa ra chỉ số dự báo chiều sâu xâm nhập mặn, thì tất cả chênh lệch giữa chiều sâu ranh mặn dự báo và thực đo đều nằm trong giới hạn sai số cho phép, chỉ riêng kết quả dự báo ranh mặn trên sông Cửa Đại là không đủ độ tin cậy (Hình 16).

Với đánh giá độ tin cậy như thế thì mô hình dự báo tháng về ranh mặn được đánh giá là chỉ đủ độ tin cậy đối với sông Hàm Luông và Cổ Chiên.

### 3.3.3. Dự báo thời hạn mùa (01–06/2022)

Theo dõi mực nước tại trạm Kratie năm 2021 và các năm trong khoảng thời gian từ 18/05–30/10 và dung tích hồ TonleSap theo tháng năm 2021 và các năm của hồ TonleSap qua các năm, ta thấy có sự tương tự về xu thế và độ cao mực nước giữa năm 2021 và năm 2020 tại trạm Kratie; có sự tương tự về dung tích hồ của năm 2021 và năm 2020. Do đó, nghiên cứu chọn số liệu mực nước từ tháng 01–06/2021 của 02 trạm Kratie và Prekdam để làm số liệu biên đầu vào tại biên thượng lưu dự báo cho mùa khô 2022.

Kết quả dự báo thể hiện từ hình 18 đến hình 20. Từ độ mặn cao nhất tại các trạm được trích xuất từ kết quả của mô hình dự báo xâm nhập mặn 10 ngày, ta thể hiện lên bản đồ dự báo bằng công cụ ArcGis ở hình 20. Phân tích kết quả dự báo ta thấy được: Độ mặn lớn nhất giữa giá trị dự báo và thực đo trên sông Cổ Chiên có mức chênh lệch thấp, dao động từ -0,6 đến +1,9; trên sông Hàm Luông ở mức chênh lệch cao hơn, dao động từ +3,2 đến +6,5; trên sông Cửa Đại chênh lệch này rất cao, dao động từ +13,7 đến +17,5 (Hình 18). Với chênh lệch này đối với dự báo viên là rất tốt để tham khảo đưa ra chỉ số dự báo độ mặn cao nhất cho bản tin thời hạn mùa đối với sông Cổ Chiên, chấp nhận được trên sông Hàm Luông và không tốt đối với sông Cửa Đại.

STT	Tên trạm	Sông	Dự báo	Thực đo	$\Delta S_{max}(\text{‰})$	Sai số cho phép TT 42
1	Phú Khánh	Hàm Luông	18.0	14.8	+3.2	4.4
2	Mỹ Hóa	Hàm Luông	13.5	8.0	+5.3	2.4
3	An Hiệp	Hàm Luông	12.0	5.5	+6.5	1.7
4	Vàm Mơn	Hàm Luông	9.0	3.0	+6.0	0.9
5	Hòa Nghĩa	Hàm Luông	6.4	0.5	+5.9	0.2
6	Cẩm Sơn	Cổ Chiên	9.6	7.7	+1.9	2.1
7	Vàm Thom	Cổ Chiên	6.4	5.3	+1.1	1.6
8	Nhuận Phú Tân	Cổ Chiên	4.2	3.1	+1.1	0.9
9	Tân Thiêng	Cổ Chiên	1.2	1.8	-0.6	0.54
10	Giao Hòa	Cửa Đại	19.5	5.2	+14.3	1.56
11	Quới Sơn	Cửa Đại	18.3	1.9	+16.4	0.6
12	An Khánh	Cửa Đại	17.9	0.2	+17.5	0.06
13	Phú Túc	Cửa Đại	15.2	0.1	+15.1	0.03
14	Long Hòa	Ba Lai	18.4	4.7	+13.7	1.41

Hình 18. Bảng sai số cho phép Smax thời hạn mùa.

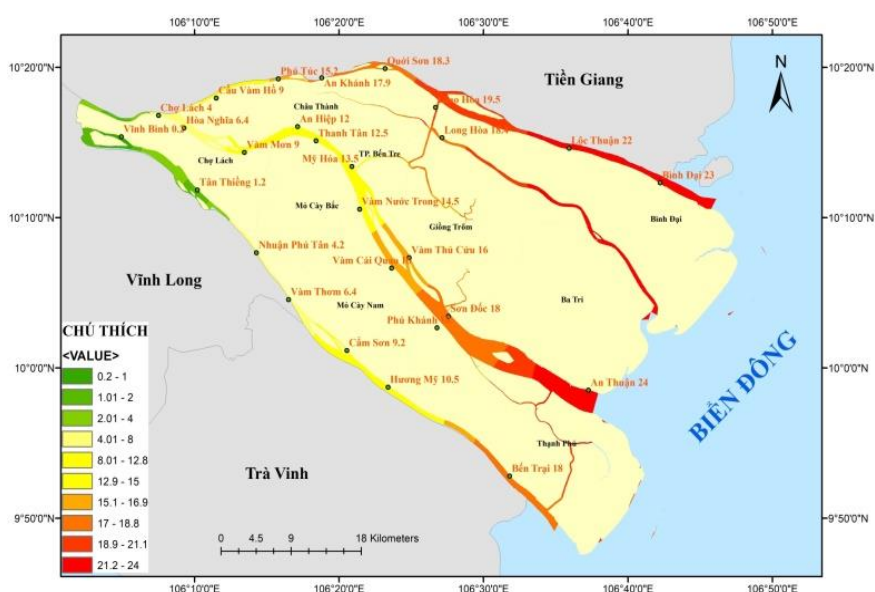
STT	Sông	Ranh mặn	Dự báo	Thực đo	$\Delta X$ (km)	Sai số cho phép TT42
1	Hàm Luông	4 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	75	60	+15	17.5
		1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	90	70	+20	22.5
2	Cổ Chiên	4 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	55	51	+4	13.75
		1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	66	72	-6	16.5
3	Cửa Đại	4 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	77	42	+33	19.25
		1 <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	92	51	+41	23

Hình 19. Bảng sai số ranh mặn sâu nhất thời hạn mùa.

Nếu đánh giá độ tin cậy theo quy định của Thông tư 42 bên trên và dự báo viên lấy luôn kết quả của mô hình để đưa ra chỉ số dự báo thì có các trạm đủ độ tin cậy gồm: Phú Khánh, Cẩm Sơn, Vàm Thom, Tân Thiềng; còn lại các trạm khác là không đủ độ tin cậy.

Ta thấy được chênh lệch giữa ranh mặn dự báo và ranh mặn thực tế trên sông Cỏ Chiên ở mức thấp, dao động trong khoảng -6 đến +4 km; trên sông Hàm Luông ở mức cao, dao động từ +15 đến +20 km; trên sông Cửa Đại thì chênh lệch này quá cao, dao động từ +33 đến +41 km. Với chênh lệch này đối với dự báo viên là rất tốt để tham khảo đưa ra chỉ số dự báo ranh mặn cho bản tin thời hạn mùa đối với sông Cỏ Chiên, không tốt trên sông Hàm Luông và không chấp nhận được đối với sông Cửa Đại (Hình 19).

Còn nếu đánh giá độ tin cậy theo quy định của Thông tư 42 và dự báo viên lấy luôn kết quả của mô hình để đưa ra chỉ số dự báo chiều sâu xâm nhập mặn, thì tất cả chênh lệch giữa chiều sâu ranh mặn dự báo và thực đo điều nằm trong giới hạn sai số cho phép, trừ sông Cửa Đại (Hình 19). Với đánh giá độ tin cậy như thế thì mô hình dự báo theo thời hạn mùa về ranh mặn được đánh giá là chỉ đủ độ tin cậy đối với sông Hàm Luông và Cỏ Chiên.



Hình 20. Bản đồ dự báo xâm nhập mặn sâu nhất tình Bến Tre tháng 01–06/2022.

#### 4. Kết luận

- Xâm nhập mặn là một yếu tố dự báo rất phức tạp và khó dự báo. Với mạng lưới thủy lực đơn giản, số liệu tự cung cấp được nhiều nhất tại Đài KTTV tỉnh Bến Tre, nhóm đã xây dựng được một phương án dự báo xâm nhập mặn bằng mô hình MIKE 11, MIKE 21 và thể hiện bản đồ trên nền ArcGis cho độ tin cậy ổn định áp dụng vào nghiệp vụ dự báo của Đài tỉnh. Phương án này giúp cho các dự báo viên của Đài KTTV tỉnh Bến Tre tự chủ động trong phương án dự báo của mình, áp dụng công nghệ khoa học tiên tiến hơn so với dự báo truyền thống, mang tính kế thừa hơn cho phương pháp dự báo.

- Kết hợp với công cụ ArcGis, phương án dự báo đã cho kết quả dự báo với bản đồ trực quan và dễ hiểu hơn so với bảng biểu thông thường, đáp ứng với quy định các mẫu bản tin dự báo của ngành.

- Phương án này đủ độ tin cậy trong việc dự báo ranh mặn 1<sup>0</sup>/<sub>00</sub> và 4<sup>0</sup>/<sub>00</sub> trên các sông chính của tỉnh (ngoại trừ dự báo thời hạn tháng, mùa trên sông Cửa Đại).

- Đối với thời hạn dự báo 10 ngày, phương án dự báo có độ tin cậy để áp dụng dự báo trên cả ba sông chính; đối với dự báo thời hạn tháng, phương án có độ tin cậy rất tốt trên sông Cỏ Chiên, đủ độ tin cậy đối với sông Hàm Luông và không đủ độ tin cậy đối với

sông Cửa Đại; đối với hạn mùa, phương án có độ tin cậy rất tốt đối với sông Cỏ Chiên, độ tin cậy thấp đối với sông Hàm Luông và không đủ độ tin cậy đối với sông Cửa Đại.

- Phương án dự báo này hạn chế sau:
    - Sai số tuyệt đối giữa giá trị thực đo và tính toán khá lớn đối với sông Cửa Đại ở thời hạn dự báo tháng và mùa;
    - Biên mặn đầu vào của mô hình thường được chọn là giá trị cao nhất trung bình nhiều năm nên khi dự báo dài hạn thường cho sai số lớn.
    - Do dự báo biên thượng lưu sử dụng phương pháp năm tương tự nên còn mang tính chủ quan của dự báo viên, kết quả dự báo chưa sát với thực tế nhất là dự báo tháng và mùa.
    - Mô hình chưa đưa vào các mạng lưới kênh rạch nhỏ của Bến Tre; các hệ thống cống, đập tạm; vận hành cống Ba Lai; lượng mưa tại các trạm trên lưu vực.
- Kiến nghị: Đưa vào sử dụng dự báo nghiệp vụ tại Đài KTTV tỉnh Bến Tre những năm tiếp theo nhưng cần lưu ý và có thể bổ sung, phát triển các vấn đề sau:
- Phương án dự báo xâm nhập mặn chỉ tập trung đánh giá trị số dự báo của độ mặn cao nhất tại các trạm và ranh mặn nên dự báo viên với kinh nghiệm và hiểu biết của mình về bản chất của xâm nhập mặn tại tỉnh thì hoàn toàn có thể đưa vào bản tin dự báo thời gian xuất hiện độ mặn cao nhất tại các trạm.
  - Mô hình sau hiệu chỉnh và kiểm định cho kết quả tính toán mực nước rất tốt thể hiện qua các hệ số đánh giá  $R^2$ , RMSE, NSE. Do đó có thể sử dụng để dự báo mực nước cho các trạm trạm sông chính của tỉnh Bến Tre.
  - Đưa vào vị trí các cống, đập tạm trên các sông cùng với lịch vận hành cống lớn (Ba Lai).
  - Số liệu đầu vào biên mặn nên lấy theo trung bình độ mặn cao nhất theo tháng sẽ cho kết quả tính toán, dự báo khả quan hơn.

**Đóng góp của tác giả:** Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: Đ.H.L.; Xử lý số liệu: Đ.H.L., N.P.Đ., N.V.S.; Chạy mô hình: Đ.H.L.; Viết bản thảo bài báo: Đ.H.L.; Chỉnh sửa bài báo: Đ.H.L.

**Lời cảm ơn:** Bài báo hoàn thành có sự hỗ trợ về mặt dữ liệu của Trung tâm dự báo Khí tượng Thủy văn Quốc gia, Đài Khí tượng Thủy văn Khu vực Nam Bộ, Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Trà Vinh, Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Tiền Giang.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

#### **Tài liệu tham khảo**

1. Conrads, P.A.; Roehl, E.A.; Jr.Daamen, R.C.; Cook. Simulation of salinity intrusion along the Georgia and South Carolina coasts using climatechange scenarios. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2013, 5036, pp. 92, and pp. 5.
2. Chubarenko, I.; Tchepikova, I. Modeling of man-made contribution to salinity increase into the Vistula Lagoon (Baltic Sea). *Ecol. Modell.* **2001**, 138(1–3), 87–100.
3. Vialard, J.; Deleclúe, P.; Menkes, C. A modeling study of salinity variability and its effects in the tropical Pacific Ocean during the 1993–1999 period. *J. Geophys. Res.* **2002**, 107(C12), 8005. Doi:10.1029/2000JC000758.
4. Balistrieri, L.S.; Tempel, R.N.; Stillings, L.; Shevenell, L.A. Modeling spatial and temporal variations in temperature and salinity during stratification and overturn in Dexter Pit Lake, Tuscarora, Nevada, USA. *Appl. Geochem.* **2006**, 21(7), 1184–1203.

5. Zhang, X.; Deng, J. Affecting Factors of Salinity Intrusion in Pearl River Estuary and Sustainable Utilization of Water Resources in Pearl River Delta, Hydraulic Institute of the Pearl River, Tianhe District, Guangzhou 510611, China.
6. Khuê, N.N. Modelling of tidal propagation and salinity intrusion in the Mekong main estuarine system. Technical paper, Mekong Secretariat, 1986.
7. Đắc, N.T.; Điệp, N.V.; Sơn, N.M. Mô hình tính toán dòng chảy và chất lượng nước trên hệ thống kênh, sông (WFQ87) và kỹ thuật chương trình. Ủy ban Quốc gia về Chương trình Thủy văn Quốc tế của Việt Nam, 1988.
8. Xuân, T.T. Đặc điểm thủy văn và nguồn nước sông Việt Nam. NXB Nông Nghiệp, 2007.
9. Sâm, L. Nghiên cứu xâm nhập mặn phục vụ phát triển kinh tế – xã hội vùng ven biển đồng bằng sông Cửu Long. Đề tài NCKH cấp Nhà nước, KC-08.18 thuộc Chương trình Bảo vệ Môi trường và Phòng tránh thiên tai, mã số KC 08, 2004.
10. Trí, Đ.Q. Ứng dụng mô hình Mike 11 mô phỏng và tính toán xâm nhập mặn cho khu vực Nam Bộ. *Tap chí khí tượng thủy văn* **2016**, 671, 39–46.
11. Dũng, Đ.V.; Phương, T.Đ.; Oanh, L.T.; Công, T.T. Khai thác mô hình Mike 11 trong dự báo, cảnh báo xâm nhập mặn vùng đồng bằng sông Cửu Long. *Tap chí Khí tượng thủy văn* **2018**, 693, 48–58.
12. Đạt, T.Q.; Trung, N.H.; Likitdecharote, K. Mô phỏng xâm nhập mặn đồng bằng sông Cửu Long dưới tác động mực nước biển dâng và sự suy giảm lưu lượng từ thượng nguồn. *Tap chí Khoa học* **2012**, 21b, 141–150.
13. Ha, N.T.T.; Trang, H.T.; Vuong, N.V.; Khoi, D.N. Simulating impacts of sea level rise on salinity intrusion in the Mekong Delta, Vietnam in the period 2015–2100 using Mike 11. Proceedings of the IEEE 2014.
14. Hai, T.X.; Nghi, V.V.; Hung, V.H.; Tuan, D.N.; Lam, D.T.; Van, C.T. Assessing and Forecasting Saline Intrusion in the Vietnamese Mekong Delta Under the Impact of Upstream flow and Sea Level Rise. *J. Environ. Sci. Eng.* **2019**, B8, 174–185.
15. Hà, N.N.; Trình, N.M.; Minh, H.T.N. Ứng dụng mô hình MIKE NAM, MIKE 11 HD tính toán tài nguyên nước mặt lưu vực sông Cửu Long. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2021**, 731, 54–68.
16. Anh, D.T.; Long, H.P.; Minh, D.B.; Rutschmann. Simulating Future Flows and Salinity Intrusion Using Combined One- and Two Dimensional Hydrodynamic Modelling–The Case of Hau River, Vietnamese Mekong Delta. *Water* **2018**, 10, 897.
17. Doan, Q.T., Nguyen, C.D., Chen, Y.C.; Pawan, K.M. Modeling the Influence of River Flow and Salinity Intrusion Processing in the Mekong River Estuary, Vietnam. *Lowland Technol. Int.* **2014**, 16(1), 14–25.
18. DHI. Study on the Impacts of Mainstream Hydropower on the MeKong River is Preliminary Draft – Impact Assessment Report October 2015. Volume 1 – Models, Model Setup and Simulations, 2015.
19. Khang, D.N.; Kotera, A.; Sakamoto, T.; Yokozawa, M. Sensitivity of Salinity Intrusion to Sea Level Rise and River Flow Change in Vietnamese Mekong Delta–Impacts on Availability of Irrigation Water for Rice Cropping. *J. Agric Meteorol.* **2008**, 64, 167–176.
20. Anh, H.T.; Dung, T.T.; Thủy, N.T.T.; Phương, T.A. Nghiên cứu kết hợp mô hình thủy lực và mô hình trí tuệ nhân tạo mô phỏng chất lượng nước sông Nhuệ – Đáy. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2022**, 739, 67–80.
21. Đào, N.V.; Bình, P.T.T. Đánh giá thực trạng và tác động của Biến đổi khí hậu đến xâm nhập mặn tỉnh Bến Tre. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2019**, 700, 12–22.



22. Thai, T.T.; Liem, N.D.; Luu, P.T.; Yen, N.T.M.; Yen, T.T.H.; Quang, N.X.; Tan, L.V.; Hoai, P.N. Performance evaluation of Auto – Regressive Integrated Moving Average Models for forecasting salwater intrusion into the Mekong river estuaries of Vietnam. *VN J. Earth. Sci.* **2021**, *44*, 18–32.
23. Thái, T.H.; Trí, Đ.Q.; Tuyên, T.Đ.T.; Tâm, N.T.; Dịu, B.T. Áp dụng mô hình MIKE SHE kết hợp sử dụng sản phẩm mưa dự báo lưu lượng đến hồ lưu vực sông Trà Khúc – Sông Vệ. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2019**, *697*, 1–12.
24. Bộ Tài nguyên và Môi trường, Quy định kỹ thuật đánh giá chất lượng dự báo, cảnh báo thủy văn. Thông tư số 42/2017/TT-BTNMT ngày 23 tháng 10 năm 2017.

## **Developed a saline intrusion forecasting plan on the main river in Ben Tre**

**Dang Hoang Lam<sup>1\*</sup>, Nguyen Phuoc Dinh<sup>2</sup>, Nguyen Van Sy<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Ben Tre Hydro–meteorological Center, Southern Hydro–meteorological Regional Center, Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration; danghoanglam91@gmail.com

<sup>2</sup> Ben Tre Hydro–meteorological Center, Southern Hydro–meteorological Regional Center, Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration; dinhnguyenphuoc1976@gmail.com

<sup>3</sup> Ben Tre Hydro–meteorological Center, Southern Hydro–meteorological Regional Center, Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration; nguyenvansy.cl@gmail.com

**Abstract:** Every year during the dry season, the rivers in Ben Tre province often suffer from saline intrusion which affect production and people’s lives from February to April, with a salinity level of 4<sup>0</sup>/<sub>00</sub> infiltrating an average of 40–50 km from the river estuaries. Therefore, it is necessary to forecast the saline intrusion situation to help the locality have appropriate production plans. In this study, the MIKE 11, MIKE 21 models were combined with ArcGIS to display the map results. The research results show that for 10–day forecast period, the forecast option is reliable for all three main rivers. For a monthly forecast, the forecast option is highly reliable for the Co Chien River, reliable enough for the Ham Luong River, and not reliable enough for the Cua Dai River. For a seasonal forecast, the forecast option is highly reliable for the Co Chien River, reliable enough for the Ham Luong River, and not reliable enough for the Cua Dai River. The forecast plan has been applied by the Ben Tre Province Hydro–Meteorological Station for the dry season in 2022 and subsequent years, especially for the 10–day and monthly forecast periods.

**Keywords:** Mike 11 model; Mike 21; AcrGis; Saltwater intrusion; Ben Tre.

Bài báo khoa học

## Đánh giá xu thế biến đổi mưa, nhiệt độ tỉnh Kiên Giang

Đinh Thị Việt Hà<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Đai Khí tượng Thủy văn tỉnh Kiên Giang; viethakttv@gmail.com

\*Tác giả liên hệ: viethakttv@gmail.com; Tel.: +84–911679393

Ban Biên tập nhận bài: 25/1/2023; Ngày phản biện xong: 21/2/2023; Ngày đăng bài: 25/3/2023

**Tóm tắt:** Trong những năm gần đây do ảnh hưởng của BĐKH các hiện tượng thời tiết diễn ra bất thường không theo quy luật của khí hậu, sự thay đổi này sẽ ảnh hưởng và tác động mạnh mẽ đến các ngành kinh tế-xã hội có liên quan, đời sống người dân, cũng như cây trồng và vật nuôi đối với tỉnh Kiên Giang nói riêng và Việt Nam nói chung. Vì thế, việc đánh giá xu thế biến đổi mưa, nhiệt độ là điều cần thiết. Dựa trên phương pháp thống kê, hàm tuyến tính  $y = A_0 + A_1t$ , chuỗi số liệu nhiệt độ, lượng mưa trong 30 năm qua (từ năm 1992–2022), để đánh giá phân bố theo không gian các biến trình năm của vùng, sự biến đổi của mưa, nhiệt độ theo mùa, năm, tháng, ngày và xu thế qua từng thập kỷ. Kết quả cho ta thấy được sự biến động mạnh mẽ của khí hậu trong vùng. Mặc dù những quy luật mang tính trung bình, chỉ mới cho ta những nhận thức khái quát. Chính đặc điểm này là tiền đề để đánh giá sự xuất hiện những dị thường khí hậu hàng năm. Với sự tăng của nhiệt độ, giảm về lượng mưa khu vực Thổ Chu, tăng lượng mưa khu vực Phú Quốc và Rạch Giá, cho ta thấy được khắc nghiệt của thời tiết đang có xu hướng tăng lên. Kết quả nghiên cứu đã đóng góp thêm vào cơ sở dữ liệu trong lĩnh vực khí tượng khí hậu ở Kiên Giang.

**Từ khóa:** Biến đổi khí hậu; Xu thế biến đổi mưa; Nhiệt độ; Ảnh hưởng mưa nhiệt; Tỉnh Kiên Giang.

### 1. Giới thiệu

Khí hậu tài nguyên thiên nhiên đặc biệt, là điều kiện thường xuyên của mọi quá trình chuyên hóa, phát triển. Những đặc trưng cơ bản của khí hậu và quy luật diễn biến của nó đã chi phối động lực phát triển trong tự nhiên và xã hội. Vì thế, việc hiểu biết khí hậu tại một vùng, thậm chí một phạm vi hẹp hơn là nền tảng không thể thiếu cho mọi công tác tổ chức, quy hoạch, thiết kế, điều hành trong sản xuất, đời sống. Trong các yếu tố khí hậu, lượng mưa là yếu tố được quan tâm nhiều nhất và là yếu tố khó dự báo nhất, biến động của lượng mưa có thể dẫn đến thay đổi cân bằng nước và ảnh hưởng đến các lĩnh vực kinh tế-xã hội. Kiên Giang chịu ảnh hưởng của khí hậu nhiệt đới gió mùa cận xích đạo với những nét đặc sắc liên quan tới ảnh hưởng của gió mùa tây nam. Một đặc điểm quan trọng của khí hậu Kiên Giang là sự tương phản giữa hai mùa mưa ẩm rất sâu sắc [1]. Lượng mưa trong suốt mùa khô, từ tháng 11 đến tháng 4 thường chỉ chiếm 7–8% lượng mưa toàn năm. Trái lại, vào mùa hạ lượng mưa rất lớn, đóng góp trên 90% lượng mưa toàn năm và nâng lượng mưa toàn năm lên những giá trị thuộc loại cao ở nước ta: 1800–2800 mm/năm [2–4]. Những năm gần đây tình trạng thiếu hụt nước trong những tháng mùa khô đã trở thành mối quan tâm thường xuyên tại các tỉnh đồng bằng Sông Cửu Long, thiệt hại kinh tế do thiên tai hạn hán, xâm nhập mặn lên tới hàng nghìn tỷ đồng mỗi năm. Do vậy, bên cạnh việc tiếp tục nâng cao chất lượng dự báo, cảnh báo khô hạn, một trong những yêu cầu cấp bách của cộng đồng và những người hoạch định chính sách trung hạn hiện nay đặt ra là xác định thời điểm kết thúc quá trình khô hạn nói trên.

Mưa là một trong những yếu tố khí tượng có tính bất đồng nhất và biến động lớn theo không gian và thời gian. Sự hình thành mưa phụ thuộc phức tạp vào nhiều quá trình khác nhau như các hình thái thời tiết, độ ổn định khí quyển, đặc điểm địa lý, điều kiện địa hình của địa phương. Hiểu biết đầy đủ về đặc điểm và quy luật biến thiên theo không gian và thời gian của mưa sẽ góp phần nâng cao chất lượng các bản tin dự báo mưa cũng như công tác phòng chống thiên tai. Trong những năm gần đây do ảnh hưởng của Biến đổi khí hậu làm cho các yếu tố khí hậu ở Kiên Giang có sự thay đổi rõ rệt trong đó có nhiệt độ, lượng mưa thể hiện trong kịch bản BĐKH và nước biển dâng cho Việt Nam năm 2016 và năm 2020 [5–6].

Các nghiên cứu về xu thế biến đổi lượng mưa được áp dụng rộng rãi trong nước và trên thế giới như Fernández và css đã phân tích xu thế biến đổi của lượng mưa và nhiệt độ tại lưu vực sông Genil (Đông nam Tây Ban Nha) từ 1970–2010 sử dụng kiểm định phi tham số Mann–Kendall, nghiên cứu đã chỉ xác định được xu thế tăng của nhiệt độ tại lưu vực sông Genil, tuy nhiên đối với lượng mưa xu thế biến đổi không rõ ràng [7], năm 2017, [8] đã đánh giá xu thế biến đổi lượng mưa và hạn hán ở Aegean, Thổ Nhĩ Kỳ, nghiên cứu này sử dụng phương pháp hồi quy tuyến tính đã xác định xu thế biến đổi của lượng mưa các tháng 12, 1, 2, 3 tại Aegean có xu thế giảm, năm 2018, [9] đã phân tích xu thế biến đổi lượng mưa tháng ở sông Limbang, Malaysia sử dụng kiểm định Mann–Kendall và Spearman’s Rho, kết quả của nghiên cứu cho thấy xu thế của lượng mưa trên lưu vực sông Limbang tăng/giảm khác nhau thể hiện tính bất đồng nhất của lượng mưa theo thời gian. Trong nước có nhiều nghiên cứu về xu thế biến đổi của lượng mưa [10–11] đã áp dụng Mann–Kendall “Kiểm nghiệm phi tham số xu thế biến đổi của một số yếu tố khí tượng giai đoạn 1961–2007”, [12] đã đánh giá xu thế biến đổi của lượng mưa thời đoạn lớn nhất ở Tp. Hồ Chí Minh giai đoạn 1971–2016 bằng kiểm định phi tham số Mann–Kendall, [13] đã nghiên cứu đặc điểm xu thế biến đổi mưa nhiệt tỉnh Kiên Giang. Tại Tây Nguyên, năm 2014, [14] đã hoàn thành đề tài nghiên cứu cấp Bộ “Nghiên cứu điều kiện khí hậu nông nghiệp phục vụ phát triển kinh tế–xã hội và phòng tránh thiên tai vùng Tây Nguyên”. Kết quả của đề tài cho thấy xu thế biến đổi lượng mưa cực đại trong 1 ngày và trong 5 ngày liên tiếp ( $R \times 5\text{day}$ ) tăng trên hầu hết các trạm và chỉ giảm ở 3 trạm (Đà Lạt, Ayunpa và Đăk Nông). Mức độ tăng nhanh nhất của lượng mưa cực đại trong 1 ngày được ghi nhận là 12,7 mm/10năm (tại Buôn Ma Thuột). Đối với mưa lớn và mưa rất lớn, kết quả tính toán cũng cho thấy xu hướng tăng trên hầu hết các trạm ở Tây Nguyên, [15] lượng mưa năm trung bình khoảng 1.300 ÷ 2.900mm, trung bình toàn vùng là 1.955mm. Mưa lớn tập trung ở khu vực các tỉnh Bình Phước và Kiên Giang. [16] Sự biến đổi nhiều năm của nhiệt độ cho thấy sự gia tăng của nhiệt độ theo thời gian. Nền nhiệt có xu hướng tăng dần lên khoảng 0,19–0,24°C qua 4 thập kỷ, và tăng từ khoảng 0.1 - 0.4°C qua mỗi thập kỷ. Về lượng mưa không có sự biến động mạnh qua từng năm và không thể hiện rõ được xu thế biến đổi như nhiệt độ. Trên tất cả các vùng đều cho thấy sự biến động mạnh, lượng mưa có năm vượt trội lên nhưng sau đó cũng giảm xuống nhanh chóng xuống mức dưới trung bình. Nhìn chung, lượng mưa năm có sự biến đổi phức tạp, không thể hiện rõ quy luật nào. Ở Việt Nam trong khoảng 50 năm qua, nhiệt độ trung bình năm đã tăng khoảng 0,5–0,7°C, lượng mưa giảm 2% và mực nước biển đã dâng khoảng 20cm. Biến đổi khí hậu đã làm cho các thiên tai, đặc biệt là bão, lũ, hạn hán ngày càng ác liệt hơn [6].

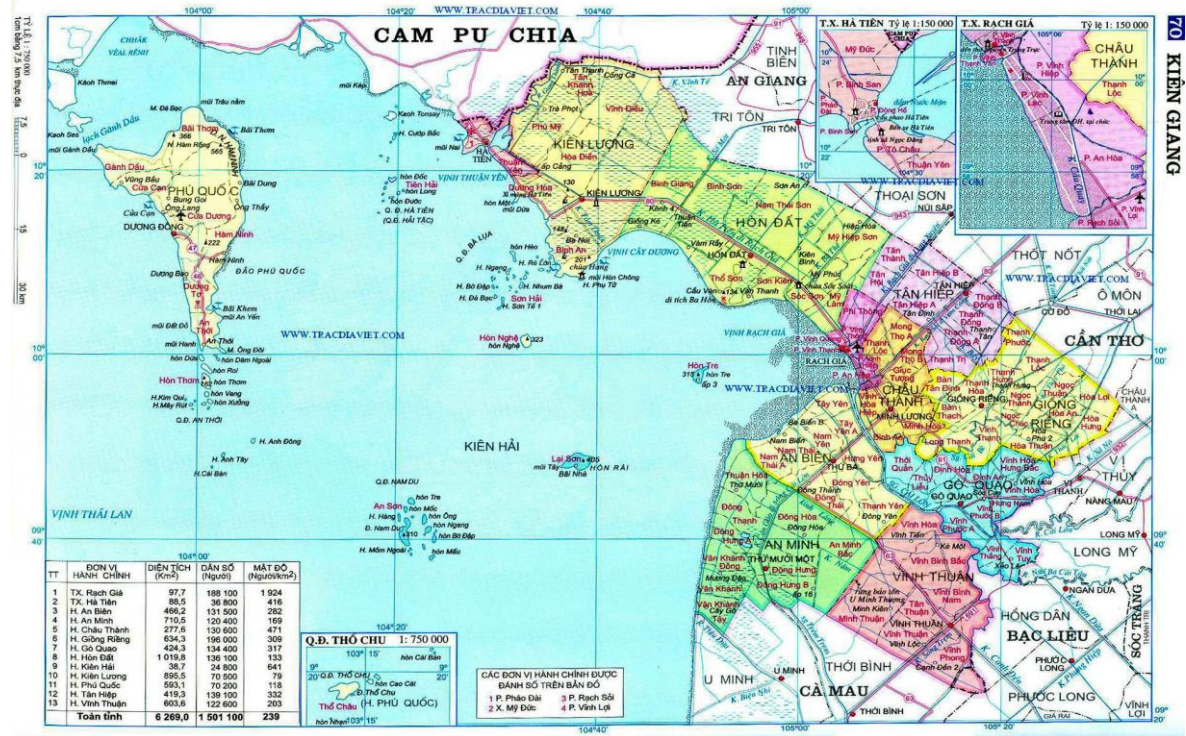
Kiên Giang là một tỉnh ven biển phía tây đông bằng sông Cửu Long. Trong những năm gần đây, sự biến đổi khí hậu có dấu hiệu tăng thêm trên toàn cầu. Diễn biến bất thường của thời tiết ngày càng có xu hướng bất lợi cho đời sống con người do các loại thiên tai xảy ra với mức độ ngày càng nghiêm trọng hơn. Những biến đổi đó được thể hiện rõ nét qua hai yếu tố cơ bản của khí hậu đó là: nhiệt độ và lượng mưa.

Vì thế, để nhận thức về diễn biến và xu thế biến đổi của mưa, nhiệt độ đã và đang ảnh hưởng đến đời sống, kinh tế–xã hội trong tương lai trên địa bàn tỉnh Kiên Giang, việc đối phó với sự biến đổi khí hậu là vấn đề cần đặt ra. Vì vậy, việc “*Đánh giá xu thế biến đổi mưa, nhiệt độ tỉnh Kiên Giang*” là rất cấp thiết.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Khu vực nghiên cứu và thu thập số liệu nghiên cứu

Số liệu được sử dụng trong bài báo này là chuỗi số liệu trong 30 năm qua (1992–2022) về lượng mưa, nhiệt độ của 03 trạm khí tượng cơ bản: Rạch Giá, Phú Quốc, Thổ Chu, và 13 điểm đo mưa nhân dân trên địa bàn tỉnh Kiên Giang (Hình 1).



Hình 1. Bản đồ hành chính tỉnh Kiên Giang.

Danh sách các trạm khí tượng được lấy số liệu để tính toán, phân tích được thể hiện trong bảng 1, 2.

Bảng 1. Danh sách các trạm khí tượng lấy số liệu.

Tên Trạm	Tỉnh	Kinh độ	Vĩ độ	Độ dài chuỗi
Rạch Giá	Kiên Giang	105.04	10.01	1992–2022
Phú Quốc		103.58	10.13	1992–2022
Thổ Chu		103.28	09.17	1995–2022

Bảng 2. Danh sách các trạm đo mưa nhân dân.

Tên Trạm	Tỉnh	Kinh độ	Vĩ độ	Độ dài chuỗi
Kiên Hải	Kiên Giang	104.3609	9.6932	1992–2022
Hà Tiên		104.5083	10.3983	1992–2022
Giang Thành		104.6599	10.5186	1992–2022
Kiên Lương		104.5973	10.2557	1992–2022
Hòn Đất		104.8967	10.2083	1992–2022
Tân Hiệp		105.2797	10.0067	1992–2022
Châu Thành		105.1367	9.9633	1992–2022
Giồng Riềng		105.3108	9.9057	1992–2022
Gò Quao		105.2775	9.7330	1992–2022
An Biên		105.0753	9.8183	1992–2022
An Minh		104.9077	9.6285	1992–2022
U Minh Thượng		105.1386	9.7050	1992–2022
Vĩnh Thuận		105.2108	9.5333	1992–2022





Hình 2. Vị trí các trạm quan trắc Khí tượng và đo mưa lấy số liệu ở Kiên Giang.

## 2.2. Phương pháp nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, phương pháp thống kê được sử dụng để đánh giá phân tích và tính toán đặc trưng thống kê là giá trị trung bình. Công cụ tính toán là dùng phần mềm Excel, MapInfo.

Để đánh giá phân bố theo không gian ta xem xét các biến trình năm của vùng. Xét sự biến đổi của mưa theo năm, tháng, ngày và theo mùa, vẽ đường đồng mức và xu thế qua các giai đoạn 1992–2002, 2003–2012 và 2013–2022.

Để đánh giá xu thế tăng giảm của các yếu tố mưa nhiệt, phân tích đường xu thế dạng tuyến tính được áp dụng ( $y = A_0 + A_1t$ , trong đó  $y$  là đặc trưng yếu tố cần khảo sát,  $t$  là số năm,  $A_0$ ,  $A_1$ , là các hệ số hồi quy) biểu diễn mối quan hệ giữa lượng mưa tại các trạm và khoảng thời gian nghiên cứu để nhận xét. Hệ số này cho biết xu thế tăng hoặc giảm của lượng mưa ( $A_1 > 0$ : tăng,  $A_1 < 0$ : giảm).

Ngoài ra để xem xét kỹ hơn về xu thế biến đổi của lượng mưa trung bình qua các năm ta tính nhiệt độ trung bình các năm và của cả thời kỳ 1992–2022.

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Chế độ nhiệt

Chế độ nhiệt mà ta nói đến ở đây là nhiệt độ không khí. Nhiệt độ không khí là yếu tố khí hậu thể hiện rõ nhất bởi sự ảnh hưởng của vị trí địa lý, hoàn lưu không chế, chế độ nắng v.v... Nằm trong vành đai nhiệt đới Bắc bán cầu, Kiên Giang có một nền nhiệt độ cao và khá ổn định. Đặc trưng nhiệt tại một số địa phương Kiên Giang so với tiêu chuẩn nhiệt đới ở bảng 3 cho thấy từ vùng đồng bằng đến hải đảo ở Kiên Giang luôn cao hơn nhiều.

Bảng 3. So sánh đặc trưng nhiệt ở Kiên Giang với tiêu chuẩn nhiệt đới.

Các đặc trưng	Nhiệt đới tiêu chuẩn	Kiên Giang		
		Thổ Chu	Rạch Giá	Phú Quốc
Tổng nhiệt độ năm	Từ 7500–9500°C	10038°C	10038°C	10111°C
Ttb năm (°C)	Trên 21°C	27,5°C	27,5°C	27,7°C
Số tháng Ttb dưới 20°C	Dưới 4 tháng	0	0	0
Ttb tháng lạnh nhất	Trên 18°C	23,4°C	22,9°C	23,5°C

Theo số liệu đặc trưng nhiệt độ của 3 trạm khí tượng trong bảng 4, 5 và 6 cho thấy Kiên Giang sự biến đổi nhiệt độ theo thời gian và không gian đều nhỏ. Nhiệt độ trung bình năm gần như không khác nhau giữa các địa phương trong tỉnh. Nhiệt độ các tháng có sự biến đổi nhỏ, tuy nhiên cũng có sự phân bố khá rõ ràng trong năm. Sự phân bố này phù hợp với hệ thống hoàn lưu chi phối theo từng mùa, từng tháng. Trong năm có tháng 4 và tháng 5 là 2 tháng nóng nhất trong năm, nhiệt độ cao nhất có khi lên đến 36–37°C, tháng 1 và tháng 12 là 2 tháng lạnh nhất trong năm, nhiệt độ thấp nhất có khi xuống đến 17–18°C.

**Bảng 4.** Các đặc trưng nhiệt độ (°C) tại Trạm Thổ Chu thời kỳ (1995–2022).

Đặc trưng	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
Trung Bình	25,7	26,1	27,6	29,0	28,9	28,4	28,0	27,9	27,7	27,6	27,3	26,3	<b>27,5</b>
Cao nhất	33,0	35,0	36,0	36,5	36,8	35,5	34,7	35,7	34,8	34,5	33,3	33,1	<b>36,8</b>
Thấp nhất	21,4	20,6	22,4	22,6	22,1	22,4	21,6	21,4	22,0	22,0	22,0	22,0	<b>20,6</b>
TB cao nhất	31,2	32,3	34,0	34,9	35,0	33,9	33,2	33,2	33,0	32,6	31,8	31,2	<b>33,0</b>
TB thấp nhất	23,1	23,4	24,1	24,3	23,9	23,3	22,8	22,8	23,0	23,2	23,4	23,3	<b>23,4</b>

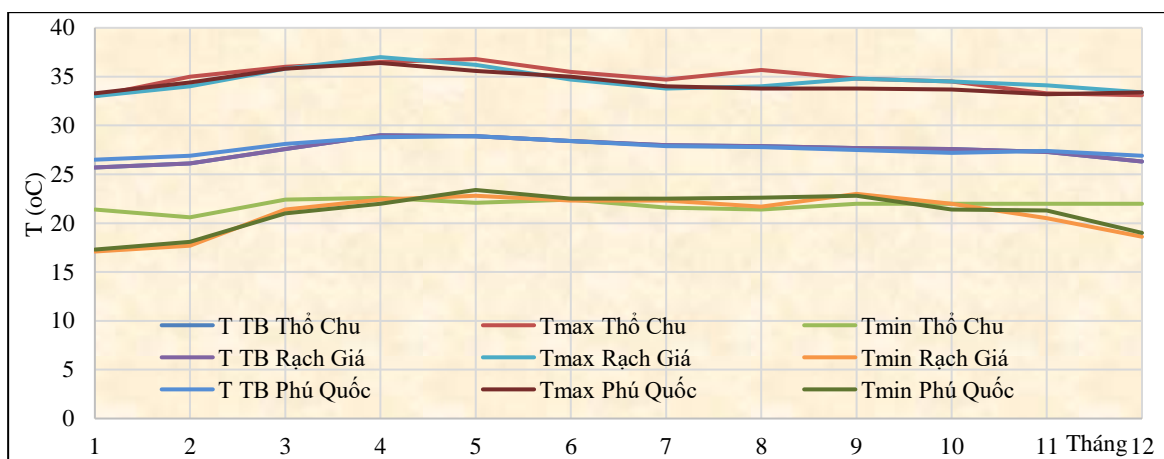
**Bảng 5.** Các đặc trưng nhiệt độ (°C) tại Trạm Rạch Giá thời kỳ (1992–2022).

Đặc trưng	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
Trung Bình	25,7	26,1	27,6	29,0	28,9	28,4	28,0	27,9	27,7	27,6	27,3	26,3	<b>27,5</b>
Cao nhất	33,0	34,0	35,8	37,0	36,2	34,7	33,8	34,0	34,8	34,5	34,1	33,4	<b>37,0</b>
Thấp nhất	17,1	17,7	21,4	22,4	22,8	22,3	22,3	21,7	23,0	22,0	20,5	18,6	<b>17,1</b>
TB cao nhất	31,8	33,1	34,6	35,4	34,6	32,9	31,7	31,8	32,2	32,6	32,4	31,8	<b>32,9</b>
TB thấp nhất	20,5	21,2	22,7	24,0	24,2	23,7	23,5	23,5	23,7	23,5	23,0	21,2	<b>22,9</b>

**Bảng 6.** Các đặc trưng nhiệt độ (°C) tại Trạm Phú Quốc thời kỳ (1992–2022).

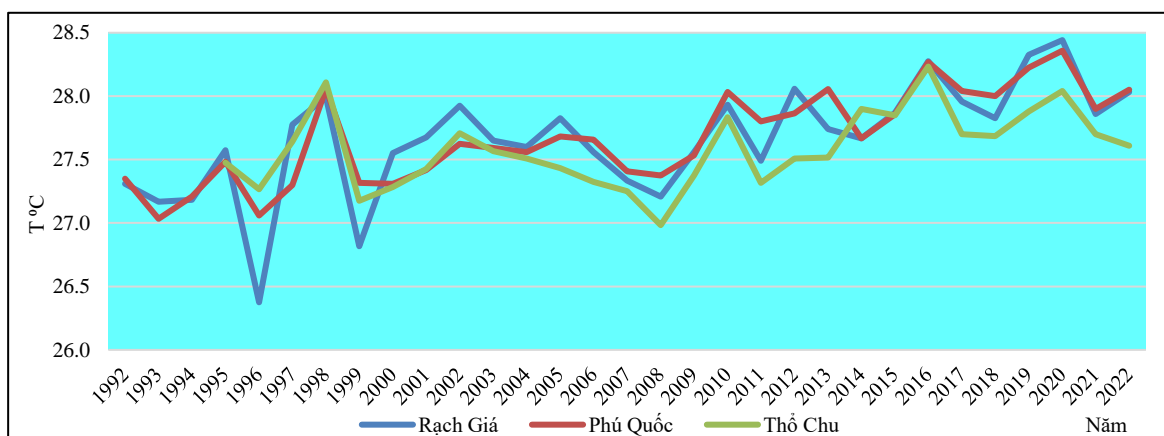
Đặc trưng	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
Trung Bình	26,5	26,9	28,1	28,8	28,9	28,4	27,9	27,8	27,5	27,2	27,4	26,9	<b>27,7</b>
Cao nhất	33,3	34,4	35,8	36,4	35,6	35,0	34,0	33,8	33,8	33,7	33,2	33,4	<b>36,4</b>
Thấp nhất	17,3	18,1	21,0	22,0	23,4	22,5	22,5	22,6	22,8	21,4	21,3	19,0	<b>17,3</b>
TB cao nhất	31,6	32,3	33,4	33,7	33,1	32,0	31,7	31,1	31,1	31,7	31,9	31,8	<b>32,1</b>
TB thấp nhất	21,3	22,2	23,4	24,3	24,7	24,4	24,0	24,1	24,1	23,8	23,7	22,2	<b>23,5</b>

Đặc trưng nhiệt độ trung bình không có sự biến động nhiều giữa các trạm khí tượng, giá trị nhiệt độ trung bình thấp nhất xuất hiện vào tháng 1, nhiệt độ trung bình có xu thế tăng dần và đạt giá trị cao nhất ở tháng 4, 5 sau đó do có mưa chuyển mùa nên xu thế nhiệt độ trung bình giảm dần cho đến cuối năm; Về đặc trưng nhiệt độ  $T_{max}$  giá trị cao nhất năm trạm Rạch Giá và Phú Quốc xuất hiện vào tháng 4, trạm Thổ Chu xuất hiện ở tháng 5, nhiệt độ  $T_{max}$  có xu thế tăng dần từ tháng 1 và đạt giá trị cao nhất vào tháng 4, 5 sau đó chuyển sang xu thế giảm dần nhưng không đều giữa các trạm khí tượng tỉnh Kiên Giang. Đặc biệt 2 trạm có xu thế tăng nhiệt độ  $T_{max}$  lên ở tháng 8 (trạm Thổ Chu 35,7°C), tháng 9 (trạm Rạch Giá 34,8°C) rồi tiếp tục giảm dần đến tháng 12; Đặc trưng  $T_{min}$  có sự biến động rõ rệt giữa các tháng trong năm, trạm Thổ Chu giá trị  $T_{min}$  ít có sự thay đổi nhiều giữa các tháng trong năm. Trạm Phú Quốc, trạm Rạch Giá có giá trị  $T_{min}$  chênh lệch nhau không nhiều, giá trị  $T_{min}$  thấp nhất xuất hiện vào tháng 1. Nhiệt độ  $T_{min}$  có xu thế tăng lên từ tháng 2 ở hai trạm Rạch Giá, Phú Quốc, từ tháng 3 ở trạm Thổ Chu, tháng 4 đến tháng 10 giá trị  $T_{min}$  ít thay đổi, các tháng còn lại có xu thế giảm dần cho tới tháng 1 năm sau. Riêng trạm Thổ Chu xu thế nhiệt độ  $T_{min}$  từ tháng 4 đến tháng 12 ít thay đổi, tháng 1 nhiệt độ  $T_{min}$  có xu thế giảm xuống và đạt giá trị thấp nhất ở tháng 2, sau đó xu thế tăng lên ở tháng 3 (Hình 3).



**Hình 3.** Đặc trưng nhiệt độ tháng tại các trạm khí tượng tỉnh Kiên Giang thời kỳ (1992–2022).

Đặc trưng nhiệt độ trung bình năm theo thời gian có xu thế tăng dần ở cả 3 trạm khí tượng tỉnh Kiên Giang, so với giá trị nhiệt độ trung bình nhiều năm thì thời kỳ 1992–2022 có xu thế nhiệt độ tăng từ 0,1–0,3°C so với giá trị nhiệt độ trung bình nhiều năm (Hình 4). Như vậy, đặc trưng nhiệt độ tháng tại các trạm khí tượng tỉnh Kiên Giang thời kỳ 1992–2022 có xu thế, phân bố phù hợp với hệ thống hoàn lưu chi phối theo từng mùa, từng tháng và đặc trưng nhiệt độ trung bình năm theo thời gian có xu thế tăng lên.



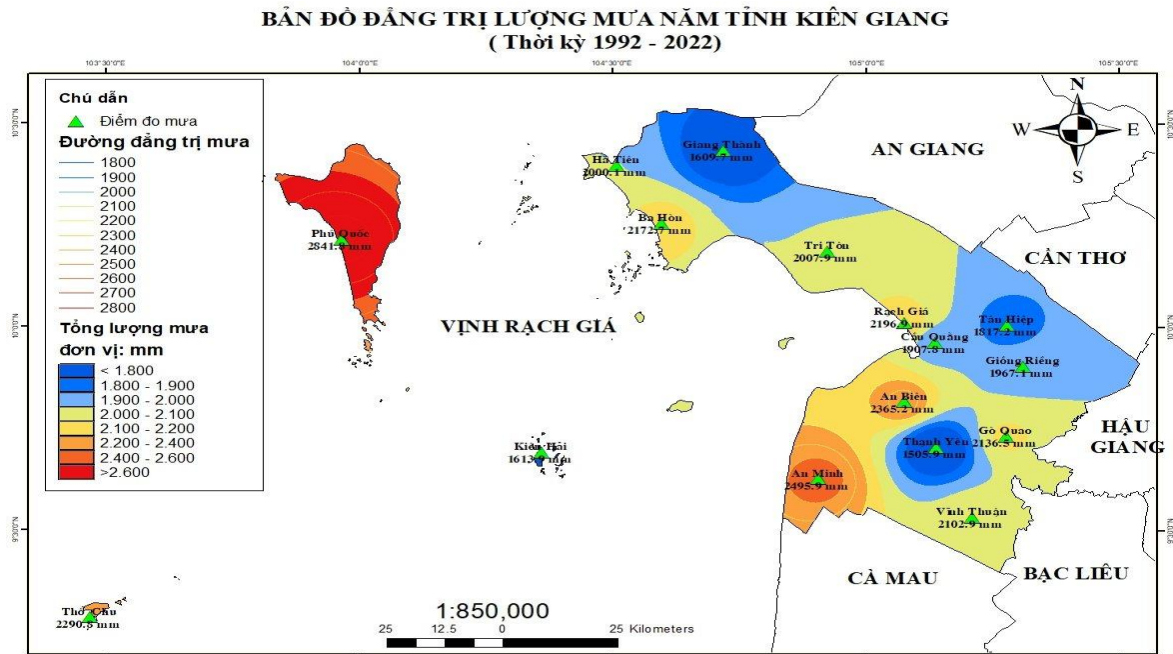
**Hình 4.** Đặc trưng nhiệt độ trung bình năm tại các trạm khí tượng tỉnh Kiên Giang thời kỳ 1992–2022.

### 3.2. Chế độ mưa

Lượng mưa là yếu tố khí hậu phụ thuộc rất nhiều vào sự thay đổi các hoàn lưu khí quyển, sự ảnh hưởng của địa hình, sự thay đổi điều kiện thảm thực vật, những hoạt động của con người làm thay đổi môi trường, ... tại một địa phương nhất định. Do vậy lượng mưa trong từng tháng, từng mùa, cũng như từng năm có sự khác nhau.

#### 3.2.1. Lượng mưa năm

Qua số liệu mưa đo đạc tại các trạm khí tượng và đo mưa trong và lân cận tỉnh Kiên Giang, cho thấy lượng mưa giảm dần từ Tây sang Đông. Hàng năm tại đảo Phú Quốc có lượng mưa lớn nhất, có năm đạt trên 4000 mm như năm 2000 mưa 4165 mm và năm 2019 mưa 3943 mm, sau đó là các vùng ven biển phía Tây của Tỉnh, phổ biến từ 2000–2300 mm, nơi có lượng mưa thấp nhất là phía Đông của Tỉnh, phổ biến từ 1700–1900 mm. Tổng lượng mưa hàng năm các nơi tại Kiên Giang dao động quanh trị số trung bình nhiều năm trong khoảng  $\pm 20\%$ . Tuy nhiên trong từng tháng thì có sự dao động mạnh hơn, trong khoảng  $\pm 30\%$ , có tháng lên đến 40–50% so với tổng lượng mưa trung bình nhiều năm. Các địa phương có biến động lượng mưa tháng lớn nhất tỉnh là An Biên, Hà Tiên, Hòn Đất, Giồng Riềng và đảo Phú Quốc (Hình 5).



Hình 5. Bản đồ đẳng trị lượng mưa năm tỉnh Kiên Giang thời kỳ 1992–2022.

**Bảng 7.** Lượng mưa trung bình tháng và năm tại các trạm thuộc tỉnh Kiên Giang (mm) thời kỳ 1992–2022

Tháng	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
Thổ Chu	46,9	20,4	34,7	95,7	192,2	272,5	315,5	272,4	360,7	333,3	231,0	115,5	<b>2290,8</b>
Rạch Giá	27,4	16,9	49,6	88,9	235,6	272,1	344,2	315,8	310,7	281,9	190,8	63,1	<b>2196,9</b>
Phú Quốc	34,3	25,4	79,9	160,0	247,8	352,1	442,1	450,8	481,7	338,2	163,0	66,5	<b>2841,8</b>
Kiên Hải	7,8	11,6	9,4	30,4	118,8	210,6	260,2	289,9	296,3	262,4	81,9	34,8	<b>1613,9</b>
Hà Tiên	22,8	17,9	60,0	132,7	202,1	234,5	300,7	289,6	256,5	269,6	151,4	62,5	<b>2000,1</b>
Giang Thành	15,5	6,9	32,5	112,0	182,8	175,7	192,8	189,5	248,3	258,2	147,1	48,4	<b>1609,7</b>
Kiên Lương	20,9	12,0	40,0	130,8	207,7	262,7	326,6	333,9	285,4	307,1	176,5	69,2	<b>2172,7</b>
Hòn Đất	14,8	11,2	46,2	86,4	198,3	235,7	296,3	307,7	273,4	310,0	161,8	66,2	<b>2007,9</b>
Tân Hiệp	21,8	19,3	45,5	66,7	155,4	201,9	273,8	258,5	277,7	283,7	159,9	53,0	<b>1817,2</b>
Châu Thành	25,6	24,2	36,9	62,5	187,7	256,9	309,2	228,0	353,8	247,2	132,4	43,5	<b>1907,8</b>
Giồng Riềng	14,5	17,5	25,0	64,7	215,0	222,7	310,1	275,0	303,0	309,6	158,2	51,9	<b>1967,1</b>
Gò Quao	16,1	12,0	37,5	114,2	225,3	243,6	346,6	301,2	314,9	315,4	156,7	52,9	<b>2136,5</b>
An Biên	12,7	22,8	62,2	114,4	247,2	324,4	413,4	338,6	343,0	291,1	142,9	52,6	<b>2365,2</b>
An Minh	25,7	32,1	46,7	130,5	236,4	310,8	403,3	356,6	393,1	327,5	171,5	61,6	<b>2495,9</b>
U Minh Thượng	24,4	2,3	0,1	68,4	120,3	100,9	291,6	267,8	227,3	270,4	96,2	36,5	<b>1505,9</b>
Vĩnh Thuận	27,4	16,8	45,6	137,2	207,3	246,8	354,6	299,1	317,4	290,0	151,3	58,4	<b>2102,9</b>

### 3.2.2. Lượng mưa ngày

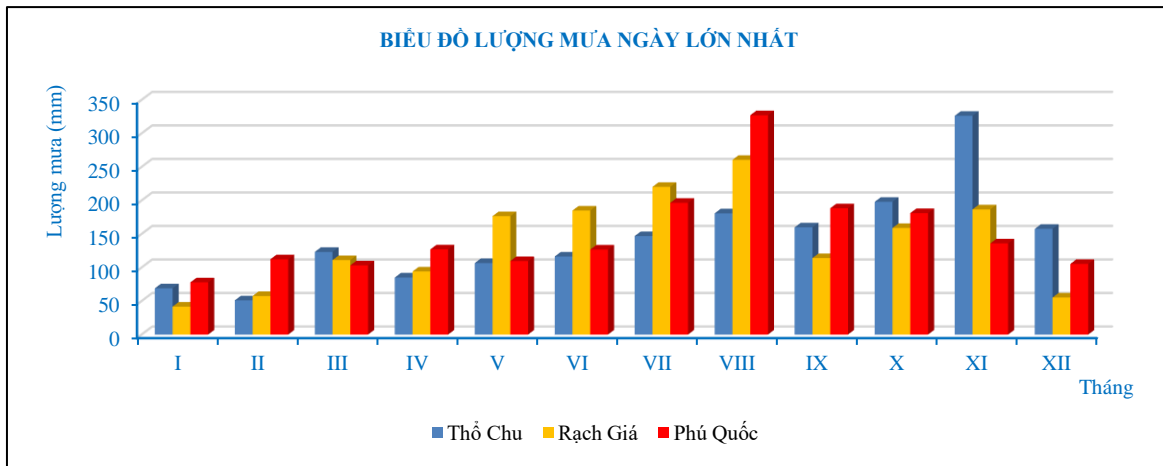
Lượng mưa ngày lớn nhất tại Kiên Giang thường xảy ra khi chịu ảnh hưởng của hoàn lưu bão, áp thấp nhiệt đới, dải hội tụ nhiệt đới, nhiễu động nhiệt đới,... Nhưng đáng kể nhất là khi có sự kết hợp của nhiều loại hình thời tiết khác nhau.

Lượng mưa ngày lớn nhất tại Kiên Giang trong những tháng của mùa mưa có thể đạt từ 100–200 mm, đặc biệt trong 2 tháng chính của mùa mưa là tháng VII và VIII lượng mưa ngày lớn nhất có năm lên đến 200–300 mm (Hình 6). Riêng trạm Thổ Chu có lượng mưa ngày lớn nhất là 326.3mm xuất hiện vào tháng XI, do ảnh hưởng trực tiếp của cơn bão số 5 năm 1997 (Bảng 8).



**Bảng 8.** Lượng mưa ngày lớn nhất tháng và năm (mm) thời kỳ 1992–2022.

Tháng	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
Thổ Chu	69,0	51,0	123,3	85,1	106,7	116,4	146,9	180,8	159,9	198,0	326,3	157,7	<b>326,3</b>
Rạch Giá	41,7	57,5	111,1	94,1	176,6	185,0	220,3	260,5	114,1	159,0	186,7	55,3	<b>260,5</b>
Phú Quốc	77,9	112,2	103,2	127,1	109,6	126,8	196,5	327,1	188,4	181,2	136,0	105,4	<b>327,1</b>

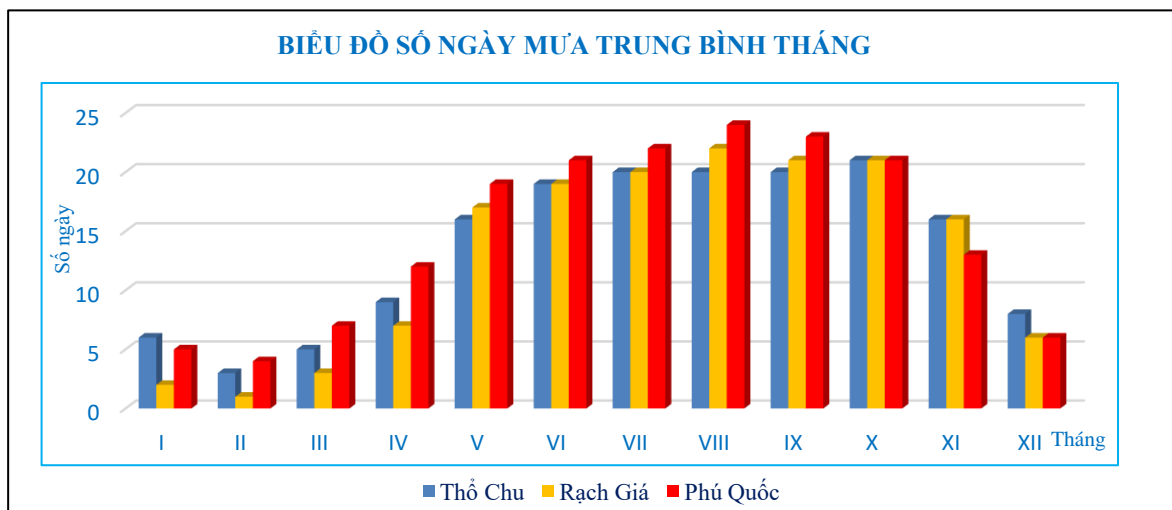


**Hình 6.** Biểu đồ lượng mưa ngày lớn nhất thời kỳ 1992–2022.

Tổng số ngày mưa trung bình nhiều năm tại Kiên Giang dao động trong khoảng từ 150–180 ngày, Phú Quốc không những là nơi có lượng mưa lớn mà số ngày mưa cũng lớn nhất tỉnh. Trong các tháng chính của mùa mưa hầu hết các nơi đều có trên 20 ngày/tháng, các tháng ít mưa và khô hạn số ngày mưa rất ít, thậm chí nhiều năm xảy ra tình trạng không mưa dài ngày gây khô hạn, ảnh hưởng nghiêm trọng đến đời sống xã hội và sản xuất nông nghiệp cho các địa phương trong tỉnh. Lượng mưa lớn tập trung trong thời gian ngắn, có ý nghĩa rất quan trọng, bởi đó chính là nguyên nhân gây ra những thiên tai nguy hiểm như: lũ, lụt, ngập úng, sạt lở,...

**Bảng 9.** Số ngày mưa trung bình tháng và năm (ngày) thời kỳ 1992–2022.

Tháng	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
Thổ Chu	6	3	5	9	16	19	20	20	20	21	16	8	<b>162</b>
Rạch Giá	2	1	3	7	17	19	20	22	21	21	16	6	<b>155</b>
Phú Quốc	5	4	7	12	19	21	22	24	23	21	13	6	<b>177</b>



**Hình 7.** Biểu đồ số ngày mưa trung bình tháng thời kỳ 1992–2022.

### 3.2.3. Phân bố lượng mưa theo mùa

Thông thường để xác định mùa mưa và mùa ít mưa người ta dùng phương pháp định lượng và phương pháp khách quan.

- Phương pháp định lượng nhờ dựa vào lượng mưa (không tính đến nguyên nhân gây mưa).

- Phương pháp khách quan (căn cứ vào nguyên nhân gây mưa).

Ở đây dựa vào phương pháp định lượng, dùng chỉ tiêu tổng lượng mưa tháng trung bình nhiều năm 100 mm và số ngày mưa trung bình từ 10 ngày trở lên hoặc tần suất trên 75% số năm xuất hiện lượng mưa tháng có từ 100 mm trở lên làm chỉ tiêu cho mùa mưa, ngược lại là mùa ít mưa.

Theo chỉ tiêu trên, thì tại Kiên Giang mùa mưa từ tháng V đến tháng XI, mùa ít mưa (mùa khô) từ tháng XII đến tháng IV năm sau. Để thấy rõ được sự tương phản khắc nghiệt về tình hình mưa giữa 2 mùa, mưa và ít mưa tại Kiên Giang (Bảng 10–11).

#### a) Mùa mưa

Lượng mưa các nơi trong tỉnh chiếm từ 85–94% lượng mưa năm, đặc biệt chỉ trong 2 tháng VII và VIII lượng mưa đã trên 30% lượng mưa năm.

**Bảng 10.** Lượng mưa (mm) và tỉ trọng (%) của mùa mưa và của 2 tháng VII và VIII, so với tổng lượng mưa năm thời kỳ 1992–2022.

Trạm	Mưa mùa mưa (mm)	Tỉ trọng (%)	Mưa tháng VII–VIII (mm)	Tỉ trọng (%)
Thổ Chu	1977,6	86,3	587,9	25,7
Rạch Giá	1951,1	88,8	660,0	30,0
Phú Quốc	2475,7	87,1	892,9	31,4
Kiên Hải	1520,1	94,2	550,1	34,1
Hà Tiên	1704,4	85,2	590,3	29,5
Giang Thành	1394,4	86,6	382,3	23,7
Kiên Lương	1899,9	87,4	660,5	30,4
Hòn Đất	1783,2	88,8	604,0	30,1
Tân Hiệp	1610,9	88,6	532,3	29,3
Châu Thành	1715,2	89,9	537,2	28,2
Giồng Riềng	1793,6	91,2	585,1	29,7
Gò Quao	1903,7	89,1	647,8	30,3
An Biên	2100,6	88,8	752,0	31,8
An Minh	2199,2	88,1	759,9	30,4
U Minh Thượng	1374,5	91,3	559,4	37,1
Vĩnh Thuận	1866,5	88,8	653,7	31,1

#### b) Mùa ít mưa

Lượng mưa các nơi trong tỉnh chiếm dưới 15% lượng mưa năm, riêng Vĩnh Thuận chiếm 20% lượng mưa năm, đặc biệt trong 2 tháng I và II lượng mưa rất thấp dưới 3% tổng lượng mưa năm.

**Bảng 11.** Lượng mưa (mm) và tỉ trọng (%) của mùa ít mưa và của 2 tháng I và II, so với tổng lượng mưa năm thời kỳ 1992–2022.

Trạm	Mưa mùa ít mưa (mm)	Tỉ trọng (%)	Mưa tháng I–II (mm)	Tỉ trọng (%)
Thổ Chu	313,2	13,7	67,3	2,9
Rạch Giá	245,9	11,2	44,3	2,0
Phú Quốc	366,1	12,9	59,7	2,1
Kiên Hải	94,0	5,8	19,4	1,2
Hà Tiên	295,9	14,8	40,7	2,0
Giang Thành	215,3	13,4	22,4	1,4
Kiên Lương	272,9	12,6	32,9	1,5
Hòn Đất	224,8	11,2	26,0	1,3
Tân Hiệp	206,3	11,4	41,1	2,3

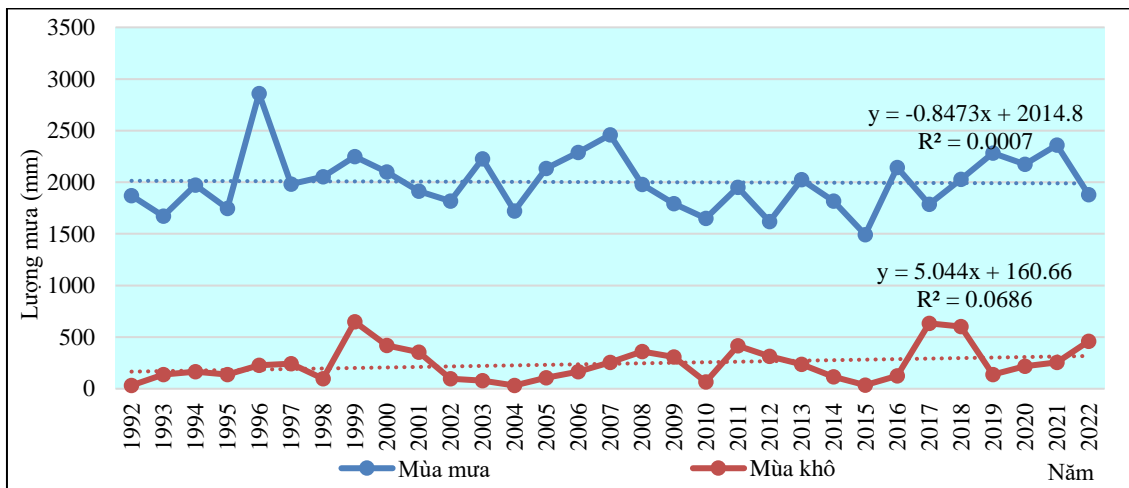
Trạm	Mưa mùa ít mưa (mm)	Tỉ trọng (%)	Mưa tháng I-II (mm)	Tỉ trọng (%)
Châu Thành	192,7	10,1	49,8	2,6
Giồng Riềng	173,6	8,8	32,0	1,6
Gò Quao	232,7	10,9	28,1	1,3
An Biên	264,7	11,2	35,5	1,5
An Minh	296,6	11,9	57,8	2,3
U Minh Thượng	131,7	8,7	26,7	1,8
Vĩnh Thuận	436,7	20,8	44,2	2,1

### 3.2.4. Biến đổi lượng mưa năm

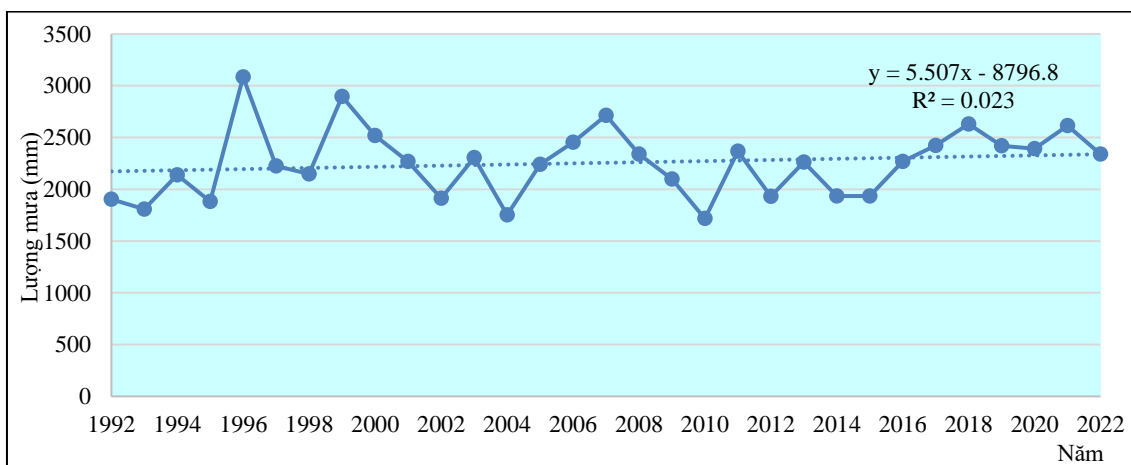
Có thể nói mưa là yếu tố biến đổi mạnh mẽ nhất trong tất cả các yếu tố khí hậu. Xét về xu thế biến đổi, yếu tố mưa lại có xu hướng ngược lại so với yếu tố nhiệt độ. Chế độ nhiệt có xu hướng tăng lên, trong khi chế độ mưa lại có xu hướng giảm đi. Theo số liệu mưa từ 1992 cho đến năm 2022, sự chênh lệch giữa năm mưa lớn nhất và năm mưa nhỏ nhất là 2283 mm (trạm Phú Quốc), 1367 mm (trạm Rạch Giá) và 1208 mm (trạm Thổ Chu) lớn gấp 1,7–2,2 lần so với năm mưa ít nhất. Nếu chỉ tính riêng lượng mưa mùa mưa thì giá trị cực đại và cực tiểu có lượng mưa chênh nhau 1,8–2,3 lần, trong mùa ít mưa chênh nhau lớn 3,5–20,0 lần (trạm Thổ Chu 3,5 lần, Phú Quốc 9 lần, Rạch Giá 20 lần).

### 3.2.5. Xu thế thay đổi mưa

Căn cứ vào số liệu mưa tại 3 trạm khí tượng (Rạch Giá, Phú Quốc, Thổ Chu) thời kỳ 1992–2022, vẽ đồ thị biểu diễn theo thời gian cho ta kết quả như sau:

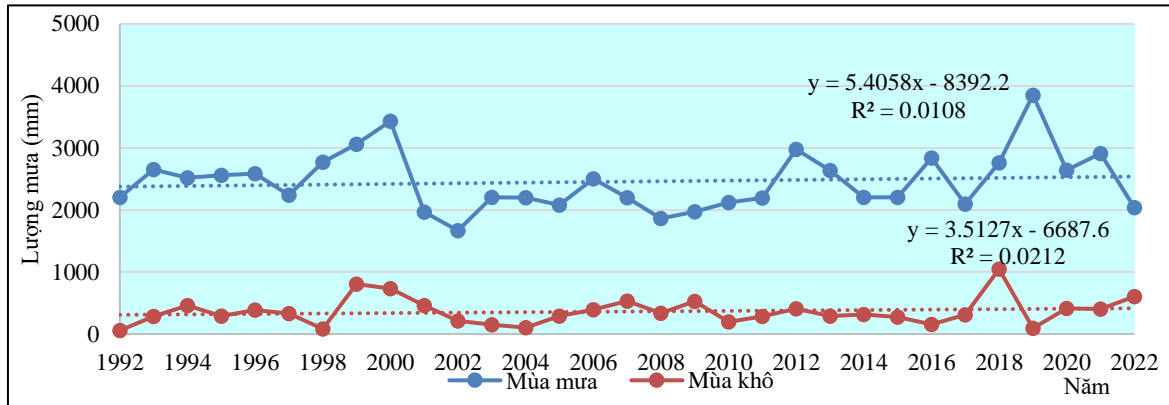


**Hình 8.** Xu thế lượng mưa mùa mưa–mùa ít mưa tại trạm Rạch Giá thời kỳ 1992–2022.

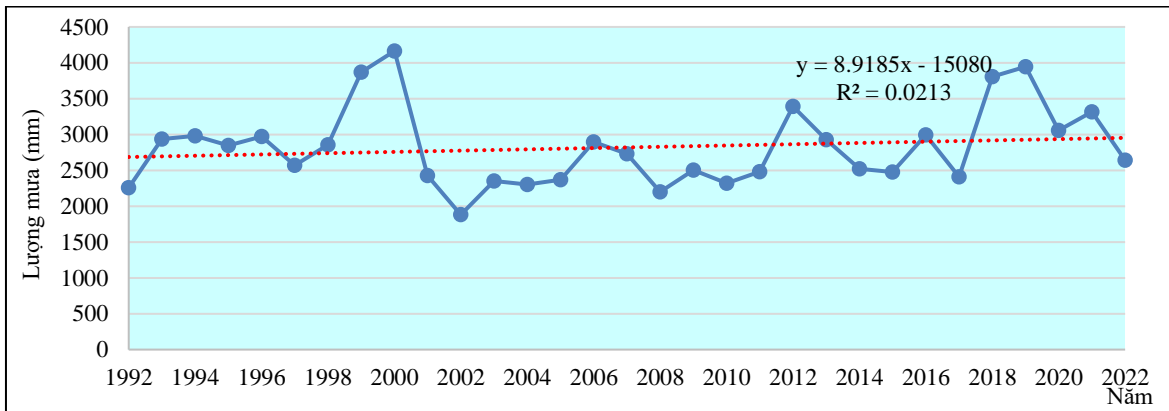


**Hình 9.** Xu thế lượng mưa năm tại trạm Rạch Giá thời kỳ 1992–2022.

Từ đồ thị biểu diễn theo thời gian cho ta thấy, tại trạm khí tượng Rạch Giá xu thế mùa mưa mùa khô không có thay đổi lượng mưa theo thời gian, mùa ít mưa có xu thế tăng nhẹ lượng mưa theo thời gian (Hình 8). Về lượng mưa năm tại trạm khí tượng Rạch Giá có xu thế tăng nhẹ theo thời gian thời kỳ 1992–2022 (Hình 9).

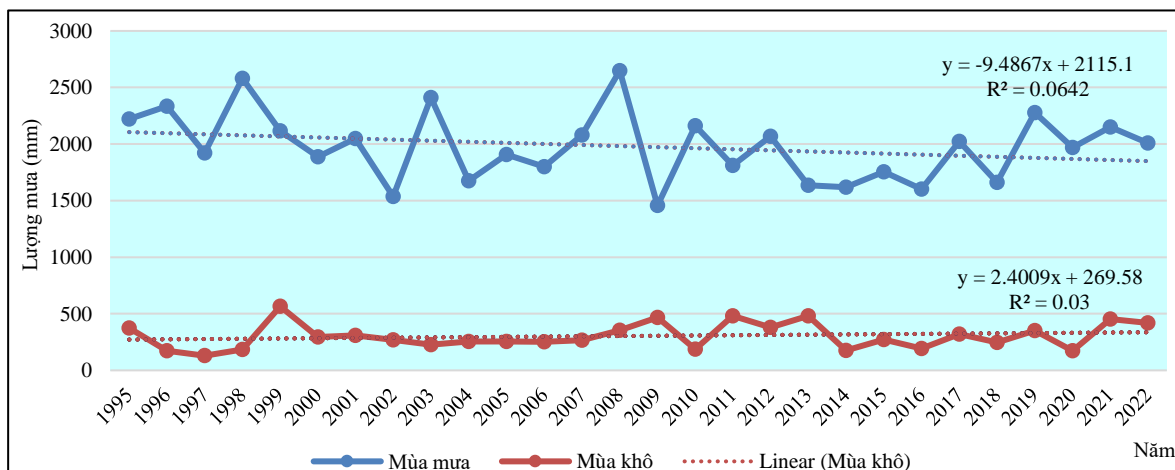


Hình 10. Xu thế lượng mưa mùa mưa–mùa ít mưa tại trạm Phú Quốc thời kỳ 1992–2022.



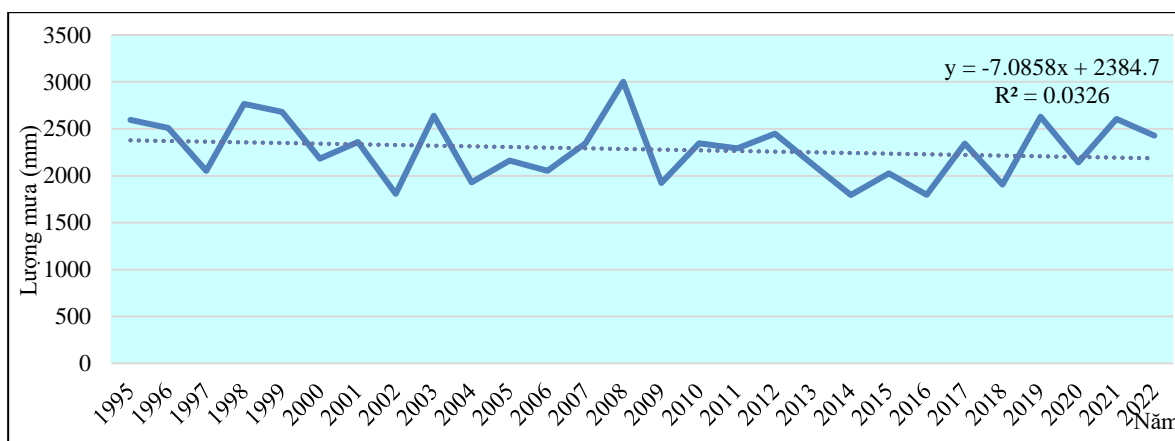
Hình 11. Xu thế lượng mưa năm tại trạm Phú Quốc thời kỳ 1992–2022.

Tại trạm khí tượng Phú Quốc xu thế mùa mưa và mùa ít mưa có xu thế tăng nhẹ lượng mưa theo thời gian (Hình 10). Về lượng mưa năm tại trạm khí tượng Phú Quốc có xu thế tăng theo thời gian thời kỳ 1992–2022 (Hình 11). Riêng trạm khí tượng Thổ Chu xu thế mùa mưa mùa khô có sự giảm lượng mưa theo thời gian, mùa ít mưa không có xu thế thay đổi lượng mưa theo thời gian (Hình 12). Về lượng mưa năm tại trạm khí tượng Thổ Chu có xu thế giảm theo thời gian thời kỳ 1992–2022 (Hình 13).



Hình 12. Xu thế lượng mưa mùa mưa–mùa ít mưa tại trạm Thổ Chu thời kỳ 1992–2022.





**Hình 13.** Xu thế lượng mưa năm tại trạm Thỏ Chu thời kỳ 1992–2022.

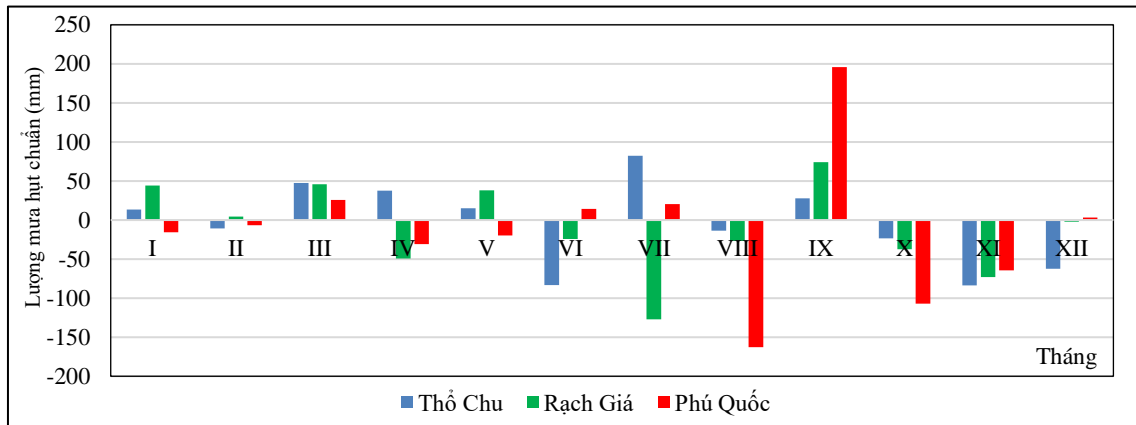
Để xét xu thế và chu kỳ biến đổi của chế độ mưa trong các thời kỳ, cũng giống như yếu tố nhiệt độ. Ở đây chúng tôi cũng đưa ra ba thời kỳ 10 năm, thời kỳ từ năm 1992–2002, 2003–2012 và thời kỳ từ năm 2013–2022, để đánh giá chung cho sự thay đổi mưa ở tỉnh Kiên Giang như sau:

Qua biểu đồ độ chênh lệch và xu thế của lượng mưa năm của chuỗi số liệu ta thấy. Cả 03 khu vực tỉnh Kiên Giang, chế độ mưa đều có xu hướng giảm trong 10 năm (2003–2012) so với 10 năm trước (1992–2002) từ 54,0–148,1 mm, và có xu hướng tăng mạnh nhất vào những năm gần đây (2013–2022) tăng đến 142,3–330,0 mm, đặc biệt tại Phú Quốc có xu thế tăng mạnh lên –148 đến 330 mm so với 10 năm trước (2003–2012), trong khi đó tại Thỏ Chu có xu thế giảm từ –54 đến –104 mm. Nếu ta xét các tháng trong năm đối với từng khu vực trong tỉnh thì vào các tháng trong năm có sự tăng giảm không đồng đều. Lượng mưa giảm chủ yếu vào các tháng từ tháng IV, VI–VIII, X, XI và tháng XII từ 2–127 mm (khu vực Rạch Giá), từ 6–162 mm (khu vực Phú Quốc), từ 8–83 mm (khu vực Thỏ Chu), các tháng còn lại giảm ít hơn từ 0,4–5 mm cho cả ba khu vực; riêng các tháng I, III, IV, V và IX một vài nơi lại có sự tăng về lượng mưa trong tháng từ 10–47 mm. Nhìn chung, lượng mưa giảm chủ yếu vào thời kỳ cuối mùa mưa, mùa ít mưa xu hướng lượng mưa không có sự thay đổi ở khu vực Phú Quốc và Thỏ Chu, riêng khu vực Rạch Giá mùa ít mưa có xu hướng mưa tăng lên.

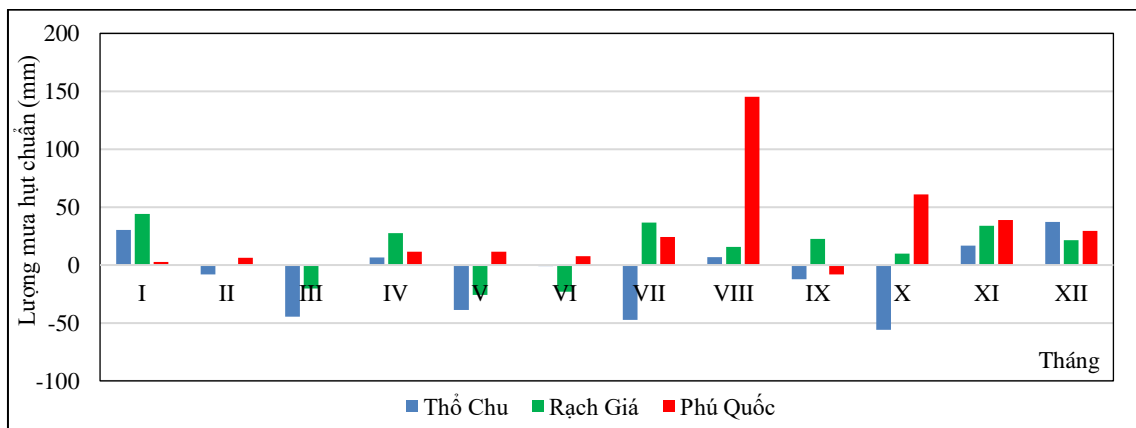
**Bảng 12.** Lượng mưa và chênh lệch thời kỳ 1992–2002 với 2003–2012.

Lượng mưa trung bình tháng và năm trạm Rạch Giá													
Tháng Thời kỳ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
1992–2002	12,5	15,5	28,8	120,0	226,1	313,4	428,6	305,9	275,7	314,4	241,0	53,7	<b>2335,6</b>
2003–2012	14,1	19,8	74,5	70,7	264,3	289,0	301,6	279,1	349,8	276,9	168,1	51,5	<b>2159,5</b>
$\Delta_R$	44,1	4,4	45,7	-49,3	38,2	-24,4	-127,0	-26,8	74,1	-37,5	-72,9	-2,2	<b>-133,6</b>
2003–2012	14,1	19,8	74,5	70,7	264,3	289,0	301,6	279,1	349,8	276,9	168,1	51,5	<b>2159,5</b>
2013–2022	58,2	19,3	54,2	98,4	238,6	266,0	338,2	294,8	372,4	286,9	202,0	72,9	<b>231,8</b>
$\Delta_R$	44,1	-0,6	-20,4	27,7	-25,7	-23,0	36,6	15,7	22,6	9,9	33,9	21,4	<b>142,3</b>
Lượng mưa trung bình tháng và năm trạm Phú Quốc													
Tháng Thời kỳ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
1992–2002	51,2	30,6	58,9	182,3	260,6	348,6	411,9	481,6	361,5	390,1	207,9	58,9	<b>2844,0</b>
2003–2012	35,6	23,8	84,5	151,3	240,9	362,8	432,3	318,7	557,2	283,0	143,5	62,2	<b>2695,9</b>
$\Delta_R$	-15,6	-6,8	25,6	-31,0	-19,7	14,3	20,4	-162,9	195,7	-107,1	-64,4	3,3	<b>-148,1</b>
2003–2012	35,6	23,8	84,5	151,3	240,9	362,8	432,3	318,7	557,2	283,0	143,5	62,2	<b>2695,9</b>
2013–2022	38,3	30,1	84,0	162,9	252,5	370,4	456,5	463,9	549,2	344,1	182,4	91,7	<b>3025,9</b>
$\Delta_R$	2,7	6,3	-0,4	11,5	11,5	7,6	24,2	145,2	-8,0	61,0	38,9	29,4	<b>330,0</b>
Lượng mưa trung bình tháng và năm trạm Thỏ Chu													
Tháng Thời kỳ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
1995–2002	26,5	30,8	16,3	67,2	195,4	332,4	273,6	279,7	345,2	370,2	284,8	147,0	<b>2369,0</b>
2003–2012	39,9	20,3	63,6	104,6	210,3	248,9	356,0	266,0	373,0	346,6	201,0	84,6	<b>2315,0</b>

Lượng mưa trung bình tháng và năm trạm Rạch Giá													
Tháng Thời kỳ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Năm
$\Delta_R$	13,4	-10,6	47,3	37,4	14,9	-83,4	82,3	-13,7	27,9	-23,6	-83,7	-62,3	-54,0
2003–2012	39,9	20,3	63,6	104,6	210,3	248,9	356,0	266,0	373,0	346,6	201,0	84,6	2315,0
2013–2022	70,2	12,1	19,0	111,2	171,6	248,1	308,6	272,8	360,9	290,6	217,9	121,7	2204,6
$\Delta_R$	30,3	-8,1	-44,6	6,5	-38,7	-0,9	-47,4	6,8	-12,1	-56,1	16,8	37,1	-110,4



Hình 14. Chênh lệch lượng mưa thời kỳ 1992–2002 với 2003–2012.



Hình 15. Chênh lệch lượng mưa thời kỳ 2003–2012 với 2013–2022.

#### 4. Kết luận

Qua phân tích chuỗi số liệu mưa và nhiệt độ từ năm 1992–2022 trên địa bàn tỉnh Kiên Giang. Chúng tôi đưa ra một số kết luận và nhận xét như sau:

Kiên Giang sự biến đổi nhiệt độ theo thời gian và không gian đều nhỏ. Nhiệt độ trung bình năm gần như không khác nhau giữa các địa phương trong tỉnh. Nhiệt độ các tháng có sự biến đổi nhỏ, tuy nhiên cũng có sự phân bố khá rõ ràng trong năm. Sự phân bố này phù hợp với hệ thống hoàn lưu chi phối theo từng mùa, từng tháng. Trong năm có tháng 4 và tháng 5 là 2 tháng nóng nhất trong năm, nhiệt độ cao nhất có khi lên đến 36–37°C, tháng 1 và tháng 12 là 2 tháng lạnh nhất trong năm, nhiệt độ thấp nhất có khi xuống đến 17–18°C. Đặc trưng nhiệt độ tháng tại các trạm khí tượng tỉnh Kiên Giang thời kỳ 1992–2022 có xu thế, phân bố phù hợp với hệ thống hoàn lưu chi phối theo từng mùa, từng tháng và đặc trưng nhiệt độ trung bình năm theo thời gian có xu thế tăng lên.

Lượng mưa trung bình năm ở Kiên Giang đạt từ 1800–2300 mm, lượng mưa tập chung chủ yếu vào mùa mưa (V–X) chiếm từ 85–94%, trong khi mùa ít mưa chỉ chiếm dưới 15% tổng lượng mưa năm. Về sự phân bố lượng mưa ở các khu vực trong tỉnh: Mùa mưa lượng mưa các nơi trong tỉnh chiếm từ 85–94% lượng mưa năm, đặc biệt chỉ trong 2 tháng VII và VIII lượng mưa đã trên 30% lượng mưa năm. Mùa ít mưa lượng mưa các nơi trong tỉnh chiếm

dưới 15% lượng mưa năm, đặc biệt trong 2 tháng I và II lượng mưa rất thấp dưới 3% tổng lượng mưa năm.

Lượng mưa trung bình các tháng mùa mưa thường đạt từ 150–350 mm, lớn nhất VIII, IX đạt từ 300–400 mm. Mùa ít mưa thì các tháng có sự biến động ít hơn, lượng mưa trung bình các tháng này thường không vượt quá 50 mm; riêng hai tháng IV và XI có lượng mưa lớn hơn các tháng còn lại nhưng cũng không vượt qua 150 mm.

Theo biến trình lượng mưa năm, cả 03 trạm của tỉnh Kiên Giang, lượng mưa có xu hướng giảm trong 10 năm (2003–2012) so với 10 năm trước (1992–2002) từ 54,0–148,1 mm, và có xu hướng tăng mạnh vào 10 năm gần đây (2013–2022) tăng đến 142,3–330,0 mm, đặc biệt tại Phú Quốc có xu thế tăng mạnh lên –148 đến 330 mm so với 10 năm trước (2003–2012), trong khi đó tại Thổ Chu có xu thế giảm từ –54 đến –104 mm. Nhìn chung, lượng mưa giảm chủ yếu vào thời kỳ cuối mùa mưa, mùa ít mưa xu hướng lượng mưa không có sự thay đổi ở khu vực Phú Quốc và Thổ Chu, riêng khu vực Rạch Giá mùa ít mưa có xu hướng mưa tăng lên.

Các tháng trong năm đối với từng khu vực trong tỉnh thì vào các tháng trong năm có sự tăng giảm không đồng đều. Lượng mưa giảm chủ yếu vào các tháng từ tháng VI–VIII, X và tháng XI từ 20–127 mm (khu vực Rạch Giá), từ 20–160 mm (khu vực Phú Quốc), từ 26–76 mm (khu vực Thổ Chu), các tháng còn lại giảm ít hơn từ 2–16 mm cho cả ba khu vực; riêng các tháng III, IV, V và IX một vài nơi lại có sự tăng về lượng mưa trong tháng từ 25–195 mm. Nhìn chung, lượng mưa giảm chủ yếu vào thời kỳ cuối mùa mưa, còn vào mùa ít mưa thì giảm tương đối đồng đều hơn ở cả ba khu vực.

Sự biến động của lượng mưa năm so với độ hụt chuẩn ở các năm cũng rất lớn. Từ 1992–2012 thì số năm có lượng mưa đạt và vượt mức TBNN chiếm 40% (khu vực Rạch Giá), 20% (khu vực Phú Quốc) và 60% (khu vực Thổ Chu); Từ 2002–2022 thì số năm có lượng mưa đạt và vượt mức TBNN chiếm 20% (khu vực Rạch Giá), 40% (khu vực Phú Quốc và khu vực Thổ Chu).

Về xu thế lượng mưa năm tại trạm khí tượng Rạch Giá và Phú Quốc có xu thế tăng lượng mưa năm theo thời gian, còn trạm khí tượng Thổ Chu có xu thế giảm lượng mưa năm theo thời gian thời kỳ 1992–2022.

Như vậy, qua số liệu nhiệt độ, lượng mưa trong 30 năm qua của tỉnh Kiên Giang, cho ta thấy có sự biến động mạnh mẽ của khí hậu trong vùng. Mặc dù những quy luật mang tính trung bình, chỉ mới cho ta những nhận thức khái quát. Chính đặc điểm này là tiền đề để đánh giá những dị thường khí hậu hàng năm. Với sự tăng của nhiệt độ, giảm về lượng mưa khu vực Thổ Chu, tăng lượng mưa khu vực Phú Quốc và Rạch Giá, cho ta thấy được khắc nghiệt của thời tiết đang có xu hướng tăng lên. Đặc biệt trong các năm tiếp theo, làm ảnh hưởng và tác động mạnh mẽ đến đời sống của con người, cũng như cây trồng và vật nuôi đối với tỉnh Kiên Giang nói riêng và Việt Nam nói chung. Nên việc đối phó với sự biến đổi khí hậu là vấn đề cần đặt ra, hoạch định chính sách và đánh giá tác động của nó đối với các ngành kinh tế–xã hội có liên quan, đối với trên địa bàn tỉnh là điều cần thiết.

**Lời cảm ơn:** Bài báo hoàn thành nhờ vào kết quả của nhiệm vụ: “Đánh giá xu thế biến đổi mưa, nhiệt độ tỉnh Kiên Giang”.

**Lời cam đoan:** Tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

#### **Tài liệu tham khảo**

1. Bảo, N.V. Đặc điểm khí hậu tỉnh Kiên Giang, 1984.
2. Xiển, N.; Toàn, P.N.; Đắc, P.T. Đặc điểm khí hậu miền Bắc Việt Nam. Nhà xuất bản khoa học, 1968.
3. Minh, T.C. Khí hậu và khí tượng đại cương. NXB Đại học quốc gia Hà Nội, 2007.

4. Ngử, N.Đ.; Hiệu, N.T. Khí hậu và tài nguyên khí hậu Việt Nam. Nhà xuất bản Nông nghiệp, Hà Nội, 2004.
5. Bộ Tài nguyên và Môi trường. Kịch bản Biến đổi khí hậu. Nhà xuất bản Bộ Tài nguyên môi trường, 2020.
6. Bộ Tài nguyên và Môi trường. Kịch bản BĐKH và NBD cho Việt Nam. Nhà xuất bản Bộ Tài nguyên môi trường, 2016.
7. Fernández-Chacón, F.; Pulido-Velázquez, D.; Jiménez-Sánchez, J. et al. Trends analysis of precipitation and temperature in the Alto Genil basin (Southeast Spain) from 1970 to 2010. EGU General Assembly Conference Abstracts. 2016, 18, EPSC2016-14606.
8. Güner, B.Ü. Trend analysis of precipitation and drought in the Aegean region, Turkey: Trend analysis of precipitation and drought. *Meteorol. Appl.* **2017**, 24(2), 239-249.
9. Krishnan, M.V.N.; Prasanna, M.V.; Vijith, H. Statistical analysis of trends in monthly precipitation at the Limbang River Basin, Sarawak (NW Borneo), Malaysia. *Meteorol. Atmos. Phys.* **2018**, 131(2), 1-14.
10. Hà, H.T.M.; Tân, P.V. Xu thế và mức độ biến đổi của nhiệt độ cực trị ở Việt Nam trong giai đoạn 1961-2007. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN, Khoa học Tự nhiên và Công nghệ* **2009**, 25(3S), 412-422.
11. Thành, N.Đ.; Tân, P.V. Kiểm nghiệm phi tham số xu thế biến đổi của một số yếu tố khí tượng giai đoạn 1961-2007. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN* **2012**, 1-8.
12. Tín, N.V. Đánh giá xu thế biến đổi của lượng mưa thời đoạn lớn nhất ở Tp. Hồ Chí Minh giai đoạn 1971-2016 bằng kiểm định phi tham số Mann-Kendall. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2017**, 683, 52-55.
13. Tuyết, B.T.; Minh, P.T. Nghiên cứu đặc điểm xu thế biến đổi mưa nhiệt tỉnh Kiên Giang. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2018**, 685, 36-47.
14. Cường, H.Đ. Nghiên cứu điều kiện khí hậu nông nghiệp phục vụ phát triển kinh tế - xã hội và phòng tránh thiên tai vùng Tây Nguyên. Đề tài cấp Bộ TNMT, 2014.
15. Bộ Tài nguyên Môi trường. Báo cáo Đánh giá khí hậu quốc gia, 2021.
16. My, P.T.T. Xu thế biến đổi nhiệt độ và lượng mưa ở Nghệ An giai đoạn 1962 - 2017. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2018**, 689, 58-64.
17. Thục, T.; Hương, H.T.L.; Thủy, T.T. Biến đổi khí hậu: Những thách thức mới trong phòng chống thiên tai, 2021.
18. Thông, V.V. Nghiên cứu đặc điểm khí hậu và bước đầu đánh giá sự tác động của biến đổi khí hậu đến vùng Gò Công tỉnh Tiền Giang. Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Tiền Giang, 2013.
19. Lan, H.N. Khí hậu Nông nghiệp Nam Bộ Việt Nam, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ Thuật, 2016.
20. Toàn, P.N.; Đắc, P.T. Đặc điểm khí hậu Việt Nam. NXB Khoa học và kỹ thuật Hà Nội, 1992.
21. Thục, T. Biến đổi khí hậu và tác động ở Việt Nam. Viện khoa học Khí tượng Thủy văn và Môi trường, 2010.
22. Mandal, R.B. Patterns of regional geography - an international perspective. Printer by R.S.Printer, New Delhi - 28, 1990.
23. Stern, H.; de Hoedt, G. Objective classification of Australian climates. Australian Meteorology Magazine, 2000.
24. Tài, N.H. Phân vùng khí hậu tự nhiên lãnh thổ Việt Nam. Báo cáo tổng kết đề tài nghiên cứu khoa học cấp Tổng cục, Hà Nội, 1992.



## **Trending of rainfall and temperature in Kien Giang province**

**Dinh Thi Viet Ha**<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Kien Giang Hydrometeorological Station; viethakttv@gmail.com

**Abstracts:** Recently, due to the influence of climate change, weather events occur irregularly, this change will strongly affect and have a profound impact on related socio-economic sectors, people's lives, as well as the sustainability of crops and livestock for Kien Giang province in particular and Vietnam in general. Therefore, it is necessary to assess the development of rain and temperature changes. Based on the statistical method, the linear function  $y = A_0 + A_1t$ , the series of temperature and precipitation data in the past 30 years (from 1992–2022), to evaluate the spatial distribution of annual variables of the region, the variation of rain, temperature by season, year, month, day and trend over decades. The results show the strong variation of climate in the region. Although the measurement is generally averagely referable, they also provide general insights. They form the premise to evaluate the occurrence of annual climate irregularity. With the increase in temperature, decrease in rainfall in Tho Chu area, and the increase in rainfall in Phu Quoc and Rach Gia areas, it is showed that the severity of the weather tends to unstoppable. The research results have contributed to the database in the field of meteorology and climate in Kien Giang.

**Keywords:** Climate change; Trend of rain change; Temperature; Influence of heat and rain; Kien Giang province.

*Bài báo khoa học*

# **Xây dựng công cụ ước lượng mưa từ độ phản hồi radar bằng công nghệ AI**

**Đỗ Hồng Hoạt<sup>1\*</sup>, Lê Ngọc Quyên<sup>1</sup>, Vũ Diệu Hồng<sup>1</sup>, Nguyễn Công Thành<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Đai khí tượng thủy văn khu vực Nam Bộ; dh.hoat@gmail.com; quyentccb@gmail.com; vudieuhong15@gmail.com; jackynguyen.kttv@gmail.com

\*Tác giả liên hệ: dh.hoat@gmail.com; Tel.: +84-908586859

Ban biên tập nhận bài: 12/1/2023; Ngày phản biện xong: 24/2/2023; Ngày đăng bài: 25/3/2023

**Tóm tắt:** Số liệu ra đa thời tiết là nguồn số liệu rất hữu hiệu được sử dụng để phân tích và dự báo thời tiết, đặc biệt là trong việc cảnh báo hạn cực ngắn phục vụ dự báo. Việc sử dụng hiệu quả và kịp thời số liệu radar sẽ mang lại ý nghĩa rất lớn. Do đó, nghiên cứu xây dựng công cụ ước lượng mưa bằng công nghệ trí tuệ nhân tạo (AI) trong việc sử dụng số liệu radar vào dự báo mưa hạn cực ngắn. Mô hình Convolutional Neural Networks (CNN) với cơ sở Rainet được dùng để tính toán và ước lượng mưa từ ảnh radar Nhà Bè, với dữ liệu các tháng mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 11 năm 2019 và năm 2020 dùng để huấn luyện mô hình. Nghiên cứu đã áp dụng số liệu năm 2021 để kiểm nghiệm kết quả. Đánh giá các trường hợp cho thấy khả năng ước lượng mưa của công cụ là tương đối tốt về khả năng xảy ra mưa; về lượng mưa đa phần nhỏ hơn so với thực tế, tuy nhiên, sai số cũng không quá lớn.

**Từ khóa:** Ước lượng mưa; Convolutional Neural Networks (CNN).

## **1. Mở đầu**

Trong những năm gần đây, ngoài việc sử dụng mô hình dựa trên vật lý, các nhà dự báo và nhà nghiên cứu đã bắt đầu áp dụng các kỹ thuật AI rộng rãi hơn nhiều, khi chúng thể hiện sự hiệu quả trong nhiều ứng dụng, bao gồm hiệu chỉnh sai lệch sau mô hình, xử lý bộ dữ liệu lớn, giảm quá tải nhận thức và mở khóa thông tin chi tiết mới trong bộ dữ liệu lớn. AI và các công nghệ khoa học dữ liệu, đặc biệt là khoa học máy tính và khai thác dữ liệu, thu hẹp khoảng cách giữa dự báo mô hình số và thời gian thực bằng cách cải thiện độ chính xác. Các kỹ thuật AI cũng trích xuất thông tin không có sẵn từ các mô hình dự báo bằng cách kết hợp đầu ra của mô hình với các quan sát để hỗ trợ quyết định bổ sung cho người dự báo và người dùng [1–9].

Trên thế giới, có nhiều nghiên cứu trước đó sử dụng công nghệ AI vào dự báo, cảnh báo thời tiết nguy hiểm. [1] đã nghiên cứu máy học dự báo lượng mưa từ ảnh radar (Machine Learning for Precipitation Nowcasting from Radar Images). Các tác giả nghiên cứu một ứng dụng của Deep Learning (DL) cho vấn đề dự báo lượng mưa, độ phân giải cao (1 km × 1 km) trong thời gian ngắn (1 giờ) dự báo về lượng mưa. Các tác giả coi dự báo như một bài toán dịch từ ảnh sang ảnh và tận dụng sức mạnh của mạng nơ-ron tích tụ UNET phổ biến. Các tác giả thấy điều này hoạt động thuận lợi khi so sánh với ba mô hình thường được sử dụng: luồng quang học, độ bền và dự báo hiện tại HRRR một giờ của NOAA. Nghiên cứu chỉ ra rằng, dự báo độ phân giải cao là một công cụ thiết yếu cần thiết để thích ứng hiệu quả với biến đổi khí hậu, đặc biệt là đối với thời tiết khắc nghiệt. Nghiên cứu về sử dụng AI để cải thiện thời gian gian dự báo cho các hiện tượng thời tiết tác động mạnh [2]. Trong nghiên cứu, các tác giả chứng minh rằng việc áp dụng các kỹ thuật AI cùng với sự hiểu biết vật lý về môi trường

có thể cải thiện đáng kể kỹ năng dự báo đối với nhiều loại thời tiết có tác động mạnh. Họ cũng đưa ra các kỹ thuật AI có thể xử lý “dữ liệu lớn”, cung cấp thông tin chi tiết về các hiện tượng thời tiết có tác động lớn và nâng cao nhận biết về thời tiết có tác động lớn. [3] Nghiên cứu đã sử dụng AI để dự báo lượng mưa tháng và khí hậu tương lai cho lưu vực Bowen, một khu vực khai thác than quan trọng ở Queensland, Australia. Các dự báo thực hiện dựa trên các mô hình hoàn lưu chung (GCM) và chỉ ra rằng sẽ có sự thay đổi về thời gian và cường độ của lượng mưa ở lưu vực Bowen cùng với biến đổi khí hậu. Việc sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo (ANN), ANN có thể được sử dụng để tạo dự báo hàng tháng trước 3 tháng. Những dự báo này có thể được cải thiện thông qua sự kết hợp tuyến tính có trọng số của các dự báo. [4] nghiên cứu động lực khí quyển, sử dụng AI trong dự báo thời tiết và khí hậu. Các tác giả nhận thấy có thể sử dụng mạng nơ-ron sâu để mô phỏng toàn bộ động lực của một tổng thể được đơn giản hóa mạnh mẽ mô hình hoàn lưu, cung cấp cả dự báo tốt về trạng thái mô hình vài ngày tới cũng như khí hậu ổn định trong dài hạn chuỗi thời gian.

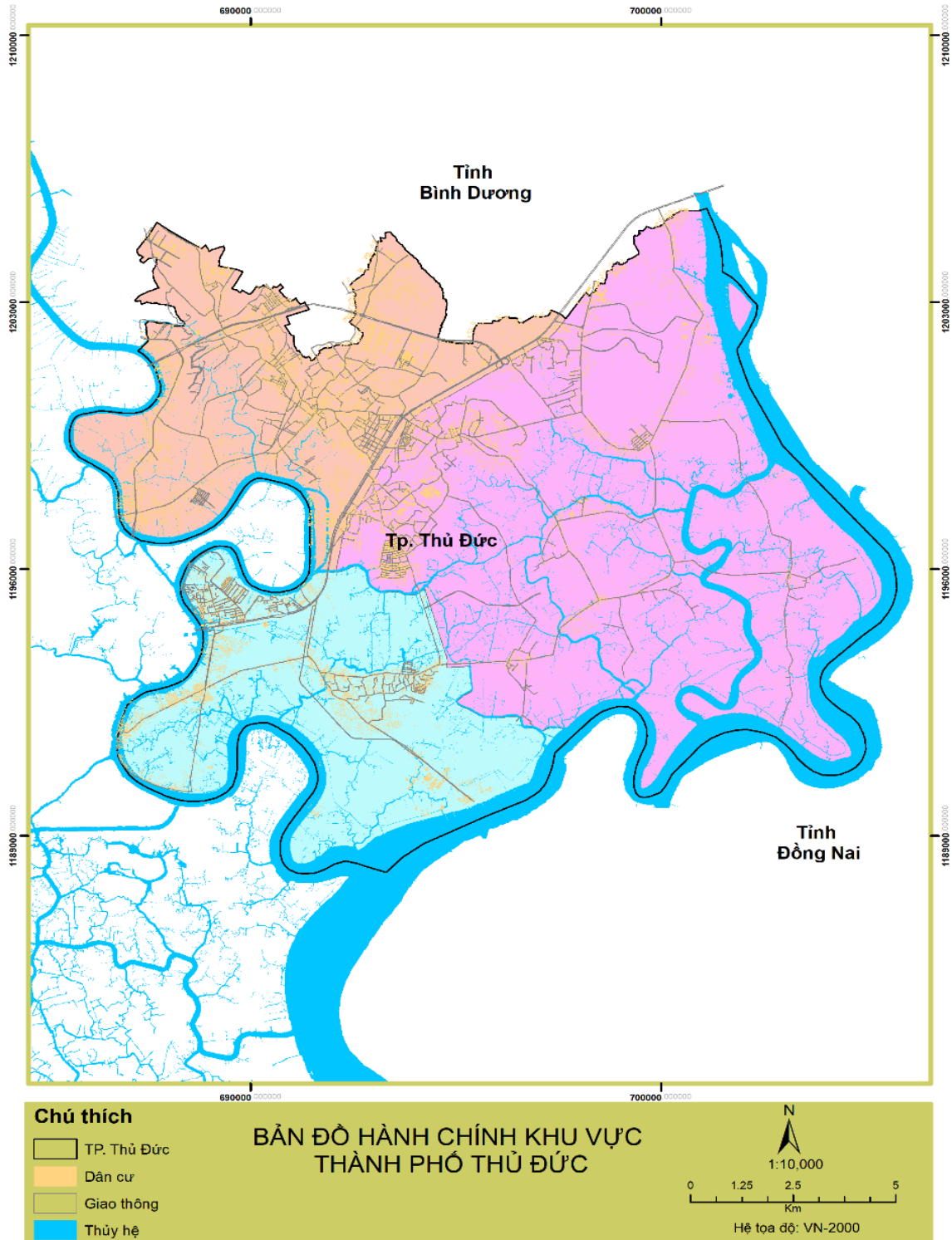
Tại Việt Nam, công nghệ AI cũng đang dần phổ biến trong nhiều lĩnh vực, và ngành Khí tượng Thủy văn cũng đã có những nghiên cứu ứng dụng công nghệ AI trong xử lý thông tin dữ liệu, quan trắc và dự báo, cảnh báo sớm. Đài Khí tượng cao không nghiên cứu, phát triển công cụ sử dụng mô hình học máy: *Logistic Regression Model (LRM)*, *Random Forest (RF)* và *Decision Tree Classifier (DTC)* để tăng cường độ chính xác của thông tin dự báo dông, sét đã được đưa vào dự báo nghiệp vụ từ năm 2022. Trung tâm Thông tin và Dữ liệu KTTV đã thực hiện nghiên cứu giải pháp ứng dụng AI để nhận dạng, hỗ trợ dự báo, cảnh báo một số hiện tượng khí tượng thủy văn nguy hiểm. Trung tâm Dự báo KTTV quốc gia có một số đề tài nghiên cứu xây dựng hệ thống AI ứng dụng trong dự báo xoáy thuận nhiệt đới ở Biển Đông và ảnh hưởng đến Việt Nam hạn đến 3 ngày; Nghiên cứu đổi mới công nghệ dự báo sóng biển, nước dâng do bão thời gian 24 giờ bằng kỹ thuật xử lý dữ liệu lớn và học máy và Nghiên cứu ứng dụng công nghệ số mới để dự báo định lượng mưa hạn cực ngắn cho khu vực trung du, miền núi Việt Nam. Đài KTTV khu vực Nam Bộ đã nghiên cứu xây dựng hệ thống giám sát, dự báo, cảnh báo ngập/ triều đô thị dựa trên nền tảng AI tại TP HCM; ứng dụng AI phục vụ dự báo mặn và thí điểm cho tỉnh Sóc Trăng [10].

Có nhiều phương pháp học máy để giải quyết bài toán xử lý hình ảnh phân loại hình ảnh (*Image classification (SVM, k-means, ...)*), phát hiện đối tượng (*Image detection (RCNN, Fast RCNN, Faster RCNN, YOLO, ...)*). Xây dựng công cụ ước lượng lượng mưa từ độ phản hồi Radar là một bài toán xử lý hình ảnh khá phức tạp đòi hỏi phải có sự tổng hợp kết quả của các phương pháp trên nên chúng tôi đã lựa chọn phương pháp CNN dựa trên Rainet có kiến trúc U-Net. Đây là một trong những phương pháp tiên tiến trong lĩnh vực xử lý ảnh có mô hình học sâu với nhiều lớp và có khả năng mở rộng. Nó giúp cho việc dự báo chính xác hơn và hiệu quả hơn. Chi tiết về phương pháp, quá trình thực nghiệm và kết quả sẽ được trình bày lần lượt ở các phần tiếp theo của nghiên cứu.

## 2. Số liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Giới thiệu khu vực nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, thành phố Thủ Đức, TPHCM được chọn làm trọng tâm nghiên cứu. Đối với những vấn đề cơ bản cần giải quyết để phát triển kinh tế xã hội cũng như khoa học kỹ thuật thuận lợi hơn đó là vấn đề giao thông và ngập úng, là hai vấn đề lớn. Tại TPHCM vấn đề ngập đang là vấn đề rất đáng quan tâm khi với mật độ dân cư cao, cũng như hệ thống hạ tầng dày đặc thì ngập lụt gây ảnh hưởng rất lớn tới đời sống của người dân, và khu vực thành phố Thủ Đức cũng là điểm ngập thường xuyên với những “rón ngập” của thành phố. Vì vậy, việc lựa chọn thí điểm dự báo mưa lớn hạn cực ngắn nhằm phục vụ hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo của đề tài cho thành phố Thủ Đức là một sự lựa chọn hợp lý và hữu ích; sau đó, khi hệ thống đã được kiểm nghiệm, ứng dụng cũng như đánh giá và cho kết quả tốt sẽ triển khai trên toàn bộ TP Hồ Chí Minh [11].



Hình 1. Bản đồ hành chính thành phố Thủ Đức.

## 2.2. Số liệu thu thập

Số liệu radar thời tiết Nhà Bè đặt tại huyện Nhà Bè, thành phố Hồ Chí Minh các tháng mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 11 của giai đoạn 2019–2021, thời gian quét 10 phút/lần, được sử dụng để làm dữ liệu nghiên cứu. Số liệu các năm 2019, 2020 dùng để huấn luyện mô hình AI. Số liệu năm 2021 sử dụng để kiểm nghiệm kết quả. Độ phân giải mỗi tệp là 660×660.

Số liệu đánh giá: Số liệu mưa dự báo và quan trắc tại 3 điểm đo mưa tự động gồm trạm Cát Lái, trạm Thủ Đức, trạm Dĩ An vào các ngày 15/7/2021, 19/7/2021, 19–20/8/2021, 18–19/9/2021 và 21/9/2021.

### 2.3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sẽ sử dụng mô hình *Convolutional Neural Networks (CNN)* với cơ sở Rainet dùng để nghiên cứu và xây dựng công cụ ước lượng mưa từ số liệu radar. Mạng nơ-ron tích chập – CNN là một trong những mô hình Deep Learning tiên tiến giúp cho chúng ta xây dựng được những hệ thống thông minh với độ chính xác cao. CNN bao gồm tập hợp nhiều lớp khác nhau có thể học và trích xuất các đặc trưng quan trọng của hình ảnh một cách tự động và giúp cho việc dự đoán trở nên chính xác hơn. Thiết kế của nó được phát triển được ứng dụng rộng rãi trong cho các bài toán nhận dạng, phân tích hình ảnh và các bài toán dự báo mưa bằng một lượng lớn hình ảnh từ độ phản hồi radar [12].

#### 2.3.1. Phương pháp xây dựng mô hình AI

Mô hình AI được xây dựng theo kiến trúc mã hóa – giải mã (*encoder–decoder*) đối xứng nhau. Đặc trưng trong kiến trúc đối xứng giữa các lớp bên trái với lớp bên phải giúp ta phục hồi lại thông tin đã thất thoát tại các lớp max pooling vì nếu như ta sử dụng lớp lấy mẫu tăng lên (*upsampling layer*) ngay từ lớp cuối cùng ở phần mã hóa thì thông tin của dữ liệu ban đầu bị mất đi rất nhiều.

- Trong đó phần mã hóa (*encoder*) dùng để giảm kích thước đầu vào của lớp dữ liệu qua đó trích lọc đặc trưng để tìm ra đặc trưng của dữ liệu bằng việc sử dụng các lớp tích chập (*convolutional layer*) và các lớp tổng hợp tối đa (*max pooling layer*).

- Phần giải mã (*decoder*) dùng để phục hồi lại kích thước ban đầu của lưới dữ liệu sử dụng các lớp lấy mẫu tăng lên (*upsampling layer*) và lớp tích chập (*convolutional layer*).

Mô hình có 20 lớp tích chập (*convolutional layer*), 4 lớp tổng hợp tối đa (*max pooling layer*), 4 lấy mẫu tăng lên (*upsampling layer*) và 2 lớp bỏ qua (*dropout layer*) và 4 lớp kết nối bỏ qua (*skip connections*).

#### 2.3.2 Phương pháp đánh giá

Nghiên cứu lựa chọn các chỉ số cho đánh giá gồm: ME, MAE, RMSE, Bias, Far, PC [16–19].

Đánh giá sai số trung bình: F–Dự báo, O–Quan trắc

- Sai số trung bình ME

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - O_i) = \bar{F} - \bar{O} \quad (1)$$

- Sai số trung bình tuyệt đối

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |F_i - O_i| \quad (2)$$

- Sai số quân phương

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2} \quad (3)$$

Đánh giá đối với dự báo pha: Hits (H) = dự báo có và quan trắc có; Misses (M) = dự báo không và quan trắc có; False alarms (F) = dự báo có và quan trắc không; Correct negatives (CN) = dự báo không và quan trắc không.

- Điểm sai số (bias score): Bias score = (H+FA)/(H+M)

Bias score là thước đo tần số tương đối giữa mưa dự báo và quan trắc.

- Tỷ phần dự báo phát hiện sai: FAR = F/(H+ F)

Giá trị tối ưu FAR (False Alarms Ratio) = 0

- Độ chính xác: PC (Percentage Correct) = (H+ CN)/ (M+ F+ H+CN)



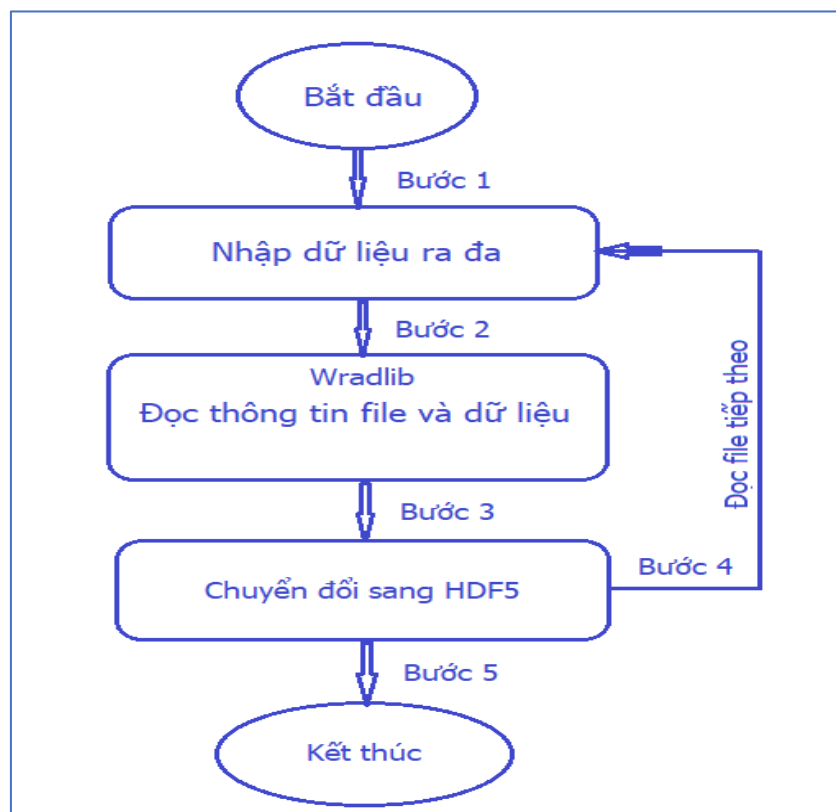
Giá trị tối ưu FAR (False Alarms Ratio) = 1

#### 2.4. Quá trình thực nghiệm mô hình

##### 2.4.1. Chuyển đổi và sắp xếp dữ liệu ra đa RAW ở định dạng HDF5

Sau khi thu thập số liệu ra đa Nhà Bè, sẽ thực hiện chuyển đổi dữ liệu ra đa về định dạng HDF5, tiến hành cài đặt và sử dụng thư viện mã nguồn mở Python Wradlib, đây là thư viện phát triển và sử dụng riêng cho việc phân tích dữ liệu ra đa, được rất nhiều trung tâm trên thế giới sử dụng bởi tính hiệu quả và ổn định. Sau đó, tiến hành viết một chương trình python để đọc các file RAW và chuyển đổi về định dạng HDF5. Quy trình thực hiện chuyển đổi theo các bước sau:

- Bước 1: Chương trình đọc file dữ liệu radar tại thư mục được chỉ định.
- Bước 2: Dùng thư viện Wradlib đọc file radar.
- Bước 3: Chuyển đổi dữ liệu sang định dạng HDF5.
- Bước 4: Chuyển về bước 1 với file ra đa tiếp theo, thực hiện lại các bước 2, 3.
- Bước 5: Sau khi chuyển đổi tất cả các file ra đa sang HDF5 sẽ kết thúc quá trình.



**Hình 2.** Quy trình chuyển đổi dữ liệu ra đa về định dạng HDF5.

##### 2.4.2. Thu thập và lập dữ liệu mưa quan trắc tự động

Do mỗi loại trạm đo mưa có những cấu trúc dữ liệu khác nhau nên chúng tôi đã xây dựng chương trình chuyển đổi đối với từng loại dữ liệu. Ngôn ngữ Python được sử dụng để xây dựng chương trình. Đối với các trạm thuộc dự án “Đo mưa nhân dân VRAIN”, phần mềm sẽ lấy số liệu theo phương thức HTTP qua website của dự án mỗi 10 phút. Theo dõi các thư mục chứa file data được truyền về mỗi máy chủ riêng biệt của từng dự án. Mỗi khi có file dữ liệu được truyền về chương trình sẽ đọc file dữ liệu thô rồi thông qua các bước chuyển đổi bên dưới để đưa về dữ liệu chuẩn.

Khi thu thập đầy đủ các số liệu từ các trạm tự động và tiến hành kiểm soát số liệu thì chúng tôi sẽ tiến hành thiết kế và xây dựng cơ sở dữ liệu My SQL.

2.4.3. Các bước chạy mô hình

Huấn luyện mô hình AI với các bộ dữ liệu radar trong quá khứ để thu được bộ trọng số. Bộ trọng số này sẽ được dùng để làm trọng số cho mô hình AI.

Mô hình AI lấy bốn lưới dữ liệu radar liên tiếp làm các kênh đầu vào riêng biệt (t-30, t-20, và t-10 phút và t – trong đó t là thời gian của hiện tại) để dự báo thời điểm t+10 phút. Mỗi lưới chứa 660×660 giá trị; đối với mỗi ô, giá trị đầu vào là lượng mưa lấy từ sản phẩm phản hồi vô tuyến của radar. Có 5 mức độ phân giải gần như đối xứng cho cả bộ giải mã và bộ mã hóa, sử dụng các dữ liệu lượng mưa ở độ phân giải đầu vào là (x, y), ở một nửa độ phân giải (x/2, y/2), tại (x/4, y/4), tại (x/8, y/8) và tại (x/16, y/16). Cuối cùng, lớp đầu ra của độ phân giải (x, y) với hàm kích hoạt cung cấp lượng mưa dự đoán trong mỗi ô lưới trong t+10 phút. Sau khi dự báo ước lượng lượng mưa tại thời điểm t+10, chúng tôi sử dụng các giá trị t-30, t-20, t-10 và giá trị t làm đầu vào để dự báo ước lượng lượng mưa cho thời điểm t+20 quá trình được lặp lại để dự báo ước lượng lượng mưa cho thời điểm tiếp theo [13–14].

2.4.4. Quy trình tối ưu hóa

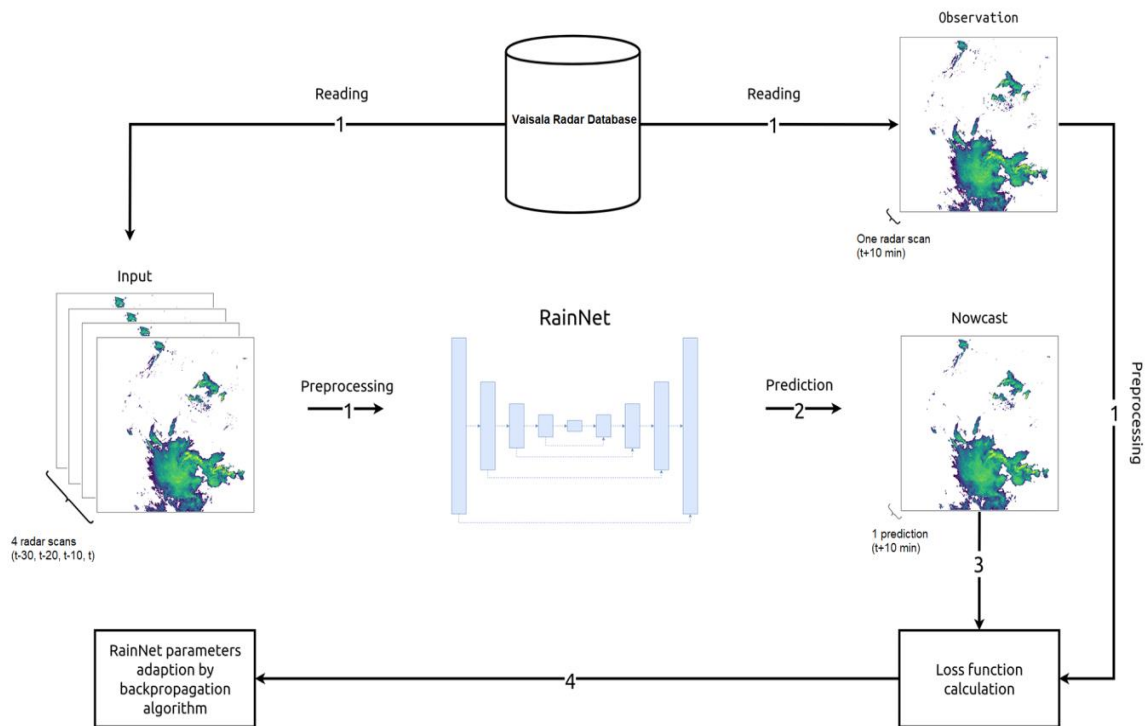
Nghiên cứu đã tối ưu hóa các tham số này bằng cách sử dụng một quy trình mà chúng tôi hiển thị một lần lặp trong hình bên dưới.

Đầu tiên, chúng tôi đọc một mẫu dữ liệu đầu vào bao gồm các lần quét radar tại thời điểm t-30, t-20, t-10 phút và t (trong đó t là thời điểm quan trắc) và một mẫu lượng mưa dự báo được tại thời điểm t+10. Bước thứ hai, mô hình AI đưa ra dự báo ước lượng lượng mưa dựa trên dữ liệu đầu vào. Bước thứ ba, tính toán một hàm mất mát (loss function) thể hiện độ lệch giữa dự báo và quan trắc. Chúng tôi sử dụng hàm logcosh như sau:

$$Loss = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(\cosh(now_i - obs_i))}{n}; \cosh(x) = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x}) \quad (4)$$

now<sub>i</sub> và obs<sub>i</sub> được phát sóng và quan sát tại vị trí thứ i, tương ứng; cosh là hàm cosin hyperbolic; n là số ô trong lần quét radar.

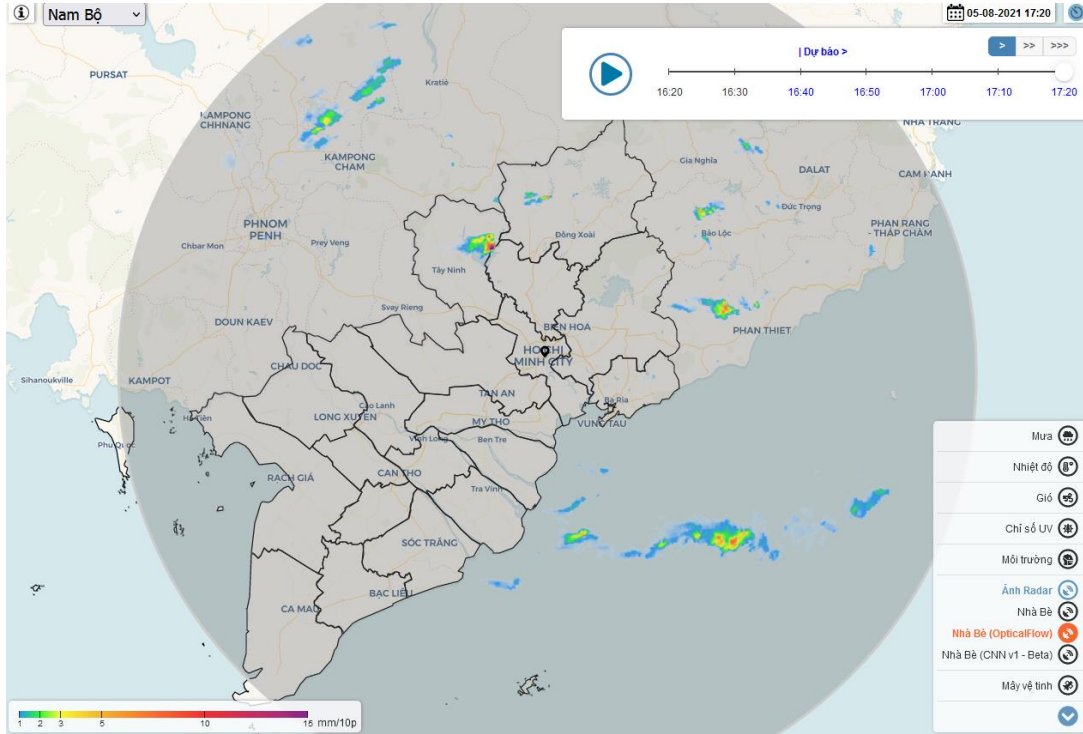
Bước bốn, cập nhật các tham số mô hình bằng hàm lan truyền ngược Adam optimizer. Minh họa một bước lặp lại của quy trình tối ưu hóa được thể hiện trong Hình 3 [13–14].



Hình 3. Minh họa một bước lặp lại của quy trình tối ưu hóa.

### 3. Kết quả và thảo luận

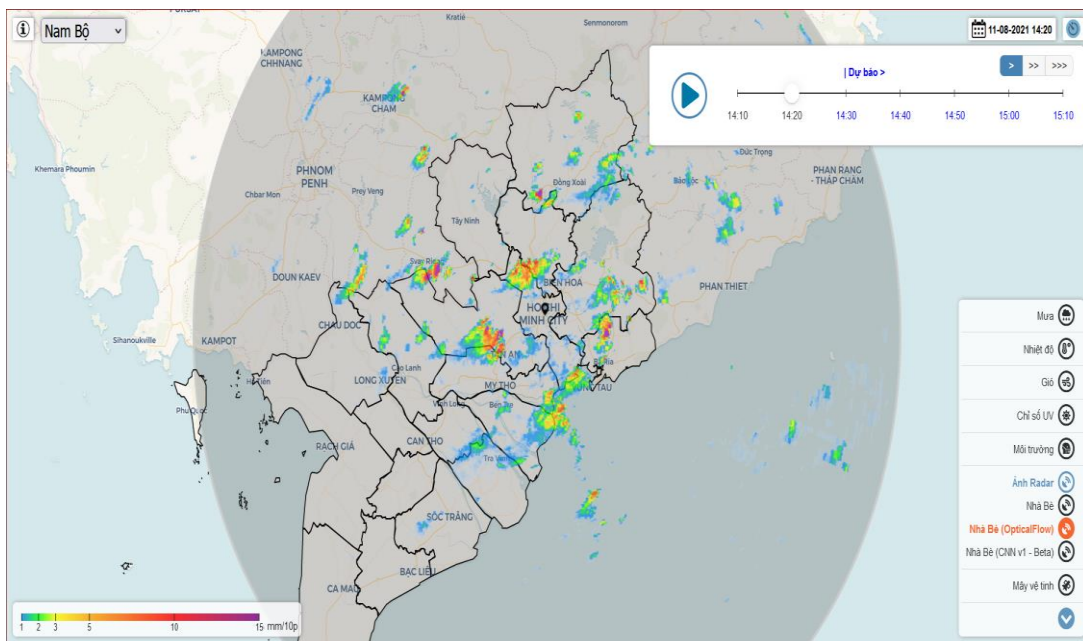
Sau khi nghiên cứu và xây dựng công cụ, chúng tôi đã hoàn thiện và thử nghiệm thành công cũng như đưa vào sử dụng công cụ ước lượng mưa từ số liệu radar bằng công nghệ AI. Công cụ hiển thị ảnh Radar Nhà Bè (Hình 4) với bên trên là thanh thời gian gồm khoảng thời gian thực tế và các khoảng thời gian dự báo để người sử dụng có thể lựa chọn các khoảng thời gian. Bên dưới là thang đo cường độ mưa đơn vị là mm/10p, cường độ mưa ước lượng được chia chi tiết theo thang màu để người dùng dễ dàng sử dụng.



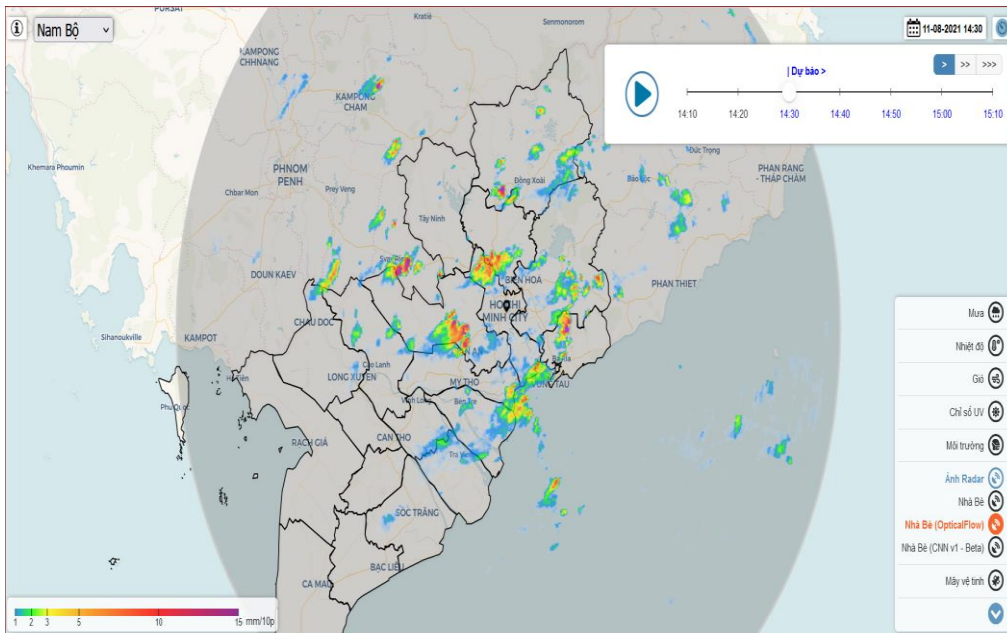
**Hình 4.** Giao diện công cụ ước lượng mưa từ ảnh radar bằng công nghệ AI.

#### 3.1. Kết quả thử nghiệm

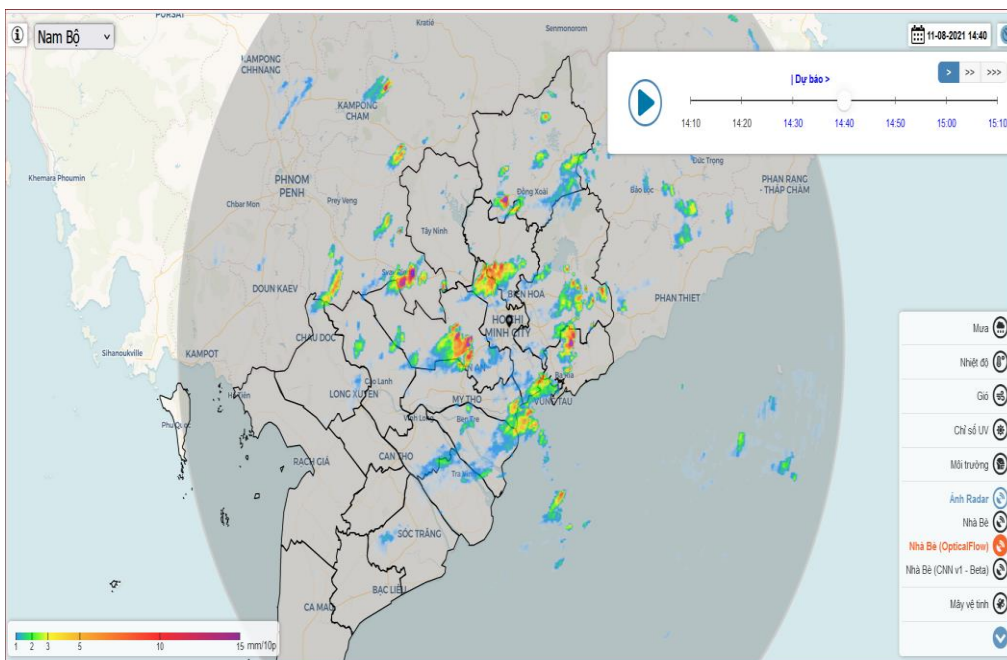
Trường hợp ngày 11/8/2021



**Hình 5.** Ảnh radar lúc 14h20 ngày 11/8/2021.



**Hình 6.** Ảnh radar dự báo lúc 14h30 ngày 11/8/2021.



**Hình 7.** Ảnh radar dự báo lúc 14h40 ngày 11/8/2021.

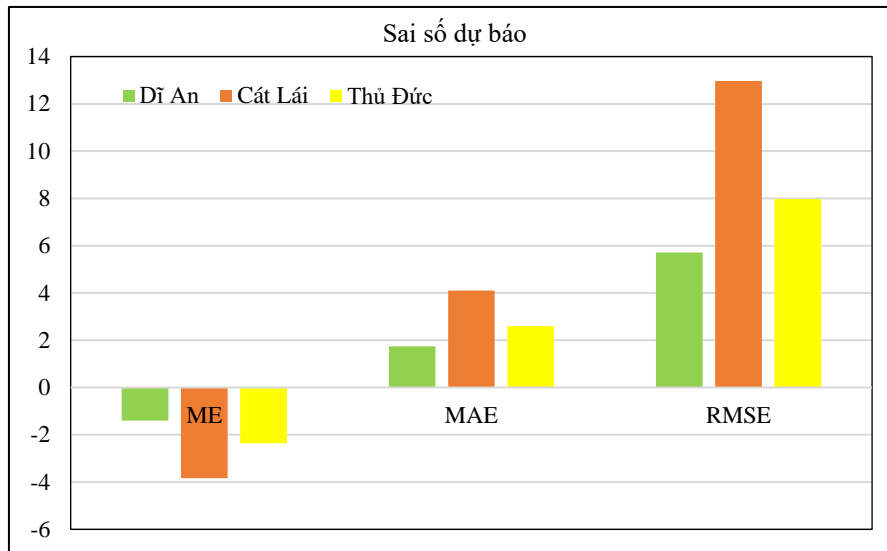
Trường hợp ngày 11/8/2021 (Hình 4–Hình 6) cho thấy rõ công cụ đã đưa ra được ước lượng mưa và thông qua các hình ảnh dự báo có thể thấy rằng vùng phản hồi di chuyển khá chậm khi vị trí các vùng mây cũng như lượng mưa ước lượng là ít thay đổi. Lượng mưa ước lượng cũng khá sát khi ước lượng ở Củ Chi–TPHCM khoảng 5 mm/10 phút và vùng mây đối lưu tồn tại khoảng 40 phút.

### 3.2. Kết quả đánh giá

Sau khi xây dựng thành công công cụ ước lượng mưa và đưa vào sử dụng, nghiên cứu sử dụng kết quả tại 3 điểm đo mưa tự động gồm Dĩ An, trạm Cát Lái, trạm Thủ Đức và các ngày 15/7/2021, 19/7/2021, 19–20/8/2021, 18–19/9/2021 và 21/9/2021. Tiến hành đánh giá bằng việc tính toán các chỉ số ME, MAE, RMSE, Bias, Far, PC, kết quả được phân tích trong Hình 8 và Hình 9.

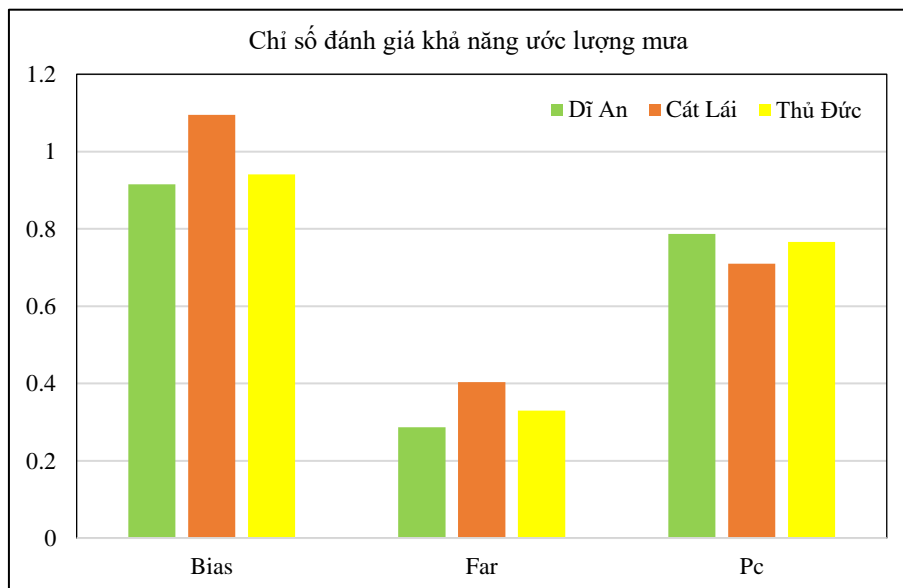


Hình 8 cho thấy các giá trị ME < 0, cho thấy rằng ước lượng mưa đều nhỏ hơn so với quan trắc thực tế, nhưng cũng nhỏ hơn không nhiều. Giá trị MAE dao động từ 1,75–4,09, sai số trung bình cũng không quá lớn và cũng không chênh lệch nhiều giữa các trạm, lớn nhất tại trạm Thủ Đức và nhỏ nhất là trạm Dĩ An. Giá trị RMSE của cả 3 trạm dao động từ 5,71–12,96, và chênh lệch giữa MAE và RMSE cũng không nhỏ (4–8,8) nên có thể thấy rằng ước lượng mưa ở cả 3 trạm đều có những trường hợp có sai số lớn.



**Hình 8.** Các chỉ số đánh giá sai số trung bình.

Theo dõi Hình 9 thấy rằng giá trị Bias giữa các trạm không chênh lệch nhau nhiều và đều dao động quanh giá trị 1 (từ 0,92–1,07), (Bias tối ưu = 1), do vậy mà xác suất ước lượng khá tốt, trạm Dĩ An và Thủ Đức có Bias < 1 nên ước lượng mưa số lần ít hơn so với thực tế, tuy chênh lệch là khá nhỏ; còn trạm Dĩ An có Bias > 1 nên số lần ước lượng mưa nhiều hơn thực tế nhưng cũng chênh lệch nhỏ. Giá trị Far từ 0,28–0,38 cho biết khả năng ước lượng mưa cũng không có nhiều dự báo không, khoảng chưa tới 28%–38% trên tổng số lần dự báo. Chỉ số Pc cho biết độ chính xác trong ước lượng có mưa hay không có mưa, và Pc lần lượt của các trạm Dĩ An 0,79, Cát Lái 0,72, Thủ Đức là 0,77. Các giá trị Pc cũng tương đối tốt và cho thấy khả năng ước lượng chính xác mưa hay không mưa tại 3 trạm Dĩ An, Cát Lái, Thủ Đức lần lượt là 79%, 72% và 77%.



**Hình 9.** Các chỉ số đánh giá dự báo pha.



#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng được công cụ ước lượng mưa từ ảnh radar thời tiết bằng công nghệ AI. Công cụ cho thấy được sự hữu ích khi đã dự báo được lượng mưa bằng phương pháp sử dụng công nghệ AI và cụ thể là mô hình RainNet để tính toán và ước lượng mưa từ ảnh radar Nhà Bè với dữ liệu dùng các tháng mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 11 với khoảng thời gian 10 phút. Số liệu 2019, 2020 dùng để huấn luyện mô hình và số liệu năm 2021 sử dụng để kiểm nghiệm kết quả; độ phân giải mỗi tệp là 660×660. Có thể thấy rằng, việc ước lượng lượng mưa từ ảnh radar thời tiết là rất ý nghĩa đối với dự báo cực ngắn và giúp dự báo viên rất nhiều trong việc đưa ra các cảnh báo kịp thời và chính xác hơn. Bên cạnh việc ước lượng được lượng mưa dự báo thì người sử dụng còn có thể theo dõi được sự dịch chuyển của những khối mây thông qua lượng mưa ước lượng và cảnh báo mưa lớn. Do vậy, công cụ khá hữu ích cho việc cảnh báo mưa lớn để giúp cung cấp số liệu và thông tin cho phục vụ chống ngập. Qua đánh giá thấy rằng khả năng ước lượng mưa của công cụ là tương đối tốt, tuy nhiên thường ước lượng nhỏ hơn so với thực tế và độ lớn sai số sẽ tăng dần theo bước thời gian ước lượng mưa.

Tuy nhiên công cụ vẫn có hạn chế nhất định đó là mới dự báo được lượng mưa trong thời gian ngắn. Mô hình huấn luyện AI đòi hỏi một lượng lớn dữ liệu để học và thời gian để huấn luyện thu bộ trọng số khá lâu. Nghiên cứu sẽ tiếp tục phát triển và mở rộng để hoàn thiện hơn.

**Đóng góp tác giả:** Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: Đ.H.H., L.N.Q.; Thu thập số liệu và xây dựng công cụ: Đ.H.H., N.C.T.; Đánh giá kết quả: Đ.H.H., V.D.H.; Viết bản thảo bài báo: Đ.H.H., V.D.H.; Chỉnh sửa bài báo: Đ.H.H.

**Lời cảm ơn:** Các tác giả xin gửi lời cảm ơn tới Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ đã tạo điều kiện để thực hiện bài báo này. Nghiên cứu cũng là một phần kết quả thuộc đề tài “Nghiên cứu, xây dựng và triển khai thử nghiệm hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo tại thành phố Hồ Chí Minh”.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

#### Tài liệu tham khảo

1. Agrawal, S.; Barrington, L.; Bromberg, C.; Burge, J.; Gazen, C.; Hickey, J. Machine learning for precipitation nowcasting from radar images. arXiv preprint arXiv:1912.12132, 2019.
2. McGovern, A.; Elmore, K.L.; Gagne, D.J.; Haupt, S.E.; Karstens, C.D.; Lagerquist, R.;... Williams, J.K. Using artificial intelligence to improve real-time decision-making for high-impact weather. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2017**, *98(10)*, 2073–2090.
3. Abbot, J.; Marohasy, J. Using artificial intelligence to forecast monthly rainfall under present and future climates for the Bowen Basin, Queensland, Australia. *Int. J. Sustainable Dev. Plann.* **2015**, *10(1)*, 66–75.
4. Scher, S. Artificial intelligence in weather and climate prediction. On Friday 12 June 2020 at 10.00 in Vivi Täckholmsalen, Svante Arrhenius väg, 20, 2020.
5. Marzban, C.; Stumpf, G. A neural network for tornado prediction based on Doppler radar-derived attributes. *J. Appl. Meteor.* **1996**, *35*, 617–626. Doi:10.1175/1520-0450(1996)035 <0617: ANNFTP>2.0.CO;2.
6. Mellit, A. Artificial intelligence technique for modeling and forecasting of solar radiation data: A review. *Int. J. Artif. Intell. Soft Comput.* **2008**, *1*, 52–76. doi:10.1504/IJAISC.2008.021264.

7. McCandless, T.C.; Haupt, S.E.; Young, G.S. A regime-dependent artificial neural network technique for short-range solar irradiance forecasting. *Renewable Energy* **2016**, 89, 351–359. doi:10.1016/j.renene.2015.12.030.
8. Wang, F.; Mi, Z.; Su, S.; Zhao, H. Short-term solar irradiance forecasting model based on artificial neural network using statistical feature parameters. *Energies*, **2012**, 5, 1355–1370. doi:10.3390/en5051355.
9. Baldwin, M.; Kain, J.; Lakshmiarahan, S. Development of an automated classification procedure for rainfall systems. *Mon. Wea. Rev.* **2005**, 133, 844–862. doi:10.1175/MWR2892.1.
10. <http://vnmha.gov.vn/chi-dao-dieu-hanh-103/tong-cuc-khi-tuong-thuy-van-day-manh-ung-dung-tri-tue-nhan-tao-trong-linh-vuc-khi-tuong-thuy-van-14112.html>.
11. Quyên, L.N. và cs. Nghiên cứu, xây dựng và triển khai thử nghiệm hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo tại Thành phố Hồ Chí Minh. Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp Thành phố, 2022.
12. Wu, J. Introduction to convolutional neural networks. National Key Lab for Novel Software Technology. Nanjing University, China, 2017, 5(23), 495.
13. Ayzel, G.; Scheffer, T.; Heistermann, M. RainNet v1. 0: a convolutional neural network for radar-based precipitation nowcasting. *Geosci. Model Dev.* **2020**, 13(6), 2631–2644.
14. <https://github.com/hydrogo/rainnet>
15. <https://gmd.copernicus.org/articles/13/2631/2020/>
16. Tân, P.V. Phương pháp thống kê trong khí hậu, NXB Đại học quốc gia Hà Nội, 2005.
17. Toàn, N.T và cs. Đánh giá khả năng dự báo mưa lớn của mô hình WRF do hình thể không khí lạnh kết hợp với gió đông trên cao cho khu vực Trung Trung Bộ. *Tap chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường* **2018**, 34(1S), 132–136.
18. Nga, N.T.; Thanh, C.; Hung, M.K.; Tiến, D.Đ. Đánh giá kĩ năng dự báo mưa định lượng từ mô hình quy mô toàn cầu và khu vực phân giải cao cho khu vực Bắc Bộ. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2021**, 730, 79–92.
19. Đánh giá chất lượng dự báo mưa định lượng của mô hình WRF cho khu vực Việt Nam. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2022**, 738, 1–11.

## **Building Rainfall Estimation Tool From Radar Reflectivity Using Artificial Intelligence Technique**

**Do Hong Hoat<sup>1\*</sup>, Le Ngoc Quyen<sup>1</sup>, Vu Dieu Hong<sup>1</sup>, Nguyen Cong Thanh<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Southern Regional Hydrometeorological Center; dh.hoat@gmail.com; quyentccb@gmail.com; vudieuhong15@gmail.com; jackynguyen.kttv@gmail.com

**Abstract:** Radar data is very effective in nowcasting and warning of heavy rain and floods for major cities and river basins. Effective and appropriate use of radar data is very important. Therefore, this study builds a rain estimator using Artificial Intelligence (AI) Technology in using radar data to forecast extremely short-term rainfall. Convolutional Neural Networks (CNN) model with Rainet basis is used to calculate and estimate rain from Nha Be radar images, with data of rainy season months from May to November 2019 and 2020 used to train the model. The study applied the 2021 data to test the results. Evaluation of the cases shows that the tool’s ability to estimate precipitation is relatively good in terms of the probability of rain occurrence; rainfall is mostly smaller than reality, however, the bias is not too large.

**Keywords:** Rainfall Estimation; Convolutional Neural Networks (CNN).

Bài báo khoa học

# Nghiên cứu, xây dựng và triển khai thử nghiệm hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo tại thành phố Hồ Chí Minh

Lê Ngọc Quyên<sup>1</sup>, Nguyễn Việt Hưng<sup>2\*</sup>, Đỗ Tấn Long<sup>2</sup>, Lê Đình Quyết<sup>1</sup>, Nguyễn Phương Đông<sup>3</sup>, Đặng Quang Thanh<sup>4</sup>, Lê Mạnh Dũng<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Thu Thảo<sup>2</sup>, Huỳnh Thị Phương Trang<sup>2</sup>, Đỗ Hồng Hoạt<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ; quyentccb@gmail.com

<sup>2</sup> Trung tâm Quản lý Hạ tầng kỹ thuật thành phố Hồ Chí Minh;

nguyenviethungtv@gmail.com

<sup>3</sup> Phân viện Khí tượng Thủy văn và biến đổi khí hậu phía Nam;

nguyenphuongdongkttv@gmail.com

<sup>4</sup> Công ty TNHH DHI Việt Nam; tqd@dhigroup.com

\*Tác giả liên hệ: nguyenviethungtv@gmail.com; Tel.: +84-918445566

Ban biên tập nhận bài: 15/1/2023; Ngày phản biện xong: 24/2/2023; Ngày đăng bài: 25/3/2023

**Tóm tắt:** Hiện nay có khá nhiều các công cụ dự báo trong lĩnh vực khí tượng thủy văn có thể áp dụng cho mô phỏng và dự báo ngập lụt đô thị. Tuy nhiên hầu hết các phần mềm này thường là phần mềm thương mại, đơn lẻ chưa có sự đồng bộ. Mặt khác công tác dự báo, cảnh báo mưa lớn, ngập lụt của Thành phố Hồ Chí Minh (TPHCM) chưa có sự liên kết thành hệ thống nên thời gian đưa bản tin cảnh báo mưa lớn, ngập lụt có độ chệch, chưa đủ độ tin cậy và tương tác với người dân chậm. Trong khi đó, việc ứng dụng AI trong dự báo ngập lụt cũng đang được nghiên cứu và đưa vào thực hiện tại nhiều thành phố lớn trên thế giới. Bài báo giới thiệu việc xây dựng hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt trên địa bàn thành phố Hồ Chí Minh trên cơ sở ứng dụng công nghệ thông tin trên nền tảng GIS (hệ thống thông tin địa lý) và ứng dụng nền tảng trí tuệ nhân tạo (AI) nhằm đảm bảo công tác dự báo, cảnh báo ngập lụt kịp thời, chính xác, theo hướng dự báo ngắn hạn để chủ động phòng tránh, ứng phó với ngập lụt, chia sẻ thông tin trên kho dữ liệu dùng chung của Thành phố, cho phép chính quyền và người dân truy cập một cách thuận lợi thông tin cảnh báo ngập theo thời gian thực tại TP.HCM. Hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đã được thử nghiệm trong 3 tháng 9,10 và 11 của năm 2021 trên địa bàn Thành phố Thủ Đức, với kết quả khá tốt (hệ số  $R^2 > 0,8$ ).

**Từ khóa:** Nền tảng trí tuệ nhân tạo (AI); Hệ thống cảnh báo sớm, ngập lụt; TP.HCM; MIKE URBAN, MIKE FLOOD.

## 1. Đặt vấn đề

Ngập lụt đô thị đang trở thành một vấn nạn lớn về môi trường tại hầu hết các đô thị lớn trên thế giới [1–9]. Ngay tại nhiều đô thị lớn tại các nước tiên tiến đều bị ngập đường khi gặp các trận mưa lớn. Trong điều kiện biến đổi khí hậu, những diễn biến thời tiết ngày một phức tạp và không còn tuân theo các quy luật, tình hình ngập lụt cũng gia tăng cả về phạm vi và tần suất.

Hiện nay, trên thế giới có rất nhiều nước đã và đang đầu tư xây dựng cho mình hệ thống dự báo hay cảnh báo sớm thông minh hay dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo [10–13]. Các nhà khoa học Nhật Bản đã phát triển một hệ thống mới, có thể ước lượng tình trạng ngập lụt khi mưa đang trút xuống tại khu vực đô thị ở thủ đô Tokyo [10], hệ thống này có thể phân tích

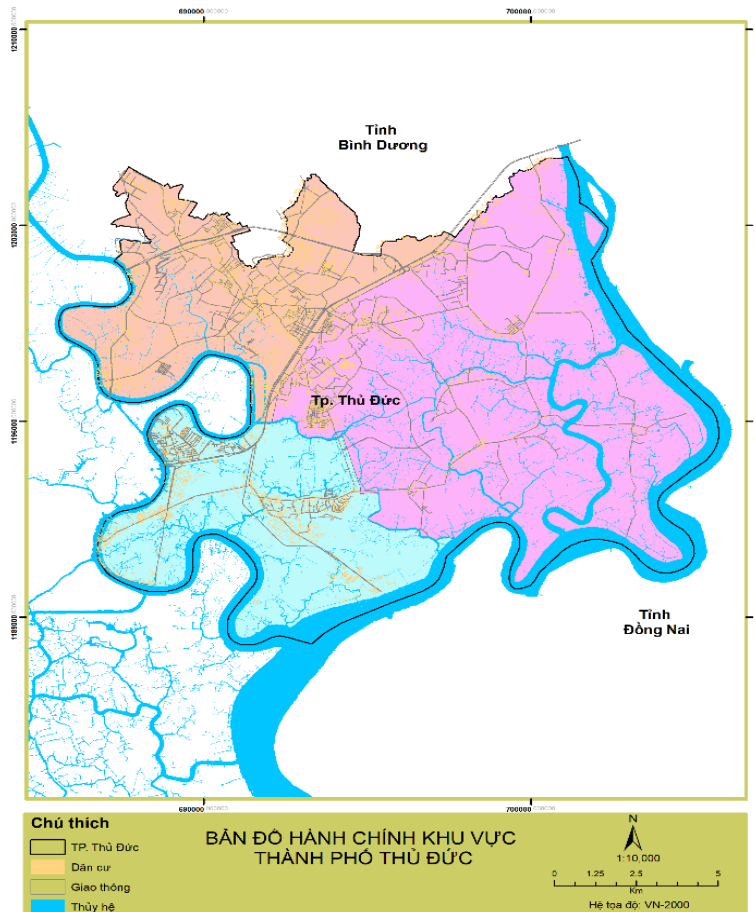
mức độ thiệt hại do tình trạng ngập lụt từ các trận mưa lớn và bão gây ra, mức độ dự báo ngập lụt được nhận diện bằng màu sắc trên bản đồ. Ủy ban Nguồn nước trung ương Ấn Độ (CWC) đã hợp tác với Google, sử dụng AI nhằm đưa ra dự báo sớm, chính xác, hiệu quả các trận lũ lụt có thể xảy ra [11], hệ thống này đã cảnh báo lũ lụt hiệu quả, đưa ra các cảnh báo lũ lụt theo khu vực đã định, và giúp người dân sớm có biện pháp đối phó.

Tại Thành phố Hồ Chí Minh, đã có khá nhiều các nghiên cứu về ngập lụt đô thị được triển khai thực hiện do cả về nhu cầu thực tiễn lẫn áp dụng các tiến bộ khoa học vào phục vụ công tác quản lý, cảnh báo và dự báo [14–21]. Bước đầu các nghiên cứu đã đưa ra bộ công cụ mô hình toán mạnh mô phỏng các điều kiện thủy văn, hệ thống tiêu thoát nước của thành phố. Kết quả thu được từ các nghiên cứu đã đáp ứng bước đầu các yêu cầu về công tác quản lý và phòng chống giảm nhẹ ngập lụt. Tuy nhiên, chưa có một nghiên cứu nào về dự báo, cảnh báo ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo được triển khai thực hiện tại Thành phố Hồ Chí Minh. Để giải quyết tồn đọng này, nghiên cứu đã tiến hành xây dựng một hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo. Nghiên cứu đã ứng dụng nền tảng trí tuệ nhân tạo để: xây dựng hệ thống dự báo mưa hạn ngắn (0–3 giờ) trên cơ sở dữ liệu ảnh ra da của trạm Nhà Bè (số liệu mùa mưa 3 năm 2019–2021, cách nhau 10 phút); xây dựng hệ thống dự báo ngập lụt đô thị trên cơ sở dữ liệu bản đồ ngập lụt, là kết quả mô phỏng ngập lụt trong quá khứ (102 trận ngập) và các kịch bản ngập lụt có thể xảy ra (1188 trận ngập) từ bộ mô hình MIKE.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu được triển khai ứng dụng và thử nghiệm trên địa bàn thành phố Thủ Đức (Hình 1).



Hình 1. Bản đồ hành chính khu vực Tp. Thủ Đức.

## 2.2. Phương pháp nghiên cứu

### 2.2.1. Phương pháp xây dựng hệ thống dự báo mưa độ phân giải cao (3×3km), thời đoạn ngắn (từ 30 phút đến 3h, 6h, 12h và tối đa 24h) và dự báo mực nước

- Phương pháp phân tích synôp: dựa trên việc xác định các hình thế thời tiết và hoàn lưu khí quyển gây mưa và mưa lớn như bão, áp thấp nhiệt đới, rãnh áp thấp, dải hội tụ nhiệt đới, gió mùa đông bắc, gió mùa tây nam để dự báo định tính sự xuất hiện mưa cũng như mưa lớn. Với mỗi hình thế synôp sẽ cho ta biết khả năng xuất hiện mưa, mưa lớn hay không mưa trên khu vực.

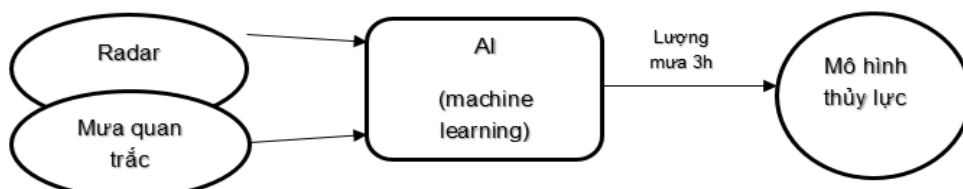
- Phương pháp thống kê dự báo mưa: được ứng dụng trong lĩnh vực dự báo thời tiết, trong đó giá trị mưa dự báo được xây dựng như là yếu tố dự báo và các nhân tố dự báo được lựa chọn thông qua các đánh giá tương quan thống kê cho từng khu vực và thời điểm cụ thể. Hạn chế chính của phương pháp này là khả năng định lượng hóa và chi tiết hóa dự báo mưa theo cả quy mô không gian và thời gian.

- Phương pháp mô hình số trị: ứng dụng các sản phẩm dự báo từ mô hình số trị để dự báo lượng mưa hạn ngắn đã được sử dụng trong nghiên cứu này. Phương pháp số trị hoặc phương pháp động lực sử dụng phương pháp số giải xấp xỉ các phương trình toán, lý mô phỏng các quá trình chuyển động trong khí quyển.

- Xây dựng công cụ phân tích các sản phẩm radar: Các sản phẩm radar cho ta biết trạng thái thời tiết thực tế đang diễn ra trên khu vực. Các dữ liệu này là rất quan trọng cho quá trình học máy bởi nó mô tả gần nhất trạng thái thời tiết hiện tại. Do đó, ta tiến hành phân tích các sản phẩm quan trắc từ radar thời tiết như sản phẩm hiển thị phản hồi định vị ngang (PPI), sản phẩm phản hồi theo độ cao không đổi (CAPPI), sản phẩm đỉnh phản hồi vô tuyến (ETOPS), sản phẩm phản hồi cực đại theo cột (CMAX), độ cao của phản hồi vô tuyến cực đại (HMAX), mỗi giá trị này sẽ cho ta biết được trạng thái khí quyển từ tầng thấp lên các tầng cao, cường độ mây, độ cao chân mây, độ cao đỉnh mây cũng như mây đang phát triển hay suy yếu đi... Các dữ liệu của radar sẽ được hiệu chỉnh, lưu trữ làm số liệu đầu vào cho quá trình học máy để dự báo lượng mưa 3h tiếp theo.

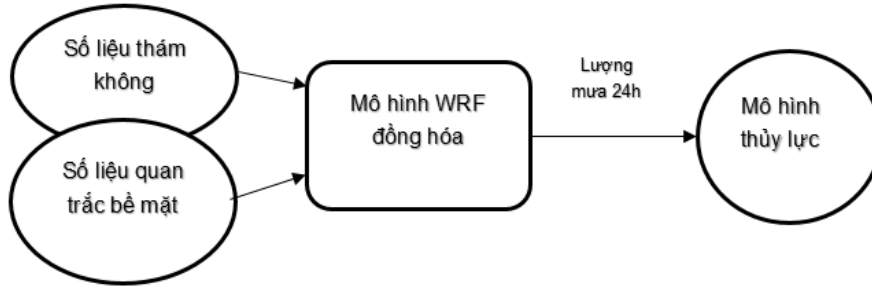
- Dự báo lượng mưa trong thời đoạn cực ngắn từ 0h–3h bằng trí tuệ nhân tạo (AI): trên cơ sở dữ liệu ảnh ra da của trạm Nhà Bè (số liệu mùa mưa 3 năm 2019–2021, cách nhau 10 phút); kết hợp với số liệu thực đo lượng mưa của các trạm đo trên mặt đất (Trên toàn TPHCM có 11 trạm đo, vùng nghiên cứu thử nghiệm Thủ Đức, có 3 trạm là: Cát Lái, Thủ Đức và Dĩ An) trong cùng thời điểm để tiến hành học máy (huấn luyện). Sau quá trình huấn luyện, với mỗi dữ liệu radar hiện tại sẽ có một kịch bản mưa tương ứng trong 0–3h tới. Quá trình học máy liên tục với thời gian đủ dài sẽ cho ta kết quả dự báo mưa ngày càng chính xác. Đây sẽ là dữ liệu quan trọng làm đầu vào cho mô hình thủy lực. Phương pháp đào tạo sử dụng phương pháp máy vector hỗ trợ, trong đó cụ thể dùng 2 thuật toán là SVC (Vector hỗ trợ phân loại) dùng để phân vùng đào tạo AI nhận biết vùng có mưa hay không mưa và thuật toán SVR (vector hỗ trợ hồi quy) dùng để tính toán dự báo giá trị lượng mưa tại các vị trí theo lưới điểm tính toán. Kết quả cho thấy AI được đào tạo bằng phương pháp SVM có độ chính xác hơn so với cách dự báo truyền thống và thời gian tính toán sẽ giảm đi rất nhiều so với thời gian mô phỏng trên cùng 1 máy tính

- Phương pháp tổ hợp: Do có độ chính xác cao nên phương pháp dự báo mưa cực ngắn bằng AI sẽ được ưu tiên trong dự báo lượng mưa trong khoảng thời gian 3h đầu tiên. Trong khi đó, sản phẩm mô hình số trị sẽ được ứng dụng trong cảnh báo với thời gian dự báo từ 3–24h. Do vậy sự hợp nhất hai phương pháp trên với tỉ lệ phù hợp sẽ nhận được kết quả khả quan trong các giờ dự báo.



Hình 2. Sơ đồ khối dự báo mưa 3h làm đầu vào cho mô hình thủy lực.





**Hình 3.** Sơ đồ khối dự báo mưa 24h làm đầu vào cho mô hình thủy lực.

2.2.3. Phương pháp xây dựng mô hình số thủy lực để mô phỏng ngập khu vực nghiên cứu, tạo bộ số liệu đào tạo

a) Xây dựng mô hình mưa rào dòng chảy đô thị UHM

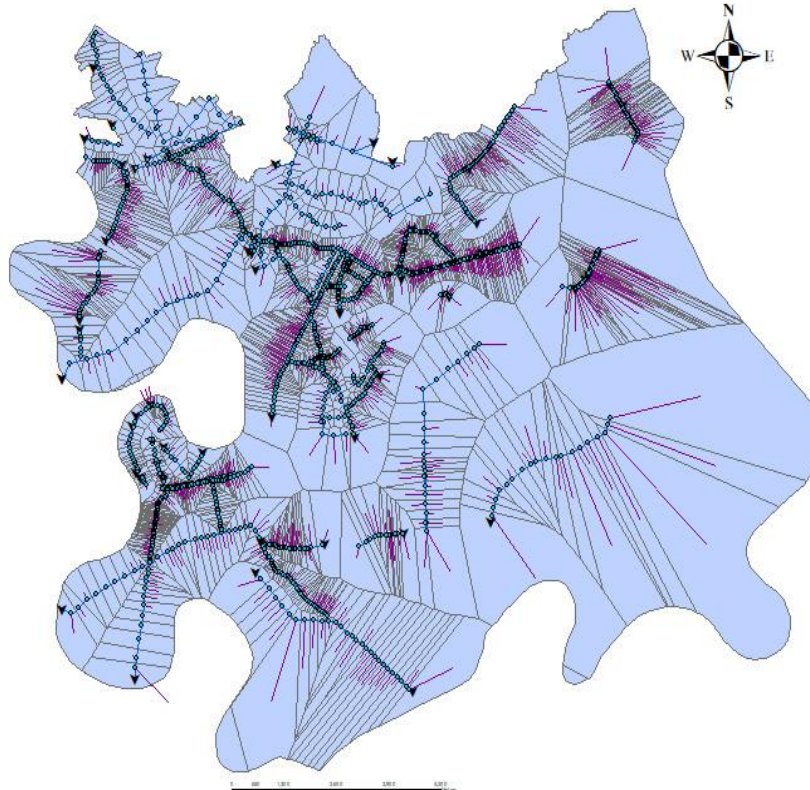
- Tiến hành xây dựng mô hình mưa đô thị, dòng chảy với các điều kiện biên, bước đầu tiên là thiết lập vị trí trạm đo mưa vào trong mô hình MIKE MOUSE bằng phương pháp UHM với 3 trạm đo mưa là Dĩ An 1, Thủ Đức và Cát Lái.

- Tiến hành phân chia các tiểu lưu vực thoát nước của khu vực TPTĐ theo giới hạn đường phân thủy và các hồ ga thoát nước. Tổng số lượng các tiểu lưu vực sử dụng trong mô hình là 1490.

- Sau khi thiết lập mô hình MIKE-UHM Nhóm nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng lại một số trận mưa trên vùng nghiên cứu. Nhưng do không có số liệu về dòng chảy tràn trên bề mặt lưu vực nên việc kiểm định mô hình này sẽ được thực hiện thông qua sự kết nối giữa mô hình MIKE-UHM với mô hình MIKE-URBAN.

b) Thiết lập mô hình dòng chảy trong hệ thống thoát nước đô thị UHM

- Sau khi đã số hóa hiện trạng hệ thống, đảm bảo dữ liệu không phát sinh lỗi và đúng hệ tọa độ quy chiếu thực tế. Kết hợp các tiểu lưu vực đã chia vào các nút thu nước cũng như các nút thoát nước ra sông và các đường công dẫn nước. Thiết lập mô hình dòng chảy trong hệ thống thoát nước đô thị UHM với vùng nghiên cứu như Hình 4.



**Hình 4.** Kết hợp hệ thống thoát nước trong MIKE URBAN.

- Hiệu chỉnh mô hình: Các thông số thường dùng để hiệu chỉnh là: độ rộng của hàm ga, đường kính cống, cũng như là kích thước cống (chiều dài và tiết diện cống), hệ số nhám Manning, hệ số tổn thất, hệ số không thấm nước của tiểu lưu vực thu nước. Qua trận mưa ngày 26/9/2016 mô hình được hiệu chỉnh các thông số sau để có kết quả phù hợp với thực tế.

**Bảng 1.** Bảng so sánh kết quả tính toán với các tuyến đường ngập khu vực Thành phố Thủ Đức trận mưa ngày 26/09/2016.

STT	Tên đường	Phạm vi ngập		Độ sâu ngập thực đo (m)	Độ sâu ngập tính toán (m)
		Từ	Đến		
1	Dương Văn Cam	SN33	Hẻm 57	0,20	0,20–0,25
2	Thảo Điền	SN19	SN29	0,20	0,18–0,22
3	Xa Lộ Hà Nội	Chân cầu Rạch Chiếc	SN408	0,25	0,20–0,30

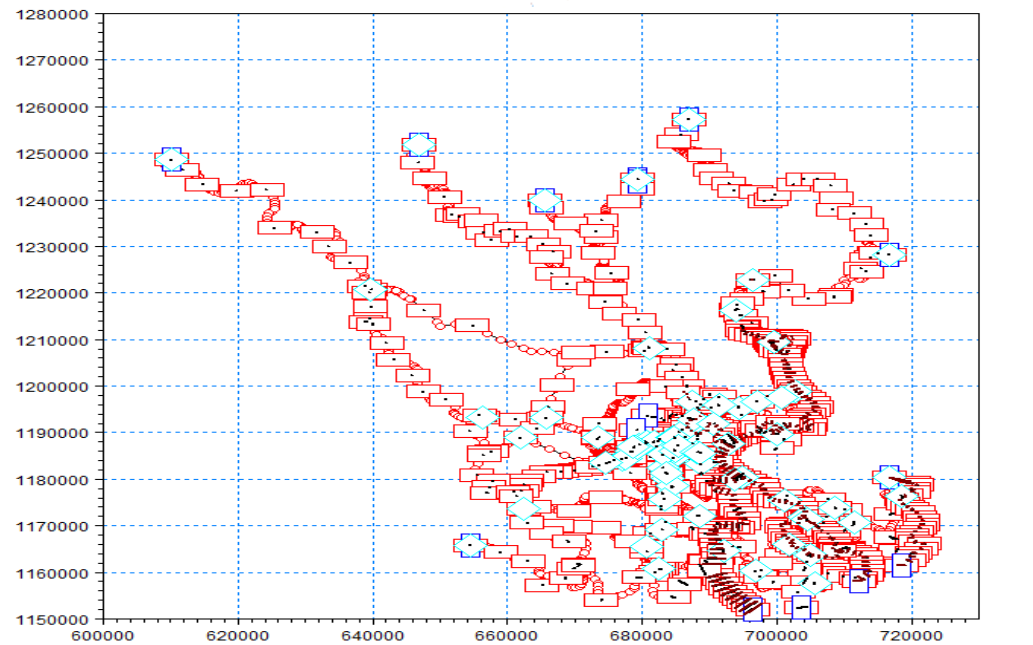
Ghi chú: SN là số nhà

- Kết quả kiểm định mô hình: Mô hình được kiểm định các thông số thông qua mô phỏng trận ngập ngày 26/9/2016, lúc 15 giờ đến 18 giờ (180 phút), đây là trận mưa rất lớn diễn ra trên diện rộng thành phố Thủ Đức với vũ lượng mưa trong khu vực nghiên cứu đạt từ 132 mm (trạm Phước Long A). kết quả cho thấy, mô hình được kiểm định các thông số để có kết quả phù hợp với thực tế

**Bảng 2.** So sánh kết quả tính toán với các tuyến đường ngập khu vực Thành phố Thủ Đức trận mưa ngày 15/09/2015.

STT	Tên đường	Độ sâu ngập thực đo (m)	Độ sâu ngập tính toán (m)
1	Kha Vạn Cân (gần chợ Thủ Đức)	0,20	0,22
2	Quốc Hương (trước cổng Đại học Văn Hóa)	0,17	0,20

c) Thiết lập mô hình thủy lực 1D phạm vi lưu vực sông Sài Gòn–Đồng Nai



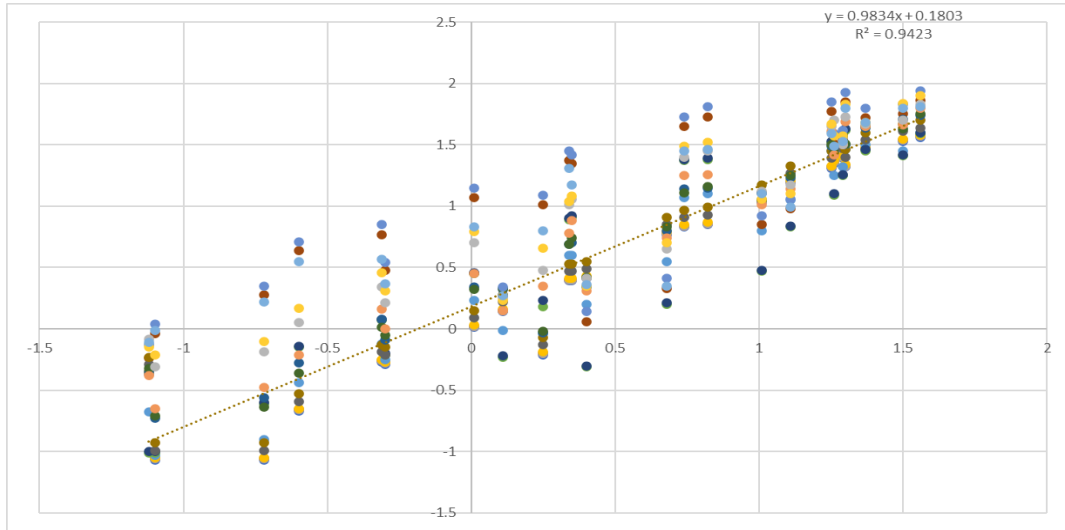
**Hình 5.** Mạng lưới sông phục vụ tính toán trong mô hình MIKE 11.

- Mạng lưới sông: được thể hiện như Hình 5, vùng hạ lưu sông Đồng Nai–Sài Gòn
- Mặt cắt sông: khoảng 1996 mặt cắt trên toàn hệ thống sông trong hạ lưu sông Đồng Nai–Sài Gòn.

- Dữ liệu biên thượng nguồn: gồm có 2 biên: lưu lượng xả ( $m^3/s$ ) tại hồ Dầu Tiếng, hồ Trị An (số liệu trung bình ngày).

- Dữ liệu biên hạ nguồn: gồm có biên mực nước: trạm Vũng Tàu và trạm Phú An (dùng để kiểm định mô hình khu vực TPTĐ) cả 2 đều là số liệu mực nước giờ.

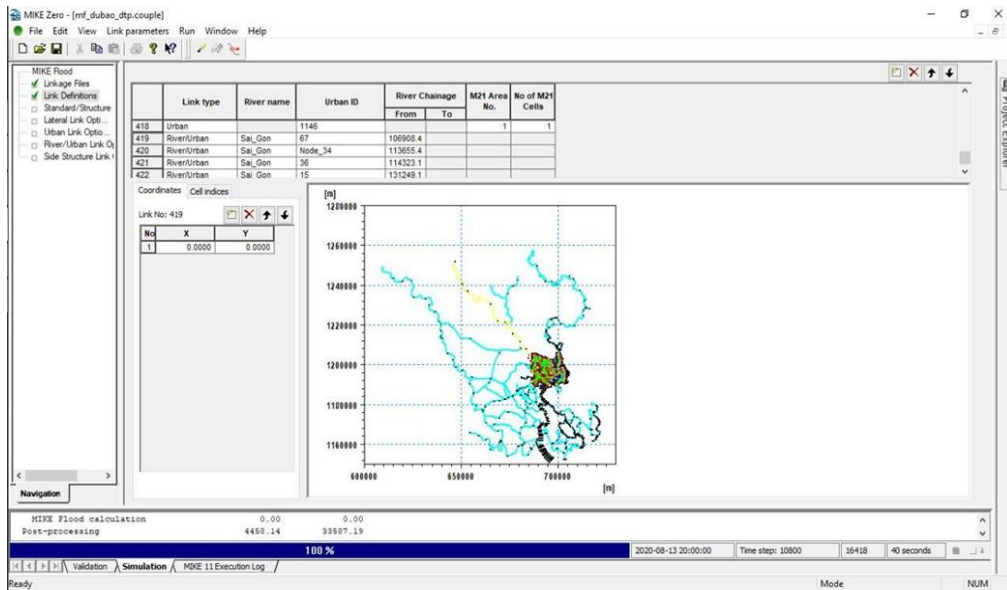
Kiểm nghiệm mô hình thủy lực 1D với số liệu đo đạc thủy văn bổ sung năm 2021: Nghiên cứu đã tiến hành kiểm định mô hình từ số liệu mực nước và lưu lượng thực đo tại 16 trạm thủy văn mà nghiên cứu đã đo đạc bổ sung. Kết quả kiểm định cho kết quả khá tốt với hệ số  $R^2 = 0,94$  (Hình 6).



**Hình 6.** So sánh mực nước mô phỏng với thực đo thời đoạn kiểm nghiệm tại các trạm TV trên sông Sài Gòn (a); tại các trạm TV trên sông Đồng Nai (b); So sánh hệ số tương quan (c) ( $R^2 = 0,94$ ).

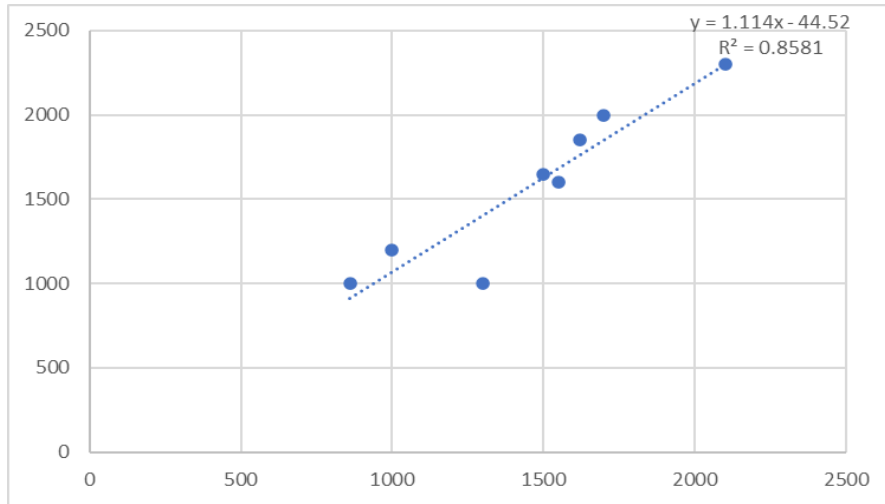
d) Thiết lập mô hình Mike Flood

Mô hình MIKE FLOOD là mô hình ghép nối trong các mô hình thủy lực mạng sông MIKE 11 và mô hình tiêu thoát nước đô thị MOUSE; mô hình hai chiều MIKE 21 HD để mô phỏng ngập (Hình 7).



**Hình 7.** Giao diện liên kết mô hình Mike Flood khu vực Thành phố Thủ Đức.

Bộ mô hình được hiệu chỉnh và kiểm định thông qua 10 trận ngập thực tế từ các tổ hợp mưa-triều khác nhau trên địa bàn TP. Thủ Đức và cho kết quả khá tốt. Trong khuôn khổ bài báo này, chỉ minh họa kết quả kiểm định trận mưa 6/8/2020 (Hình 8).

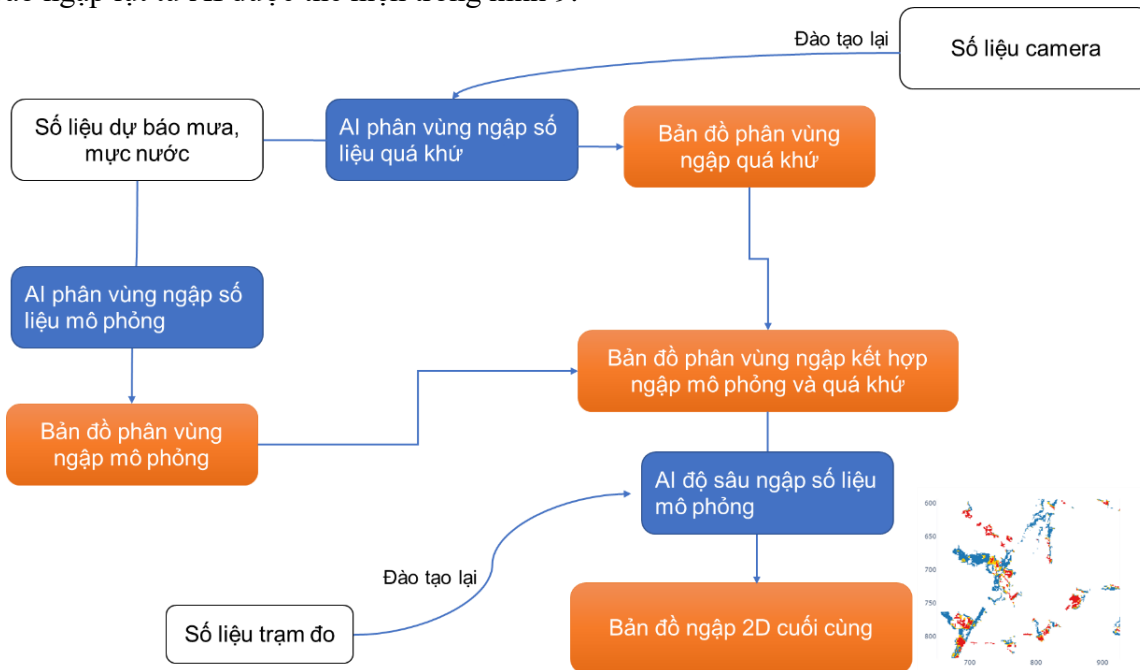


**Hình 8.** Tương quan giữa diện tích từ số liệu khảo sát và số liệu mô hình trận ngập ngày 6/8/2020.

Sử dụng bộ mô hình MIKE sau khi đã hiệu chỉnh và kiểm định, nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng ngập lụt trong quá khứ (102 trận ngập) và các kịch bản ngập lụt có thể xảy ra (1188 trận ngập), nhằm tạo bộ cơ sở dữ liệu (Bigdata) phục vụ cho máy học sau này.

**2.4. Phương pháp phát triển công cụ dự báo ngập dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo (AI)**

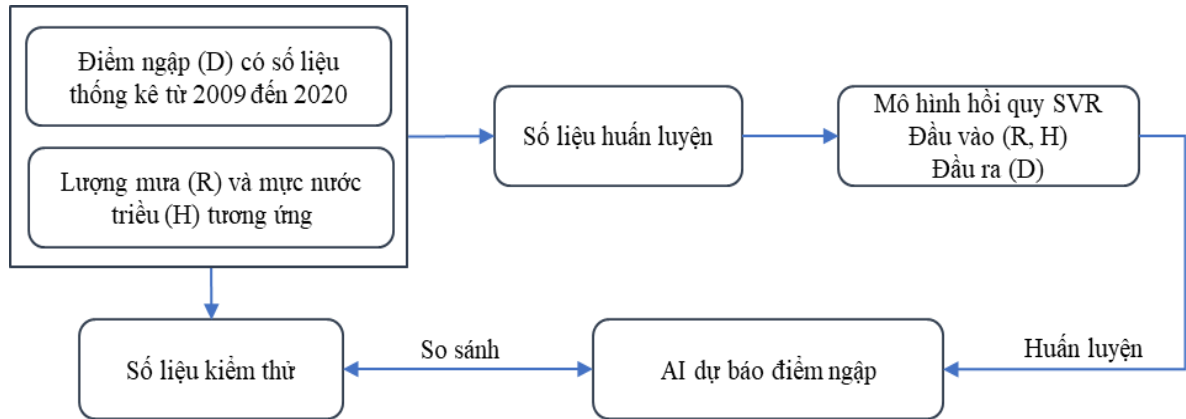
Nghiên cứu sử dụng hướng tiếp cận vừa sử dụng số liệu thống kê, vừa sử dụng bộ mô hình số để mô phỏng các kịch bản ngập lụt có thể xảy ra, từ đó lấy kết quả là bộ số liệu để đào tạo AI có thể dự báo ngập theo dạng bản đồ với yêu cầu nhanh, và có độ chính xác tăng dần theo thời gian, tức là AI có thể tự học theo các số liệu quan trắc trong tương lai. Trong nghiên cứu này sẽ sử dụng hai biến mưa và mực nước để xây dựng và đào tạo nền tảng trí tuệ nhân tạo cho hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt. Sơ đồ tổng thể xây dựng phương pháp dự báo ngập lụt từ AI được thể hiện trong hình 9.



**Hình 9.** Sơ đồ tổng thể xây dựng bản đồ ngập từ số liệu dự báo mưa, mực nước sử dụng AI.

- Xây dựng AI dự báo điểm ngập từ số liệu quá khứ được thể hiện trên hình 10.
- + Thu thập số liệu các điểm ngập từ 2009 đến 2020 và các trận mưa bình quân 3h tại các trạm đo mưa và mực nước tương ứng với thời điểm ngập;

- + Chia số liệu thành 2 bộ số liệu (1 bộ để huấn luyện, 1 bộ để kiểm thử);
- + Huấn luyện AI sử dụng mô hình huấn luyện hồi quy SVR với đầu vào là mưa, mực nước, đầu ra là độ sâu ngập tại các điểm ngập;
- + Kiểm tra so sánh AI với bộ số liệu kiểm thử.



**Hình 10.** Sơ đồ huấn luyện AI dự báo điểm ngập từ số liệu thống kê từ 2009 đến 2020.

- Đào tạo AI dự báo diện ngập từ bản đồ ngập lụt 2D (mô phỏng lại các trận ngập trong quá khứ – 102 trận ngập, từ 2009 đến 2020) (Hình 11).

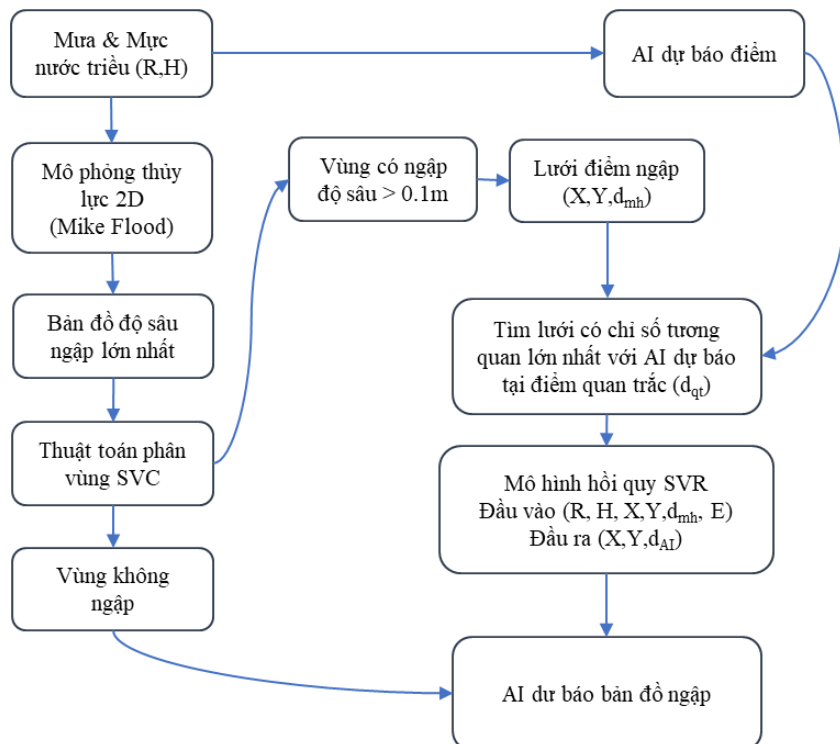
+ Sử dụng số liệu ngập lụt trong quá khứ, tiến hành mô phỏng thủy lực 2D sử dụng mô hình MIKE FLOOD đã được xây dựng, hiệu chỉnh và kiểm định.

+ Sử dụng thuật toán phân loại SVC (*Support Vector Classification*) để phân loại vùng ngập > 0,1 m và không ngập.

+ Đối với vùng ngập, tính tương quan E (sử dụng chỉ số tương quan NASH) của lưới điểm ngập với kết quả dự báo ngập sử dụng AI dự báo điểm.

+ Huấn luyện AI sử dụng mô hình huấn luyện hồi quy SVR với đầu vào là mưa, mực nước, tọa độ, độ sâu ngập từ kết quả mô hình, chỉ số tương quan đầu ra là độ sâu ngập tại các điểm ngập

+ Kiểm tra so sánh AI với bộ số liệu kiểm thử.



**Hình 11.** Sơ đồ phát triển AI dự báo ngập lụt.



- Đào tạo AI dự báo vùng ngập 2D sử dụng số liệu mô phỏng (mô phỏng các kịch bản có thể xảy ra) (Hình 12).

+ Mô phỏng các kịch bản có thể xảy ra (1188 bản đồ ngập lụt có thể xảy ra) sử dụng mô hình mô phỏng MIKE FLOOD đã được xây dựng và hiệu chỉnh.

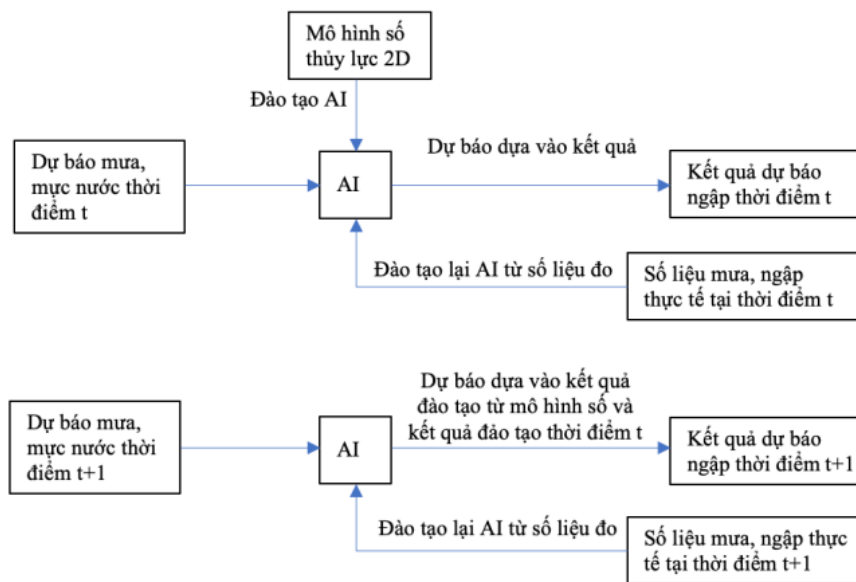
+ Trích xuất số liệu tại các vị trí trạm đo ngập trực tuyến trong vùng nghiên cứu (3 trạm đo) và tại các vị trí có camera ước lượng ngập, sau đó đào tạo AI cho các điểm này.

+ Sử dụng thuật toán phân loại SVC (*Support Vector Classification*) để phân loại vùng ngập  $> 0,1$  m và không ngập.

+ Đối với vùng ngập, tính tương quan E (sử dụng chỉ số tương quan NASH) của lưới điểm ngập với kết quả dự báo ngập sử dụng AI đã được đào tạo cho các điểm tại các vị trí trạm đo ngập trực tuyến trong vùng nghiên cứu.

+ Huấn luyện AI sử dụng mô hình huấn luyện hồi quy SVR với đầu vào là mưa, mực nước, tọa độ, độ sâu ngập từ kết quả mô hình, chỉ số tương quan đầu ra là độ sâu ngập tại các điểm ngập cho 70% số liệu từ kết quả mô phỏng (1188 kịch bản).

+ Kiểm tra so sánh AI với bộ số liệu kiểm thử.



**Hình 12.** Sơ đồ đào tạo lại AI theo thời gian sử dụng số liệu mô phỏng các kịch bản.

- Các bước tiến hành Đào tạo AI dự báo diện ngập bản đồ 2D (kết hợp số liệu mô phỏng và AI số liệu quá khứ)

a. Đọc AI dự báo ngập số liệu quá khứ từ CSDL và dự báo bản đồ phân vùng ngập

Các AI riêng biệt được đọc từ CSDL Posgressql cho hơn 7000 điểm ngập trên lưới tính toán 10m được đọc vào bộ nhớ sử dụng module pickle trong python, sau đó tiến hành dự báo cho từng điểm và cuối cùng tạo ra bản đồ ngập.

b. Đọc AI dự báo ngập số liệu mô hình MIKE từ CSDL và dự báo bản đồ ngập

Các AI riêng biệt được đọc từ CSDL Posgressql cho hơn 75000 điểm ngập trên lưới tính toán 10m được đọc vào bộ nhớ sử dụng module pickle trong python, và tạo ra bản đồ ngập.

c. Sử dụng thuật toán “flood-fill” để chập vùng ngập

Để chập 2 bản đồ ngập được tạo ra từ 02 AI, đề tài sử dụng thuật toán “flood-fill” để chập 2 bản đồ.

Flood fill là một thuật toán nhằm xác định các thành phần kết nối với nhau trong đồ thị hoặc trong một khu vực bất kì. Bằng việc tô màu những thành phần liên thông, cũng như có sự kết nối với nhau, flood fill tô màu các phần tử thuộc cùng một thành phần một màu duy nhất giúp phân biệt với các phần khác. Theo đó trong đề tài này flood-fill được sử dụng như sau:

Ứng với mỗi vị trí ngập đã được xác định từ AI quá khứ tham chiếu sang bản đồ ngập AI số liệu mô phỏng. Sử dụng “flood-fill” trên bản đồ ngập mô phỏng để tìm miền liên thông.

### 3. Kết quả và thảo luận

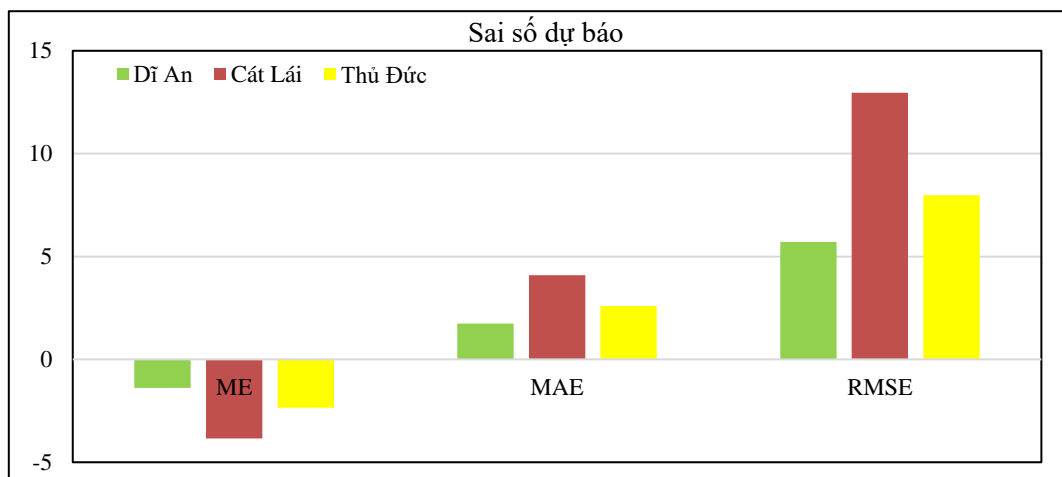
#### 3.1. kết quả dự báo mưa hạn ngắn (0–3h) thử nghiệm từ tháng 9 đến tháng 11 năm 2021

Sau khi nghiên cứu và xây dựng công cụ, nhóm tác giả đã hoàn thiện và thử nghiệm thành công cũng như đưa vào sử dụng công cụ ước lượng mưa từ số liệu radar bằng công nghệ AI. Thời gian thử nghiệm trong 3 tháng liên tục của năm 2021, đó là tháng 9, 10 và tháng 11. Khu vực thử nghiệm là thành phố Thủ Đức. Trong đó, nghiên cứu sử dụng lượng mưa dự báo và lượng mưa quan trắc tại các trạm đo mưa tự động Thủ Đức, Dĩ An và Cát Lái.

##### a) Đánh giá sai số

**Bảng 1.** Các chỉ số đánh giá tổng hợp sai số.

Chỉ số	ME	MAE	RMSE
Dĩ An	-1,39	1,75	5,71
Cát Lái	-3,84	4,09	12,96
Thủ Đức	-2,36	2,59	7,98



**Hình 13.** Các chỉ số đánh giá sai số tổng hợp.

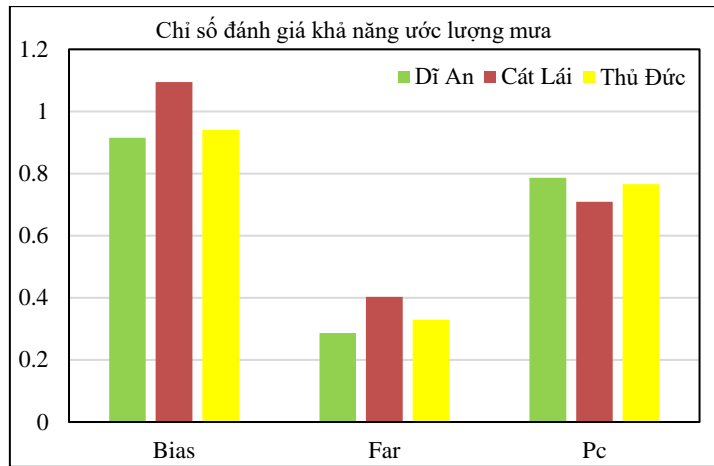
Tổng hợp các trường hợp tiến hành tính các chỉ số đánh giá, theo dõi biểu đồ trên nhận thấy:

Các giá trị  $ME < 0$ , cho thấy rằng ước lượng mưa đều nhỏ hơn so với quan trắc thực tế. Giá trị MAE dao động từ 1,75–4,09, sai số trung bình cũng không quá lớn và cũng không chênh lệch nhiều giữa các trạm, lớn nhất tại trạm Thủ Đức và nhỏ nhất là trạm Dĩ An. Giá trị RMSE của cả 3 trạm dao động từ 5,71–12,96, và chênh lệch giữa MAE và RMSE cũng không nhỏ (4–8,8) nên có thể thấy rằng ước lượng mưa ở cả 3 trạm đều có những trường hợp có sai số lớn (Hình 13).

##### b) Đánh giá khả năng ước lượng mưa

**Bảng 2.** Các chỉ số đánh giá tổng hợp khả năng ước lượng mưa.

Giá trị	H	F	M	CN	Chỉ số	Bias	Far	Pc
Dĩ An	531	282	213	1297	Dĩ An	0,92	0,28	0,79
Cát Lái	559	297	378	1089	Cát Lái	1,07	0,38	0,72
Thủ Đức	504	295	248	1276	Thủ Đức	0,94	0,33	0,77



**Hình 14.** Các chỉ số tổng hợp khả năng ước lượng mưa.

Theo dõi biểu đồ thấy rằng giá trị Bias giữa các trạm không chênh lệch nhau nhiều và đều dao động quanh giá trị 1 (từ 0,92–1,07), (Bias tối ưu = 1), do vậy mà xác suất ước lượng khá tốt, trạm Dĩ An và Thủ Đức có Bias < 1 nên ước lượng mưa số lần ít hơn so với thực tế, tuy chênh lệch là khá nhỏ; còn trạm Dĩ An có Bias > 1 nên số lần ước lượng mưa nhiều hơn thực tế nhưng cũng chênh lệch nhỏ. Giá trị Far từ 0,28–0,38 cho biết khả năng ước lượng mưa cũng không có nhiều dự báo không, khoảng chưa tới 28%–38% trên tổng số lần dự báo. Chỉ số Pc cho biết độ chính xác trong ước lượng có mưa hay không có mưa, và PC lần lượt của các trạm Dĩ An 0,79, Cát Lái 0,72, Thủ Đức là 0,77. Các giá trị Pc cũng tương đối tốt và cho thấy khả năng ước lượng chính xác mưa hay không mưa tại 3 trạm Dĩ An, Cát Lái, Thủ Đức lần lượt là 79%, 72% và 77% (Hình 14).

### 3.2. Kết quả dự báo ngập dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo (AI)

#### 3.2.1. Xây dựng AI dự báo điểm ngập từ số liệu quá khứ

a) Phân tích và chuẩn bị số liệu ngập quá khứ làm đầu vào mô hình máy học (*machine learning – ML*)

Số liệu thống kê theo từng trận mưa ngày lớn nhất tương ứng với mực nước triều ngày lớn nhất được thu thập được từ 2009 đến 2020. Số liệu này sau đó được số hóa lên bản đồ dạng shape file sau đó chuyển thành dạng ảnh tif với độ phân giải 10m (X: 2016 điểm Y: 1745 điểm) trong đó có hơn 7000 điểm ngập, còn lại là các điểm không ngập trên lưới tổng cộng hơn 3 triệu điểm.

Các bản đồ và số liệu độ sâu ngập được đọc vào mảng numpy 3 chiều trong python bao gồm: Mảng 3 chiều X bao gồm: Mưa, Mực nước, tọa độ XY trên lưới; Mảng 2 Chiều Y: là độ sâu ngập tương ứng với mưa, mực nước và tọa độ được gán lại nhãn (Hình 15).

b) Các bước đào tạo mô hình máy học

Sau khi đã chuẩn bị số liệu các bước tiến hành đào tạo mô hình sử dụng ngôn ngữ lập trình python và thư viện Scikit-learn cho các thuật toán đào tạo ML như sau:

1. Chuẩn hóa số liệu đầu vào sử dụng hàm:

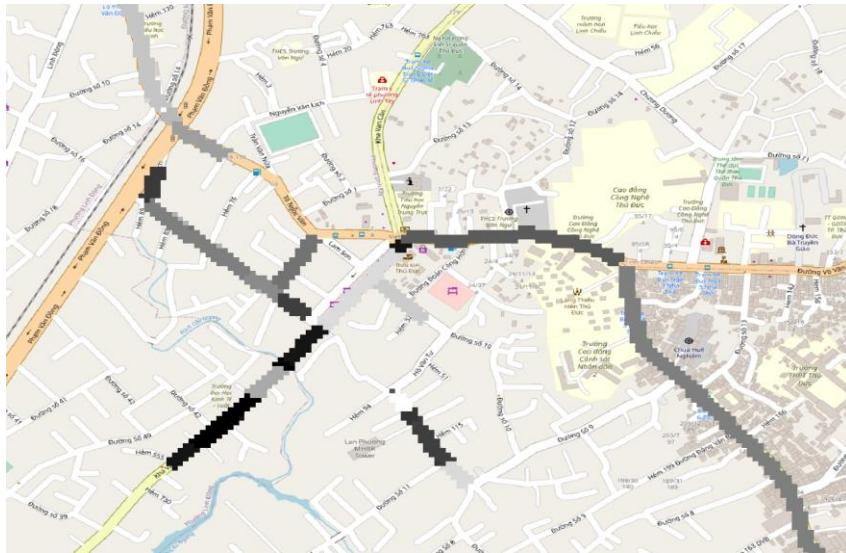
$$z = (x_i - u)/s$$

Trong đó u là giá trị trung bình; x là giá trị thứ  $x_i$ ; s là độ lệch chuẩn của số liệu.

2. Chia bộ số liệu ngẫu nhiên thành 2 bộ là bộ đào tạo và 01 kiểm thử với tỉ lệ 80% đào tạo và 20% kiểm thử.

3. Chạy các thuật toán đào tạo.

Trong nghiên cứu tiến hành chạy các thuật toán đào tạo phân loại cho 7000 điểm ngập trên lưới 2D và chạy kiểm tra với 9 thuật toán nhằm lựa chọn ra thuật toán đào tạo tối ưu nhất bao gồm: “Nearest Neighbors”, “SVM”, “Gaussian Process”, “Decision Tree”, “Random Forest”, “Neural Network”, “AdaBoost”, “Naive Bayes”, “LDA”.



**Hình 15.** Các đoạn đường ngập được số hoá thành điểm lưới ngập ảnh geotiff.

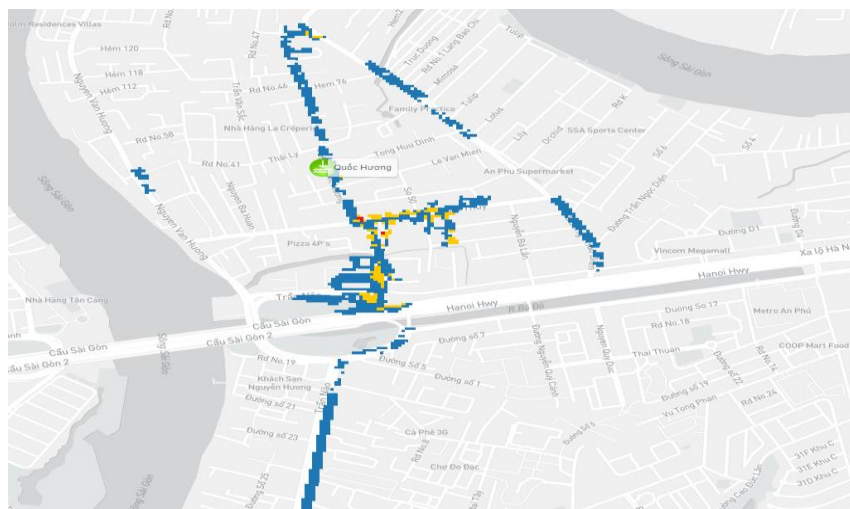
c) Kết quả đào tạo AI

Kết quả tổng hợp của các thuật toán đào tạo được thể hiện trong bảng dưới. Kết quả cho thấy các chỉ số đào tạo của các hầu hết các thuật toán mô hình là khá tốt trong đó mô hình RF là cho kết quả tốt nhất với độ chính xác của dự báo lên đến 0,91. Do vậy đề xuất sử dụng thuật toán RF làm thuật toán chính để xây dựng AI dự báo điểm ngập từ số liệu quá khứ.

**Bảng 3.** Bảng thống kê kết quả đào tạo ML của các thuật toán.

Thuật toán	Precision	Recall	f1-score	Độ chính xác (accuracy)
AB	0,74	0,620	0,67	0,82
DT	0,82	0,727	0,76	0,85
GP	0,81	0,803	0,80	0,78
KNN	0,76	0,713	0,73	0,87
NB	0,79	0,727	0,75	0,84
NN	0,75	0,747	0,74	0,85
LDA	0,71	0,733	0,71	0,86
RF	0,73	0,673	0,70	0,91
SVM	0,88	0,823	0,85	0,84

Minh họa kết quả dự báo phân loại ngập từ mưa–mức nước được thể hiện trên hình 16.



**Hình 16.** Một số kết quả phân loại vùng ngập theo lưới điểm mực nước 1,5 m, lượng mưa 80 mm.

### 3.2.2. Đào tạo AI dự báo vùng ngập 2D sử dụng số liệu mô phỏng

#### a) Xử lý số liệu ngập mô phỏng làm đầu vào mô hình ML

Các giản đồ ngập định dạng mô hình MIKE theo các kịch bản đã được xây dựng, chạy mô phỏng và lưu trong CSDL từ kết quả của nội dung 7 được chuyển thành dạng lưới điểm ngập độ phân giải 10m dạng ảnh geotiff (X: 2016 điểm Y: 1745 điểm) với tổng cộng 3,517,920 điểm lưới. Các lưới điểm và số liệu độ sâu ngập được đọc vào mảng numpy 3 chiều trong python bao gồm:

- Mảng 3 chiều X bao gồm: Mưa, Mực, tọa độ XY trên lưới.

- Mảng 2 Chiều Y: là độ sâu ngập tương ứng với mưa, mực nước (hơn 1000 độ sâu ngập khác nhau tại hơn 70000 điểm ngập trên lưới 10m).

#### b) Các bước đào tạo mô hình ML

Sau khi đã chuẩn bị số liệu các bước tiến hành đào tạo mô hình sử dụng ngôn ngữ lập trình python và thư viện Scikit-learn cho các thuật toán đào tạo.

ML như sau:

##### 1. Chuẩn hóa số liệu đầu vào sử dụng hàm

$$z = (x_i - u)/s$$

Trong đó u là giá trị trung bình; x là giá trị thứ xi; s là độ lệch chuẩn của số liệu.

2. Chia bộ số liệu ngẫu nhiên thành 2 bộ là bộ đào tạo và 01 kiểm thử với tỉ lệ 80% đào tạo và 20% kiểm thử.

##### 3. Chạy các thuật toán đào tạo.

Trong nghiên cứu tiến hành chạy các thuật toán đào tạo hồi quy cho 70 000 điểm ngập trên lưới 2D và chạy kiểm tra với 9 thuật toán nhằm lựa chọn ra thuật toán đào tạo tối ưu nhất bao gồm: “*Nearest Neighbors*”, “*SVM*”, “*Gaussian Process*”, “*Decision Tree*”, “*Random Forest*”, “*Neural Network*”, “*AdaBoost*”, “*Naive Bayes*”, “*LDA*”.

#### c) Kết quả đào tạo các thuật toán

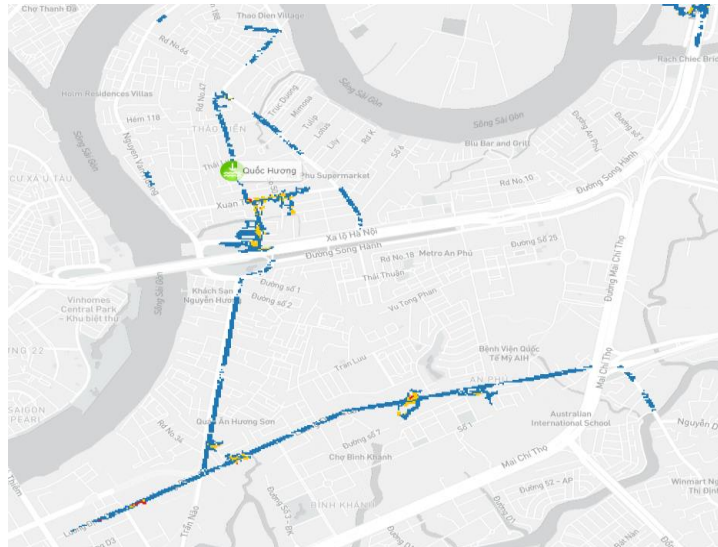
Kết quả phân bố độ chính xác đào tạo của các điểm trên lưới được thể hiện trong bảng và hình vẽ phân bố cho thấy thuật toán RF, NN và AB cho kết quả tốt nhất với nhiều điểm có kết quả chính xác cao hơn. Phân bố cũng cho thấy hầu hết các thuật toán đều có các điểm dị biệt với độ chính xác thấp dưới 0,8. Tuy nhiên, số lượng điểm dị biệt này không nhiều nếu so sánh trên tổng số các điểm đã đào tạo.

**Bảng 4.** Bảng kết quả đánh giá độ chính xác của các thuật toán đào tạo theo phân bố số lượng điểm theo chỉ số R<sup>2</sup>.

Số lượng điểm	1	1	1	4	2	20	47	129	449	35559
R <sup>2</sup> AB	0,07	0,16	0,26	0,35	0,44	0,54	0,63	0,72	0,81	0,91
Số lượng điểm	1	2	9	11	31	59	90	189	995	34826
R <sup>2</sup> DT	0,37	0,43	0,49	0,56	0,62	0,68	0,75	0,81	0,87	0,94
Số lượng điểm	855	1086	1153	1514	1913	2461	3317	5066	8320	10528
R <sup>2</sup> GP	0,0001	0,0995	0,199	0,298	0,398	0,497	0,597	0,696	0,796	0,895
Số lượng điểm	4	1	17	22	47	155	362	971	3321	31313
R <sup>2</sup> KNN	0,03	0,13	0,23	0,32	0,42	0,51	0,61	0,7	0,8	0,9
Số lượng điểm	580	494	524	542	639	821	1287	2433	4307	24586
R <sup>2</sup> LDA	0	0,101	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,799	0,899
Số lượng điểm	11	20	19	28	43	74	130	310	1375	34203
R <sup>2</sup> NB	0,03	0,13	0,22	0,32	0,42	0,51	0,61	0,71	0,81	0,9
Số lượng điểm	3	0	1	5	10	30	69	183	520	35392
R <sup>2</sup> NN	0,14	0,23	0,31	0,4	0,48	0,57	0,66	0,74	0,83	0,91
Số lượng điểm	1	0	2	9	7	45	71	163	627	35288
R <sup>2</sup> RF	0,44	0,49	0,55	0,61	0,66	0,72	0,78	0,83	0,89	0,94
Số lượng điểm	114	128	248	330	515	733	1069	1916	6523	24637
R <sup>2</sup> SVM	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,59	0,69	0,79	0,89







**Hình 18.** Vùng ngập lượng mưa 40 mm, mực nước 1,5 m.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng được bộ cơ sở dữ liệu khá lớn (Bigdata) phục vụ cho máy học tại thời điểm nghiên cứu và sau này; xây dựng được hệ thống dự báo, cảnh mưa lớn trên cơ sở đồng hóa dữ liệu và AI để dự báo mưa cực ngắn từ số liệu ra đa thời tiết; dự báo mực nước tự động và ngập lụt bằng AI tại TP.HCM, khu vực lân cận và đã được thử nghiệm trong 3 tháng 9,10 và 11 của năm 2021 trên địa bàn Thành phố Thủ Đức, với kết quả khá tốt (hệ số  $R^2 > 0,8$ ), hệ thống hoạt động đồng bộ, tự động, ổn định và sẽ được hoàn thiện có độ chính xác ngày càng tốt hơn dựa trên nền tảng công nghệ AI.

**Đóng góp của tác giả:** Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: L.N.Q.; N.V.H.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: L.N.Q., N.V.H., Đ.Q.T.; Xử lý số liệu: L.Đ.Q., N.P.Đ., N.T.C., Đ.H.H., N.M.D.; Viết bản thảo bài báo: N.V.H.; Chỉnh sửa bài báo: L.N.Q.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

#### Tài liệu tham khảo

1. Campanella, T.J. Urban Resilience and the Recovery of New Orleans. *J. Am. Plann. Assoc.* **2006**, 72(2), 141–146.
2. Cigler, B.A. “The “Big Questions” of Katrin and the 2005 Great Flood of New Orleans”. Public Administration Review, Harrisburg, Pennsylvania State University, 2007.
3. Doocy, S.; Daniels, A.; Murray, S.; Kirsch, T.D. The Human Impact of Flood. A Historical Review of Events 1980-2009 and Systematic Literature Review. *PLOS Currents Disasters*, 2013.
4. Dutta, D. An integrated tool for assessment of flood vulnerability of coastal cities to sea-level rise and potential socio-economic impacts: a case study in Bangkok–Thailand. *Hydrol. Sci. J.* **2011**, 56(5), 805–823.
5. Messner, F.; Edmund, P.R.; Green, C.; Meyer, V.; Tunstall, van der Veen, S.A. Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods. FLOODsite, Report number: T09–06–01, 2007.
6. Hallegatte, S.; Green, C.; Nicholls, R.J.; Corfee-Morlot, J. Future flood losses in major coastal cities. *Nat. Clim. Change* **2013**, 3, 802–806.
7. Liao, K.H. A theory on Urban Resilience to Floods–A basis for alternative planning

- practices. *Resilience Alliance* **2012**, 17(4), 48.
8. Sato, T.; Nakasu, T. Typhoon Flood Disasters in Metro Manila. National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, No. 45, 2011.
  9. World Bank, Thai Flood: Rapid Assessment for Resilient Recovery and Reconstruction Planning. Washington, 2012.
  10. <https://tuoitre.vn/nhat-ban-phat-trien-he-thong-du-bao-ngap-do-mua-20190521074147697.htm>
  11. <https://kenhthoietiet.vn/an-do-bat-tay-voi-google-su-dung-ai-du-bao-va-canh-bao-som-lu-lut-114830/>
  12. Kouziokas, G.N. The application of artificial intelligence in public administration for forecasting high crime risk transportation areas in urban environment. *Transp. Res. Procedia* **2017**, 24, 467–473. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.083>.
  13. Kouziokas, G.N.; Chatzigeorgiou, A.; Perakis, K. Predicting Environmental Data in Public Management by Using Artificial Intelligence. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference eRA–11, Piraeus, Greece: Piraeus University of Applied Sciences, 2016, pp. 39–46.
  14. Long, H.P. Biến đổi khí hậu cục bộ và vấn đề ngập lụt đô thị ở Thành phố Hồ Chí Minh. Kỷ yếu Hội nghị Khoa học và Công nghệ lần thứ 11, ngày 21–23/10/2009.
  15. Sâm, L. Nghiên cứu đề xuất các giải pháp chống ngập cho Tp. Hồ Chí Minh. Báo cáo tổng hợp kết quả khoa học công nghệ đề tài cấp nhà nước, TP.HCM, 2011.
  16. Bảo, L.X.; Công, M.V. Đánh giá rủi ro kinh tế do ngập lụt, ứng dụng cho Dự án chống ngập khu vực Thành phố Hồ Chí Minh giai đoạn 1. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường* **2016**, 55, 55–72.
  17. Lanh, Đ.T. Quản lý tổng hợp lưu vực và sử dụng hợp lý tài nguyên nước lưu vực hệ thống sông Đồng Nai. Chương trình KHCN trọng điểm cấp nhà nước, 2010.
  18. Dũng, N.Đ. Ngập lụt tại TP. Hồ Chí Minh: Hướng tiếp cận “mềm”. *Tạp chí Quy hoạch Đô thị số 4*, 2011.
  19. Kim, N.Q. Nghiên cứu giải pháp tổng thể kiểm soát ngập lụt vùng hạ lưu sông Đồng Nai – Sài Gòn và các vùng lân cận. Đại học Thủy lợi, 2013.
  20. Hưng, N.V. Điều tra khảo sát và đánh giá thiệt hại do ngập lụt đến kinh tế – xã hội; xây dựng bản đồ thiệt hại do ngập lụt phục vụ công tác chống ngập, quy hoạch đô thị trên địa bàn Thành phố Hồ Chí Minh. Đài Khí tượng thủy văn khu vực Nam Bộ, 2021.
  21. Phi, H.L. Urban Flood in Ho Chi Minh City: Causes and Management Strategy. *Constr. Plann. J.* **2013**, 63, 26–29.

## **Research, build and test the urban flood early warning system based on artificial intelligence in Ho Chi Minh City**

**Le Ngoc Quyen<sup>1</sup>, Nguyen Viet Hung<sup>2\*</sup>, Do Tan Long<sup>2</sup>, Le Đình Quyet<sup>1</sup>, Nguyen Phuong Dong<sup>3</sup>, Dang Quang Thanh<sup>4</sup>, Le Manh Dung<sup>1</sup>, Nguyen Thi Thu Thao<sup>2</sup>, Huynh Thi Phuong Trang<sup>2</sup>, Do Hong Hoat<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Southern Regional Hydrometeorological Center; quyentccb@gmail.com, quyet.le74@gmail.com

<sup>2</sup> Ho Chi Minh City Technical Infrastructure Management Center; nguyenvietthungtv@gmail.com, longdt.ttcn@hochiminhcity.gov.vn, nguyenthao.goden@gmail.com, tranghuynhla1995@gmail.com

<sup>3</sup> Sub-Institute of Meteorology, Hydrology and Southern Climate Change; nguyenphuongdongkttv@gmail.com

<sup>4</sup> DHI Vietnam Co., Ltd; tqd@dhigroup.com

**Abstract:** Currently, there are quite a number of forecasting tools in the field of hydrometeorology that can be applied to simulation and prediction of urban flooding. However, most of these software are usually commercial software, single without synchronization. On the other hand, the forecasting and warning of heavy rain and flooding in Ho Chi Minh City (HCMC) has not yet been linked into the system, so the time to send the warning bulletin about heavy rain and flooding is delayed, not enough, reliability and slow interaction with people. Meanwhile, the application of AI in flood forecasting is also being researched and put into practice in many major cities around the world. This article introduces the construction of a flood early warning system in Ho Chi Minh City on the basis of the application of information technology on the basis of GIS (geographic information system) and application of the intellectual foundation artificial intelligence (AI) to ensure timely and accurate flood forecasting and warning, in the direction of short-term forecasts to proactively prevent and respond to floods, share information on the database using common to the City, allowing authorities and residents to conveniently access real-time flood warning information in HCMC.

**Keywords:** AI; Inundation warning system; HCM city; MIKE URBAN; MIKE FLOOD.

Bài báo khoa học

## Nghiên cứu biến đổi của một số đặc trưng mưa trong mùa mưa khu vực Nam Bộ

Đặng Thị Lan Anh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Đài Khí tượng Thủy văn tỉnh Bến Tre, Đài Khí tượng Thủy văn Khu vực Nam Bộ, Tổng cục Khí tượng Thủy văn, Bộ Tài Nguyên và Môi trường; lananhkttv@gmail.com

\*Tác giả liên hệ: lananhkttv@gmail.com; Tel.: +84–976072839

Ban Biên tập nhận bài: 12/1/2023; Ngày phản biện xong: 26/2/2023; Ngày đăng bài: 25/3/2023

**Tóm tắt:** Nghiên cứu này đánh giá lại sự thay đổi đối với một số đặc trưng mưa trong mùa mưa ở Nam Bộ trong giai đoạn gần đây (1996–2021) gồm mùa mưa, lượng mưa, lượng mưa ngày lớn nhất, số ngày mưa, số ngày mưa vừa và lớn... Nghiên cứu sử dụng phương pháp thống kê, tính xu thế và phương pháp tuyến tính được sử dụng để tổng hợp số liệu mưa ngày quan trắc tại 21 trạm khí tượng đại diện cho 19 tỉnh, thành và 2 đảo ở Nam Bộ. Kết quả nghiên cứu thể hiện sự phân bố không gian của các đặc trưng mưa, phân tích chênh lệch giữa các năm ENSO và tất cả các năm, làm tiền đề khoa học, kiến thức thực địa và khí hậu đặc trưng khu vực nhằm nâng cao năng lực dự báo, xây dựng kế hoạch cơ sở Khoa học.

**Từ khóa:** Đặc trưng mưa; Nam bộ; ENSO.

### 1. Đặt vấn đề

Những yếu tố khí tượng chính được đề cập trong hầu hết các công trình nghiên cứu là nhiệt độ và lượng mưa. Riêng về các nghiên cứu liên quan đến mưa bao gồm đặc điểm khí hậu, phân bố mưa, xu thế biến đổi, biến động hàng năm được đề cập trong rất nhiều công trình nghiên cứu trên thế giới đối các nghiên cứu ở mỗi quốc gia.

Liên quan đến ENSO về nghiên cứu biến động hàng năm lượng mưa: [1] đã nghiên cứu rằng thay đổi lượng mưa giữa các năm chịu ảnh hưởng của ENSO hầu hết các khu vực ở Philippines. [2] nghiên cứu chu kỳ khí hậu năm năm trung bình của lượng mưa Thái Lan và liên hệ với trường hoàn lưu khí quyển. [3] nghiên cứu sự phát triển của ENSO liên hệ với dị thường lượng mưa trên khu vực Đông Nam Á và mối liên hệ của nó với những thay đổi của khí quyển đại dương trên khu vực Indonesia. [4] tiến hành nghiên cứu phân bố lượng mưa mùa trên khu vực gió mùa Đông Á.

Gió mùa liên quan đến đặc trưng mưa: [5] sử dụng chuỗi số liệu mưa trung bình 5 ngày từ 1975–1987 để xác định thời điểm bắt đầu và kết thúc trung bình của mưa mùa hè trên bán đảo Đông Dương. [6] đã có những nghiên cứu về các đặc trưng mưa ảnh hưởng bởi gió mùa Thái Bình Dương–Châu Á bằng cấu trúc không gian– thời gian. [7] đã nghiên cứu thay đổi không gian và thời gian trên khu vực Philippines bị ảnh hưởng bởi gió mùa mùa hè.

Xu thế biến đổi các đặc trưng mưa: [8] đã nghiên cứu xu thế thay đổi dựa trên xu thế Sen và kiểm nghiệm Man–Kandal. [9] cũng đã điều tra ở Trung Quốc về xu thế mưa cho các mùa trong năm với chuỗi số liệu 47 năm từ năm 1961–2007. [10] đã điều tra các xu thế của đặc trưng lượng mưa cực trị. [10] thiết lập các vùng mưa ở khu vực gió mùa Đông Á bằng phương pháp phân cụm và phân cấp đồng nhất. [11] đã nghiên cứu ở Thái Lan về lượng mưa cực đại.

Ở trong nước, [12–13] đã nghiên cứu về thời tiết, khí hậu, môi trường và kinh tế xã hội ở Việt Nam bị tác động bởi các năm ENSO. [14] đã nghiên cứu về các hiện tượng khí hậu



cực đoan tác động, ảnh hưởng đến toàn cầu. [15] đã xác định xu thế biến đổi của lượng mưa ngày cực đại và sử dụng số liệu lượng mưa ngày tại các trạm quan trắc ở bảy vùng khí hậu Việt Nam giai đoạn 1961–2007. [16] đã dự tính Việt Nam biến đổi mùa mưa vào cuối thế kỷ 21 bằng mô hình NHRCM. [17] đã phân tích chuẩn sai, phân tích tỉ lệ phần trăm nghiên cứu tính toán biến động mưa. [18] đã đánh giá xu thế biến đổi 7 yếu tố khí tượng bằng phương pháp kiểm nghiệm phi tham số Mann–Kendall và xu thế Sen trong giai đoạn 1961–2007. [19] cho thấy trong giai đoạn 1958–2018, lượng mưa năm tính trung bình cả nước có xu thế tăng.

Có thể nói, cho đến nay các nghiên cứu về đặc trưng mưa một cách đồng bộ và khá phong phú, công trình nghiên cứu ngoài nước và trong nước, phần đa đều là các công trình nghiên cứu trong thời kỳ dài và phạm vi quy mô cả nước, ít công trình nghiên cứu chi tiết cho tiểu vùng, thời kỳ ngắn và đó cũng là mục đích của nghiên cứu này.

## 2. Phương pháp nghiên cứu và dữ liệu sử dụng

### 2.1. Giới thiệu khu vực nghiên cứu

Khu vực Nam Bộ có khí hậu đặc trưng phân hóa theo mùa và chế độ mưa–âm phù hợp với mùa gió. Mùa khô (ít mưa) khoảng từ tháng XII tới tháng III năm sau. Mùa mưa trùng với gió mùa mùa đông vốn là nguồn gió tín phong trong khoảng từ tháng XII tới tháng IV. Mùa mưa khoảng từ tháng V đến tháng XI, trùng với gió mùa mùa hè mang lại những khối không khí nhiệt đới và xích đạo nóng ẩm với những nhiễu động khí quyển thường xuyên, hướng gió không đồng nhất tùy thuộc vào vị trí và trong khoảng thời gian từ tháng V đến tháng XI. Lượng mưa hàng năm dao động khoảng từ 2000–2500 mm [12].

Với một số hình thế gây mưa chính như: Gió mùa tây nam thiết lập và ổn định, trục rãnh thấp có hướng bắc–nam, dải hội tụ nhiệt đới đơn thuần, không có bão hoặc ATNĐ–Bão hoặc áp thấp nhiệt đới ảnh hưởng trực tiếp đến Nam Bộ và gió mùa tây nam mạnh kết hợp với bão hoặc áp thấp nhiệt đới cùng với dải hội tụ nhiệt đới tồn tại trên Biển Đông [17, 20], sóng gió đông [17] làm cho mùa mưa ở Nam Bộ có sự phân bố không gian rõ rệt liên quan đến vị trí tương đối của từng nơi so với vùng núi lân cận. Khu vực có lượng mưa cao là Miền Đông Nam Bộ, gần cao nguyên Trung Bộ và phần cực Tây Nam Bộ (Kiên Giang) gần dãy núi Con Voi (Campuchia). Mục tiếp theo sẽ giới thiệu về phương pháp và dữ liệu được dùng trong nghiên cứu.

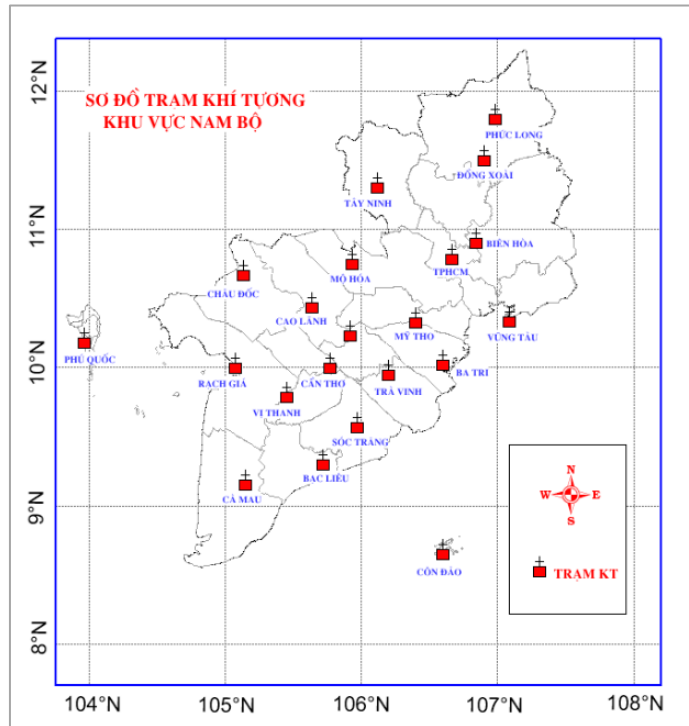
### 2.2. Số liệu thu thập

Số liệu quan trắc mưa ở Nam Bộ hầu hết có sau năm 1979 khi Miền Nam hoàn toàn giải phóng. Bộ số liệu đầy đủ nhất được lưu trữ từ năm 1984 đến nay, tuy nhiên mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá sự biến đổi của một số đặc trưng mưa trong mùa mưa tại hai thập kỷ gần đây, do vậy nghiên cứu đánh giá chính chỉ tập trung vào số liệu mưa ngày từ năm 1996 đến năm 2021 (26 năm). Số liệu được kế thừa từ các công trình nghiên cứu và được tổng hợp từ Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ nên các sai số thô đã được kiểm tra cùng với mạng lưới 21 trạm quan trắc đại diện cho 19 tỉnh, thành và 2 đảo ở khu vực Nam Bộ, Danh sách các trạm được liệt kê trong Bảng 1 và Hình 1.

**Bảng 1.** Danh sách các trạm khí tượng được sử dụng trong nghiên cứu.

TT	Tỉnh	Trạm	Vĩ độ	Kinh độ	Yếu tố	Thời gian
1	An Giang	Châu Đốc	10.70	105.13	Lượng mưa ngày	1996–2021
2	Bạc Liêu	Bạc Liêu	9.33	105.72	Lượng mưa ngày	1996–2021
3	Bến Tre	Ba Tri	10.05	106.60	Lượng mưa ngày	1996–2021
4	Bình Dương	Đồng Xoài	11.53	106.90	Lượng mưa ngày	1996–2021
5	Bình Phước	Phước Long	11.83	106.98	Lượng mưa ngày	1996–2021
6	Cà Mau	Cà Mau	9.18	105.15	Lượng mưa ngày	1996–2021
7	Cần Thơ	Cần Thơ	10.03	105.77	Lượng mưa ngày	1996–2021
8	Đồng Tháp	Cao Lãnh	10.47	105.63	Lượng mưa ngày	1996–2021

TT	Tỉnh	Trạm	Vĩ độ	Kinh độ	Yếu tố	Thời gian
9	Đồng Nai	Biên Hòa	10.92	106.82	Lượng mưa ngày	1996–2021
10	Hậu Giang	Vị Thanh	9.82	105.45	Lượng mưa ngày	1996–2021
11	Kiên Giang	Rạch Giá	10.00	105.07	Lượng mưa ngày	1996–2021
12	Phú Quốc	Phú Quốc	10.22	103.97	Lượng mưa ngày	1996–2021
13	Long An	Mochoa	10.78	105.93	Lượng mưa ngày	1996–2021
14	Sóc Trăng	Sóc Trăng	9.60	105.97	Lượng mưa ngày	1996–2021
15	Tây Ninh	Tây Ninh	11.33	106.12	Lượng mưa ngày	1996–2021
16	Tiền Giang	Mỹ Tho	10.35	106.40	Lượng mưa ngày	1996–2021
17	Tp.HCM	Tân Sơn Hòa	10.82	106.67	Lượng mưa ngày	1996–2021
18	Trà Vinh	Càng Long	9.98	106.20	Lượng mưa ngày	1996–2021
19	Vĩnh Long	Vĩnh Long	10.27	105.92	Lượng mưa ngày	1996–2021
20	Vũng Tàu	Vũng Tàu	10.37	107.08	Lượng mưa ngày	1996–2021
21	Côn Đảo	Côn Đảo	8.68	106.60	Lượng mưa ngày	1996–2021



Hình 1. Sơ đồ trạm Khí tượng khu vực Nam Bộ được sử dụng trong nghiên cứu.

### 2.3. Phương pháp nghiên cứu

#### 2.3.1. Phương pháp tính toán đặc trưng thống kê

Các công thức tính toán các đặc trưng thống kê được trình trong tài liệu “Các phương pháp thống kê trong khí tượng, khí hậu” [21]. Ở đây xin phép được trình bày một số công thức tính toán đặc trưng thống kê được bài báo sử dụng phân tích.

+ Tính tổng lượng mưa năm, hoặc mùa mưa

$$X = \sum_{i=1}^n x_i \tag{1}$$

Trong đó: X là tổng lượng mưa có số liệu quan trắc  $\{x_i, i = 1, n\}$ .

+ Trung bình các đặc trưng mưa; lượng mưa, lượng mưa ngày cực đại, số ngày mưa lớn,...

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{2}$$

+ Công thức phương sai

$$D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \tag{3}$$

+ Công thức tính độ lệch chuẩn

$$S_x = \sqrt{D_x} \tag{4}$$

+ Ngày bắt đầu và kết thúc

Trong nghiên cứu sẽ tính ngày bắt đầu và kết thúc mùa mưa bằng phương pháp [22] gọi tắt là Z2002, xác định ngày bắt đầu mùa mưa là ngày có mưa trung bình trượt 5 ngày thỏa mãn 2 tiêu chí sau:

- Chỉ số mưa ngày của lượng mưa kéo dài 5 ngày liên tiếp và lớn hơn 5mm/ngày.
- Ít nhất 10 ngày với lượng mưa ngày lớn hơn 5 mm/ngày trong 20 ngày liên tiếp.

Nghiên cứu đã tính toán ngày bắt đầu và kết thúc theo phương pháp trên dựa theo biến trình năm của lượng mưa hàng năm. Hiệu số giữa ngày bắt đầu và kết thúc mùa mưa là thời kỳ kéo dài mùa mưa, luận văn gọi là độ dài mùa mưa (DD).

### 2.3.2. Phương pháp tính xu thế

Tính toán xu thế Sen và kiểm nghiệm Mann–Kandall:

a) Trong R statistica, gói CRAN về xác định thế Sen, phiên bản 2.2 và kiểm nghiệm Mann–Kendall [23] trường Đại học Canada.

b) Một phiên bản phần mềm khác cũng có thể áp dụng dễ dàng áp dụng, nó được viết dưới dạng Visual Basic cài vào Excel và thực hiện tính toán tương tự như một hàm trong Excel của Thống kê thời gian thực “*Real Statistics Using Excel*”.

### 2.3.3. Phương pháp tuyến tính

+ Lập phương trình xu thế biến đổi

Lập phương trình xu thế theo phương pháp bình phương tối thiểu

$$\begin{aligned} x_t &= b_0 + a_1 t & (5) \\ a_1 &= \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(t - \bar{t})}{\sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2}; \quad b_0 = \bar{x} - a_1 \bar{t} \end{aligned}$$

Các đặc trưng thu được từ phương trình xu thế bao gồm: Tốc độ xu thế  $a_1$ ; Góc xu thế  $b_0$ ; Mức tăng hay giảm trong thời kỳ nghiên cứu  $D = a_1 \times n$ .

+ Hệ số tương quan theo thời gian  $r_{xt}$

$$r_{xt} = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(t - \bar{t})}{[\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

+ Đánh giá độ tin cậy của hệ số tương quan

Độ tin cậy của r được kiểm nghiệm bằng giả thiết  $H_0: H_0: r = 0$

Hệ số tương quan với dung lượng mẫu n được coi là đáng kể khi thỏa mãn tiêu chuẩn tương ứng với  $\alpha = 0,05, 0,01$  và  $0,1$ . Việc đánh giá độ tin cậy của r dựa trên sự so sánh hai giá trị t theo công thức t và  $t_\alpha$  thường được tra bảng theo phân bố Student hoặc có thể tính thông qua hàm TINV (tiêu chuẩn  $\alpha$ ,  $n-2$  bậc tự do) của Excel.

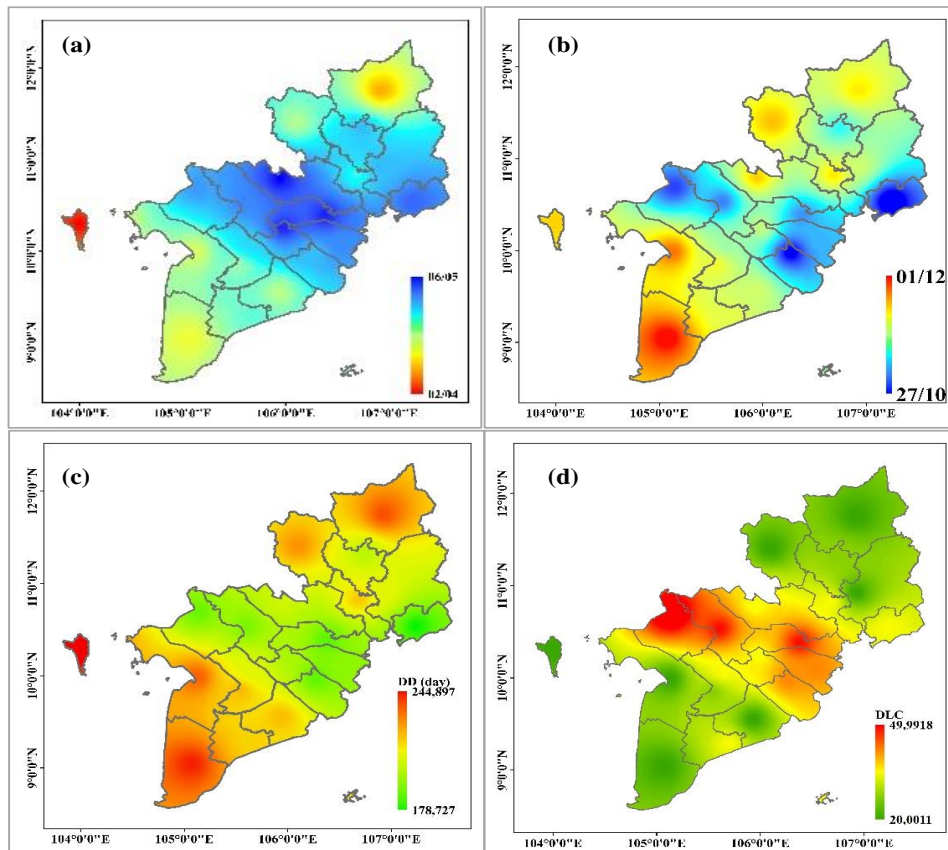
## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Kết quả đánh giá mùa mưa ở Nam Bộ

Trên cơ sở biến trình mưa theo ngày của các năm đã tính toán ngày bắt đầu và kết thúc mùa mưa hàng năm, dựa theo chỉ số mưa ngày với trung bình trượt 5 ngày liên tiếp lớn hơn 5 mm. Kết quả về ngày bắt đầu, kết thúc, thời gian kéo dài mùa mưa và độ lệch chuẩn của độ dài mùa mưa được thể hiện ở Hình 1.

Phần đa các trạm ở khu vực Nam Bộ có thời kỳ bắt đầu mùa mưa trong tháng 4. Mặc dù vậy, phân bố mùa mưa theo không gian có sự khác biệt trên từng vị trí. Khu vực bắt đầu mùa mưa sớm hơn, khoảng từ đầu tháng 4 đến khoảng giữa tháng 4 tập trung ở các tỉnh Kiên Giang, Cà Mau, Bạc Liêu, Sóc Trăng và khu vực tỉnh Tây Ninh, Bình Phước. Điều này có thể do sự ảnh hưởng của địa hình đến điều kiện mưa. Vì vậy, Phú Quốc bắt đầu mùa mưa sớm so với TBNN khoảng từ ngày 02/04. Khu vực trung tâm bắt đầu mùa mưa muộn hơn,

khoảng từ giữa tháng 4 đến đầu tháng 5 bao gồm các tỉnh An Giang, Đồng Tháp, Long An, Bến Tre, Trà Vinh, Cần Thơ và Vũng Tàu (Hình 1a).



**Hình 2.** Phân bố không gian của ngày bắt đầu (a), kết thúc mùa mưa (b), độ dài mùa mưa DD (c) và độ lệch chuẩn của DD (d).

Phân bố ngày kết thúc mùa mưa cũng khá tương tự như ngày bắt đầu mùa mưa, kết thúc mùa mưa muộn hơn vào khoảng từ giữa đến cuối tháng 11 và kết thúc mùa mưa sớm hơn khoảng đầu tháng 11 đến giữa tháng 11 (Hình 1b).

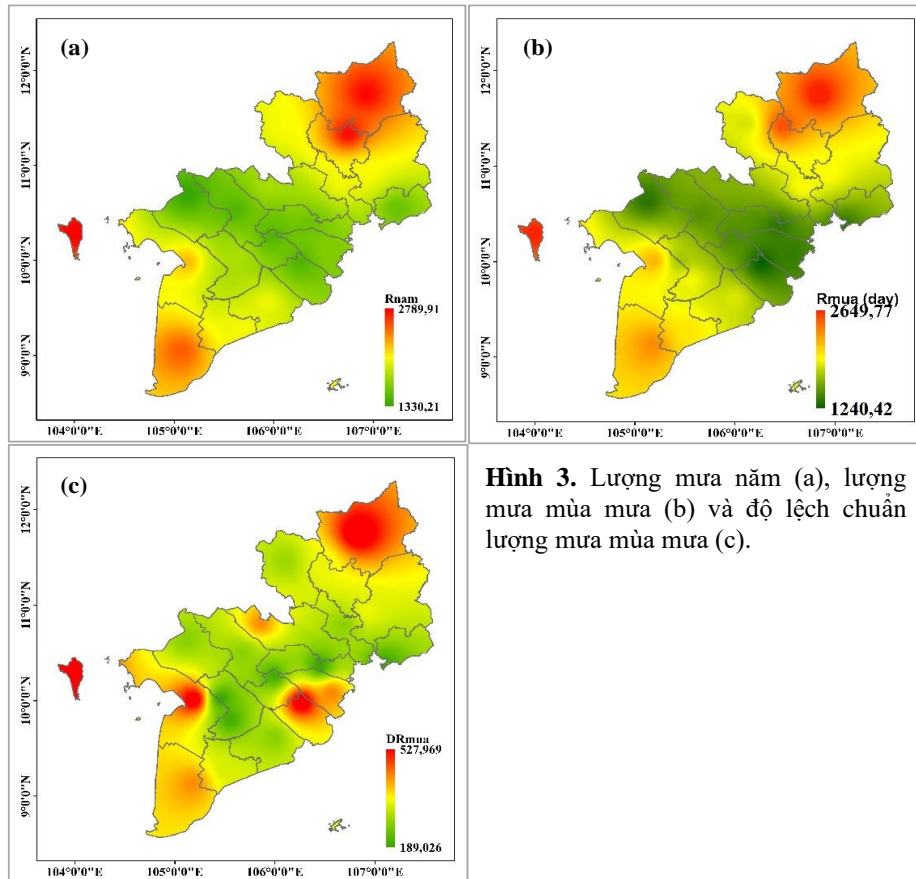
Thời gian kéo dài mùa mưa (độ dài mùa mưa) dao động trong khoảng từ 176–241 ngày (tương đương khoảng từ 6 tháng đến 8 tháng). Thời gian kéo dài mùa mưa khoảng 7 tháng tập trung ở khu vực có ngày bắt đầu mùa mưa sớm và kết thúc mùa mưa muộn. Thời gian kéo dài mùa mưa khoảng 5–7 tháng tập trung ở trung tâm Nam Bộ và Vũng Tàu (Hình 1c).

Ngược lại với phân bố độ dài mùa mưa, độ lệch chuẩn ở các trạm có độ dài mùa mưa ngắn hơn với giá trị khoảng 38–55 ngày (khoảng 1–1,5 tháng) và thấp hơn với giá trị từ 20–38 ngày (khoảng 0,5–1 tháng). Điều này cho thấy ở những vị trí có thời gian mùa mưa kéo dài ít biến động hơn so với vùng có thời gian mùa mưa ngắn hơn.

### 3.2. Phân bố lượng mưa và số ngày mưa

Kết quả phân bố về lượng mưa năm, mùa mưa, độ lệch chuẩn của lượng mưa trong mùa mưa được thể hiện trong hình 3. Đối với lượng mưa trung bình năm, khu vực tỉnh Bình Phước khoảng 2500–2700 mm, lượng mưa trung bình năm vào khoảng 1800–2200 mm tập trung các tỉnh Tây Ninh, Bình Dương, Đồng Nai, lượng mưa trung bình năm thấp nhất khu vực là tỉnh Vũng Tàu khoảng 1400–1500 mm. Khu vực có lượng mưa trung bình năm cao là Phú Quốc, Cà Mau khoảng từ 2000–2700 mm. Lượng mưa trung bình năm khu vực Kiên Giang, Cần Thơ, Sóc Trăng, Bạc Liêu khoảng 1800–2000 mm. Khu vực có lượng mưa trung bình năm thấp khoảng 1400–1600 mm tập trung các tỉnh An Giang, Đồng Tháp, Vĩnh Long, Bến Tre, Tiền Giang, Long An (Hình 3a).





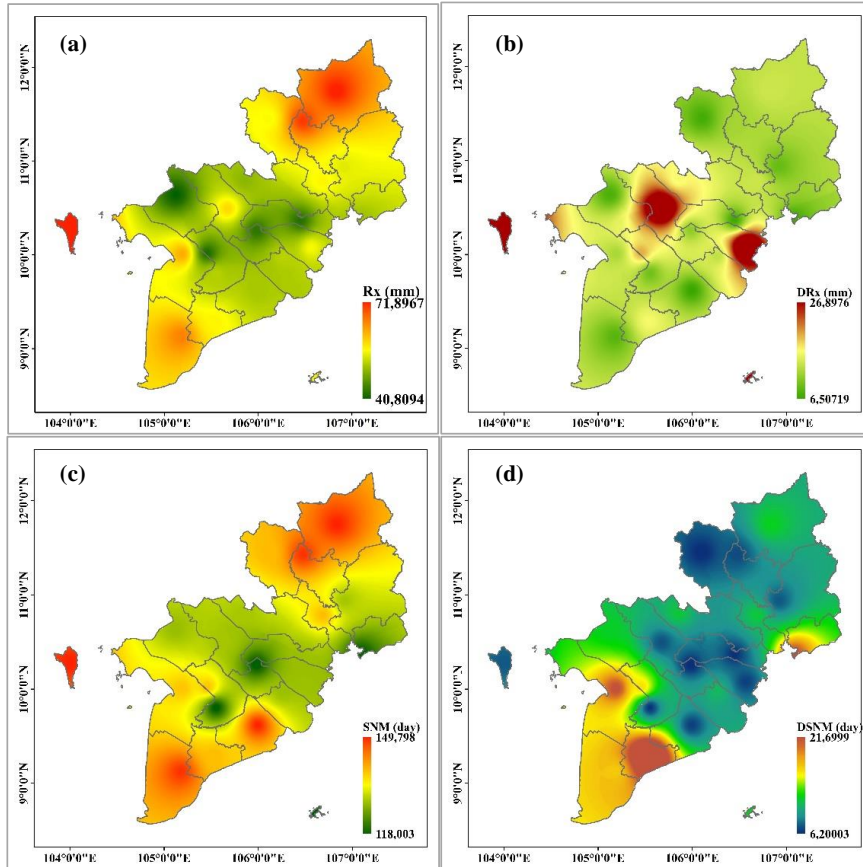
**Hình 3.** Lượng mưa năm (a), lượng mưa mùa mưa (b) và độ lệch chuẩn lượng mưa mùa mưa (c).

Về phân bố không gian của lượng mưa, mùa mưa cũng khá tương tự lượng mưa trung bình năm, lượng mưa trung bình mùa mưa chiếm từ 90–97% lượng mưa cả năm. Đây là sự khác biệt phân bố mưa ở Nam Bộ, lượng mưa trung bình cao ở cực Nam và Bắc, thấp ở trung tâm Nam Bộ (Hình 3b). Giá trị độ lệch chuẩn của lượng mưa trung bình mùa mưa dao động từ 176–616 mm. Một số trạm có sự biến động lượng mưa trung bình năm cao; độ lệch chuẩn cao hơn các trạm khác như Phú Quốc, An Giang, Phước Long khoảng 500–600 mm (Hình 3c).

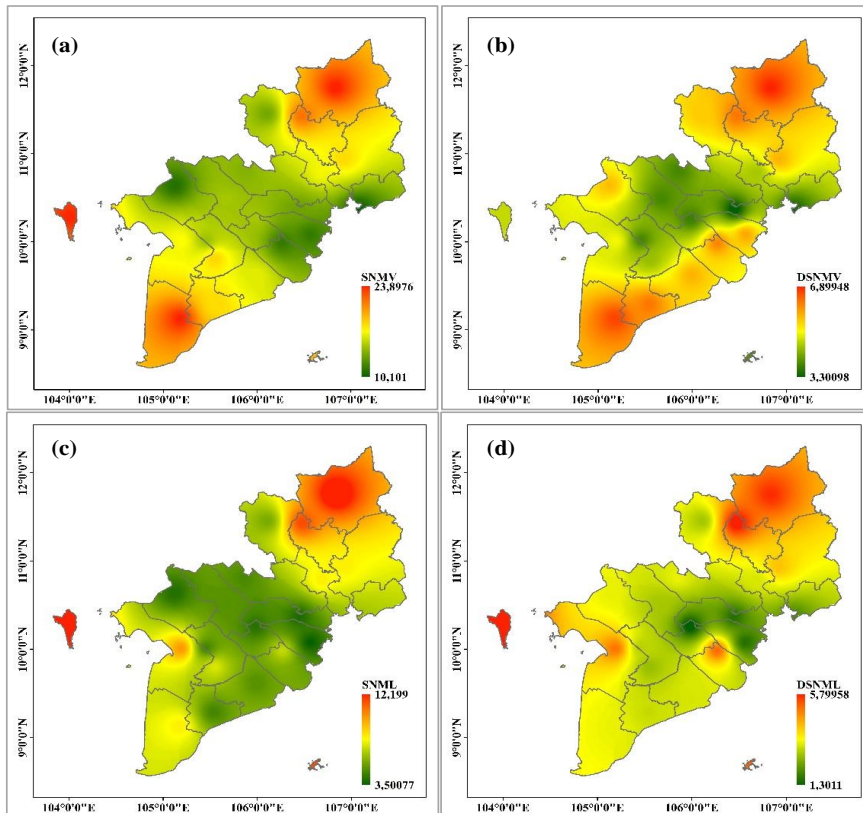
Ở hình 4, thể hiện kết quả tính toán lượng mưa ngày lớn nhất (Rx) trung bình trong tháng mùa mưa, tổng số ngày mưa trong mùa mưa (SNM được định nghĩa là ngày mưa có lượng  $\geq 0,1$  mm), độ lệch chuẩn của Rx và của SNM trong mùa mưa, SNM phân bố khá đồng nhất trên khu vực Nam Bộ. Biến động của Rx ít có sự khác nhau trong không gian theo từng vị trí, độ lệch chuẩn cao với giá trị khoảng 22–26 mm tập trung các trạm Phú Quốc, Cao Lãnh, Ba Tri, các trạm còn lại Rx phổ biến khoảng từ 10–18 mm. Biến động của SNM theo không gian cũng tương đối đồng nhất trên các vị trí, tương tự giống phân bố của độ lệch chuẩn của Rx, độ lệch chuẩn khoảng 15 ngày đến 21 ngày tập trung các trạm Phú Quốc, Ba Tri, Cao Lãnh, các trạm còn lại dao động trong khoảng từ 6–12 ngày.

Cực trị SNMV không chỉ tập trung vào mùa mưa mà còn tập trung vào vị trí có lượng mưa năm lớn được thể hiện ở Hình 5a. Khu vực phía bắc–đông bắc và phía Nam–Tây nam có SNMV cao nhất khoảng 17–24 ngày/mùa mưa. Trong khi đó vùng trung tâm Nam Bộ, phần lớn các trạm có SNMV thấp hơn khoảng 10 đến 14 ngày/mùa mưa tập trung từ Châu Đốc, Cao Lãnh cho đến Ba Tri, Vũng Tàu. Độ lệch chuẩn của số ngày mưa vừa cũng có xu thế cao hơn trong vị trí có SNMV cao, thấp hơn trong vị trí có lượng mưa năm thấp dao động trong khoảng từ 3 đến 7 ngày (Hình 5b). Hình 5c cho thấy SNML cũng tập trung vào mùa mưa và vị trí nơi có lượng mưa năm lớn cũng như số ngày mưa vừa, trị số dao động trong khoảng từ 3,0 đến 12,1 ngày/mùa mưa. Độ lệch chuẩn của số ngày mưa lớn mùa mưa cũng có xu thế cao hơn ở những vị trí có SNML cao, thấp hơn ở nơi có lượng mưa năm thấp dao động trong khoảng từ 2,85 đến 5,61 ngày.





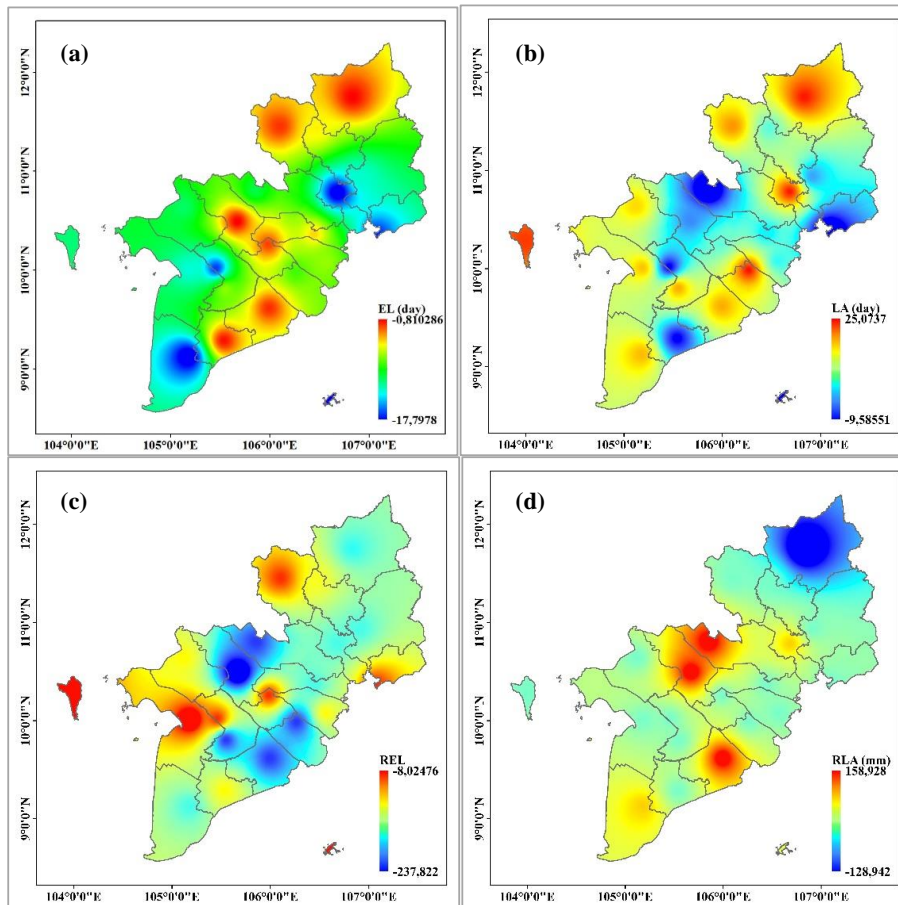
**Hình 4.** Phân bố của lượng mưa ngày lớn nhất (Rx) trung bình (a), độ lệch chuẩn của Rx (b), số ngày mưa (SNM) trong mùa mưa (c) và độ lệch chuẩn của SNM (d).



**Hình 5.** Phân bố SNMV và độ lệch chuẩn SNMV (a, b) và phân bố SNML và độ lệch chuẩn SNML (c, d).

### 3.3. Phân bố mùa mưa trong năm ENSO

Hình 6a–6b cho thấy kết quả tính toán chênh lệch độ dài mùa mưa (thời gian kéo dài của mùa mưa) của năm El Nino và La Nina so với tất cả các năm, độ dài mùa mưa ngắn hơn so với trung bình của tất cả các năm trong các năm El Nino. Ngược lại, mùa mưa dài hơn trong năm xảy ra hiện tượng La Nina. Chênh lệch âm giữa năm El Nino và trung bình tất cả các năm chiếm tỉ lệ 90% trong 21 trạm ở Nam Bộ với trị số chênh lệch từ  $-0,9$  đến  $-17$  ngày (chênh lệch giữa TBNN các năm ENSO và TBNN tất cả các năm) ngoại trừ Vũng Tàu và Châu Đốc. Ngược lại, năm La Nina với tất cả các năm cho chênh lệch dương (chiếm 76% trong 21 trạm) từ 1,9 ngày đến 25,3 ngày. Cho thấy, mùa mưa bắt đầu muộn hơn và kết thúc sớm hơn so với với trung bình tất cả các năm trong năm La Nina và trong năm El Nino có độ dài mùa mưa ngắn hơn so với năm La Nina và tất cả các năm.



**Hình 6.** Chênh lệch độ dài mùa mưa giữa những năm El Nino (a) và La Nina (b) và tất cả các năm. Chênh lệch lượng mưa mùa mưa các năm El Nino và La Nina và tất cả các năm (c, d).

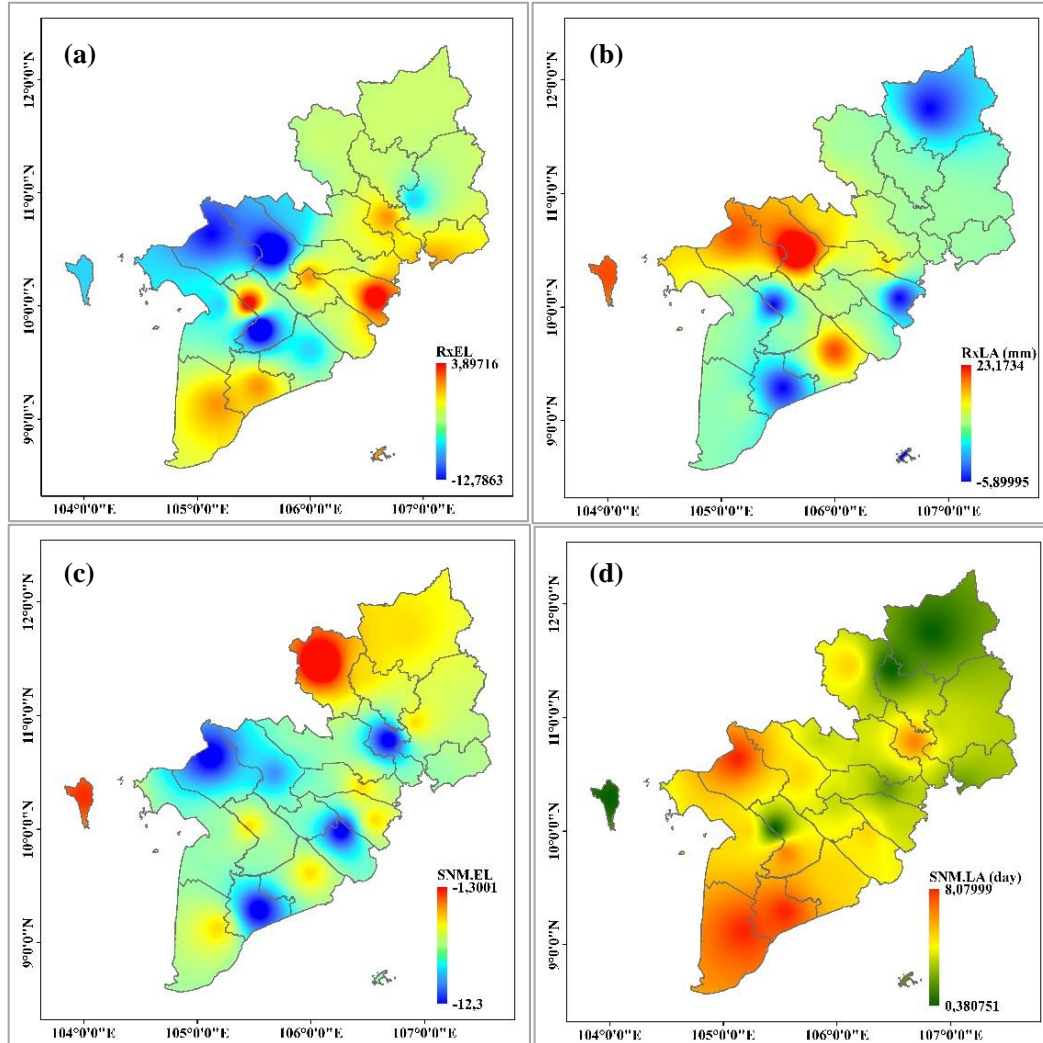
### 3.4. Phân bố lượng mưa mùa mưa năm ENSO

Mối quan hệ của các năm ENSO và mùa mưa như đã trình bày ở mục trên. Để thấy được rõ hơn điều này, nghiên cứu tiếp tục phân tích phân bố biến đổi lượng mưa trong những năm El Nino, La Nina và tất cả các năm. Kết quả được thể hiện ở Hình 6c,d.

Các năm El Nino và trung bình tất cả các năm cho chênh lệch âm, lượng mưa mùa mưa thể hiện rõ ràng ở Nam Bộ với trị số khoảng từ  $-5,9$  đến  $-238,3$  mm. Một số trạm như Phú Quốc, Sóc Trăng, Vị Thanh, Rạch Giá, Cao Lãnh, Mộc Hóa và Trà Vinh có chênh lệch âm cao hơn từ  $-193,4$  mm đến  $-241,2$  mm. Các trạm chênh lệch thấp như Côn Đảo, Vũng Tàu, Tây Ninh và Cần Thơ khoảng  $-8,3$  mm đến  $-54,7$  mm. Nhìn chung, đồng bằng Nam Bộ tương đối bằng phẳng theo không gian và ENSO là hiện tượng ảnh hưởng trên qui mô lớn, nên ảnh hưởng lượng mưa ở Nam Bộ được thể hiện khá phổ biến trên phần lớn các trạm trong

các năm El Nino, mặc dù có sự khác biệt ít nhiều về giá trị chênh lệch, nhưng không thấy rõ phân bố có tính quy luật trong từng vị trí theo không gian (Hình 6c).

Ngoại trừ Côn Đảo và Phước Long, trong năm La Nina có chênh lệch dương trên phần lớn các trạm với trị số dao động từ 16,1 mm đến 158,8 mm, trạm Mộc Hóa và Cao Lãnh, Sóc Trăng có chênh lệch dương cao với trị số khoảng 158,8 mm. Dường như các trạm này khá nhạy cảm với hiện tượng ENSO, dẫn đến có chênh lệch âm trong các năm El Nino và chênh lệch dương trong các năm La Nina. Cũng giống như những năm El Nino, chênh lệch lượng mưa trong năm La Nina không thể hiện rõ thành các vùng, riêng hai trạm có chênh lệch âm, điều này có thể là lượng mưa không cao vào chính pha La Nina và có thể được thể hiện trở lại so với pha La Nina (Hình 6d) (chiếm 80,9% số trạm).



**Hình 7.** Chênh lệch Rx trung bình mùa mưa giữa các năm El Nino (a), La Nina (b) và tất cả các năm. Và chênh lệch số ngày mưa TBNN mùa mưa trung bình mùa mưa giữa các năm El Nino (c), La Nina (d) và tất cả các năm.

Dường như ENSO ảnh hưởng đến hầu hết các đặc trưng mưa ở Nam Bộ. Trong các năm El Nino, xu thế mưa của Rx thấp hơn so với tất cả các năm. Chênh lệch âm khoảng  $-2\text{mm}$  đến  $-13\text{mm}$  trên phần lớn số trạm (chiếm tỉ lệ 70% số trạm), ngoại trừ các trạm Cà Mau, Bạc Liêu, Cần Thơ, Ba Tri, Vũng Tàu, HCM có trị số không cao và cho kết quả chênh lệch dương khoảng 0,58 đến 4,01 mm (Hình 7a). Ngược lại, những năm La Nina trên phần lớn các trạm (chiếm 81% số trạm) có chênh lệch dương. Các trạm có chênh lệch dương cao như Phú Quốc, Cao Lãnh, Châu Đốc khoảng 13,8 mm đến 24,5 mm (Hình 7b). Cho thấy lượng mưa trung bình trong các năm ENSO chịu ít ảnh hưởng của tính địa phương hơn so với Rx.

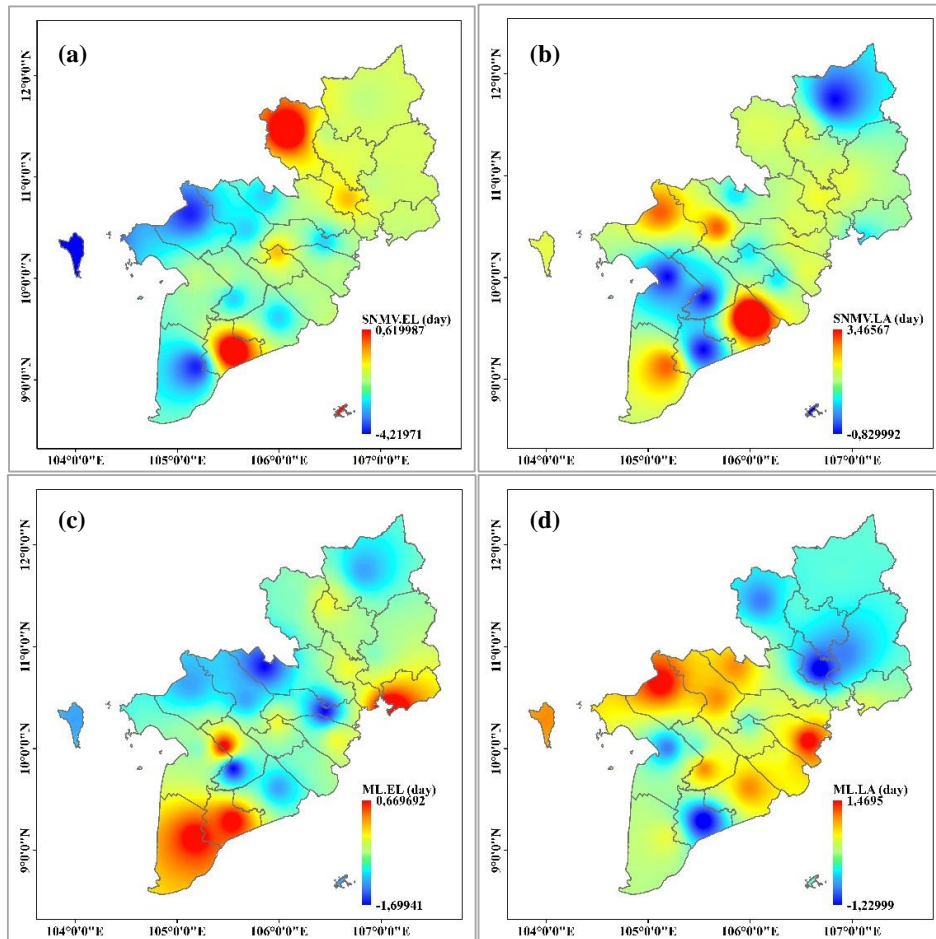


### 3.5. Phân bố xu thế của SNM, SNMV và SNML trong năm ENSO

SNM chênh lệch thấp hơn so với những năm El Nino và tất cả các năm trong mùa mưa, với trị số khoảng từ -1,8 đến -12,9 ngày. Một số trạm như Châu Đốc, Sóc Trăng, Cao Lãnh, Trà Vinh và TPHCM (Tân Sơn Hòa) có sự chênh lệch âm cao hơn khoảng -10,8 đến -12,4 ngày. Trạm Tây Ninh, Phú Quốc có chênh lệch thấp hơn (Hình 7c).

Trong năm La Nina xu thế SNM cao được thể hiện rất nhất quán trên tất cả các trạm. Chênh lệch dương từ 0,41 ngày đến 7,89 ngày giữa năm La Nina và tất cả các năm phổ biến cao hơn đáng kể với trị số chênh lệch khoảng 7,0-8,1 ngày ở các trạm Châu Đốc, Cà Mau, Sóc Trăng, Cần Thơ và TPHCM. Một số trạm như Phú Quốc, Phước Long, Đồng Xoài và Cà Mau (Hình 7d) có chênh lệch dương thấp hơn.

Phân bố xu thế số ngày mưa vừa, mưa lớn trong các năm ENSO, đồng nghĩa với mối quan hệ giữa các năm ENSO đến hiện tượng mưa có khả năng gây ảnh hưởng lớn, là yếu tố được quan tâm nhiều trong những năm qua. Chênh lệch lượng mưa ngày từ 24,8-51,4 mm trong SNMV (số ngày có trong các tháng mùa mưa giữa năm El Nino, La Nina và tất cả các năm) được thể hiện ở Hình 8a-8b.

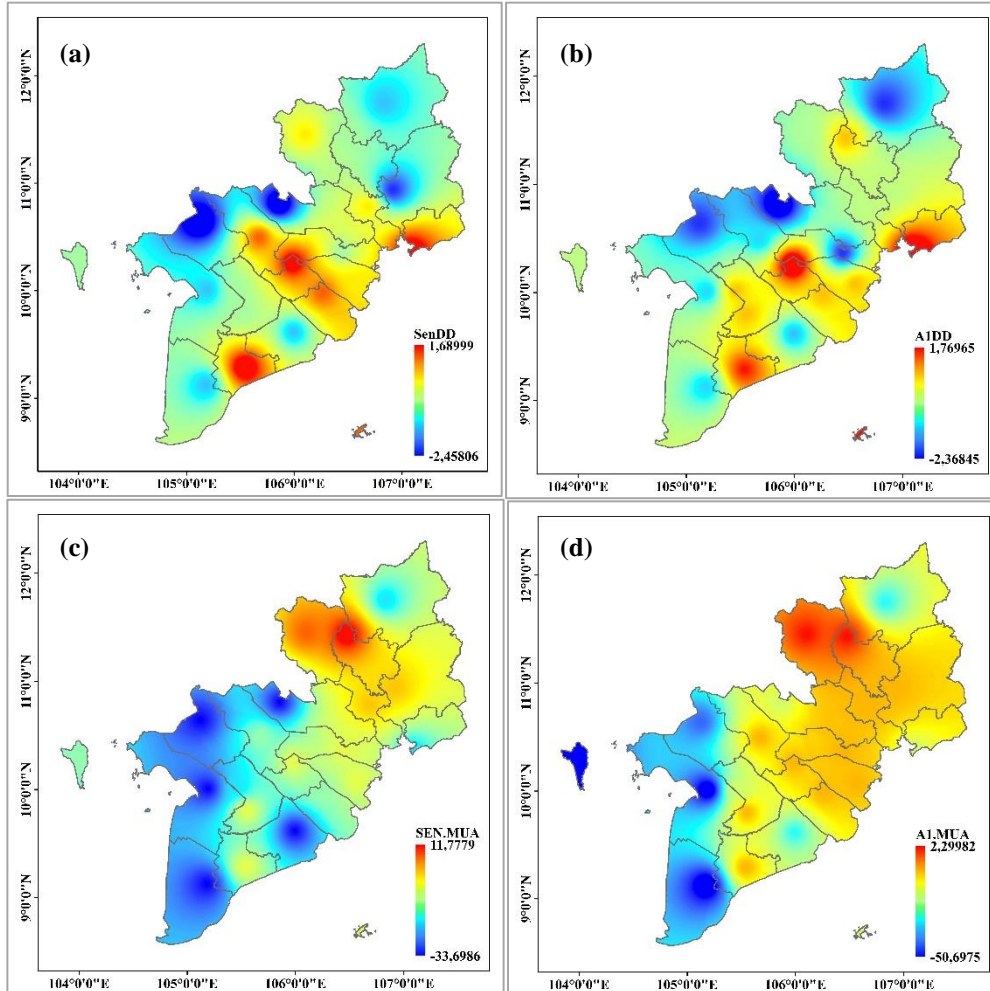


**Hình 8.** Chênh lệch SNMV trong các năm El Nino (a) và La Nina (b) và tất cả các năm. Chênh lệch SNML trong các năm El Nino (c) và La Nina (d) và tất cả các năm.

Trong năm El Nino có thể thấy xu thế chênh lệch âm được thể hiện trên phần lớn các trạm, chiếm tỉ lệ khoảng 82,3% trong tổng số 21 trạm với trị số chênh lệch âm phổ biến từ -0,89 đến 1,83 ngày (Hình 8c). ó chênh lệch dương trong năm La Nina chiếm khoảng 56,9% (Hình 8d). Điều đáng chú ý là trong các đặc trưng mưa, SNML có tỉ lệ số trạm có chênh lệch âm trong năm La Nina thấp nhất so với các đặc trưng khác, khoảng 43% trong tổng số trạm, hơn nữa hầu hết các trạm thuộc Miền Đông có xu thế âm trong năm La Nina, ngoại trừ Vũng Tàu (Hình 8d).

### 3.6. Phân bố xu thế biến đổi của mùa mưa

Chiếm 67% trong tổng số 21 trạm phần đa các trạm là độ dài mùa mưa có xu thế giảm (độ dốc Sen và hệ số a1 mang dấu âm) và xu thế tăng chỉ có 33% trạm. Cho thấy trong hai thập kỷ gần đây độ dài mùa mưa phổ biến xu thế giảm mặc dù đạt mức ý nghĩa 10% không có trạm nào (Hình 9a–9b).



**Hình 9.** Phân bố xu thế biến đổi của độ dài mùa mưa (DD), (a) xu thế Sen's slope và (b) hệ số a1 của phương trình hồi quy. Và xu thế biến đổi của lượng mưa, (c) xu thế Sen's slope và (d) hệ số a1 của phương trình hồi quy.

### 3.7. Phân bố xu thế biến đổi của lượng mưa mùa mưa

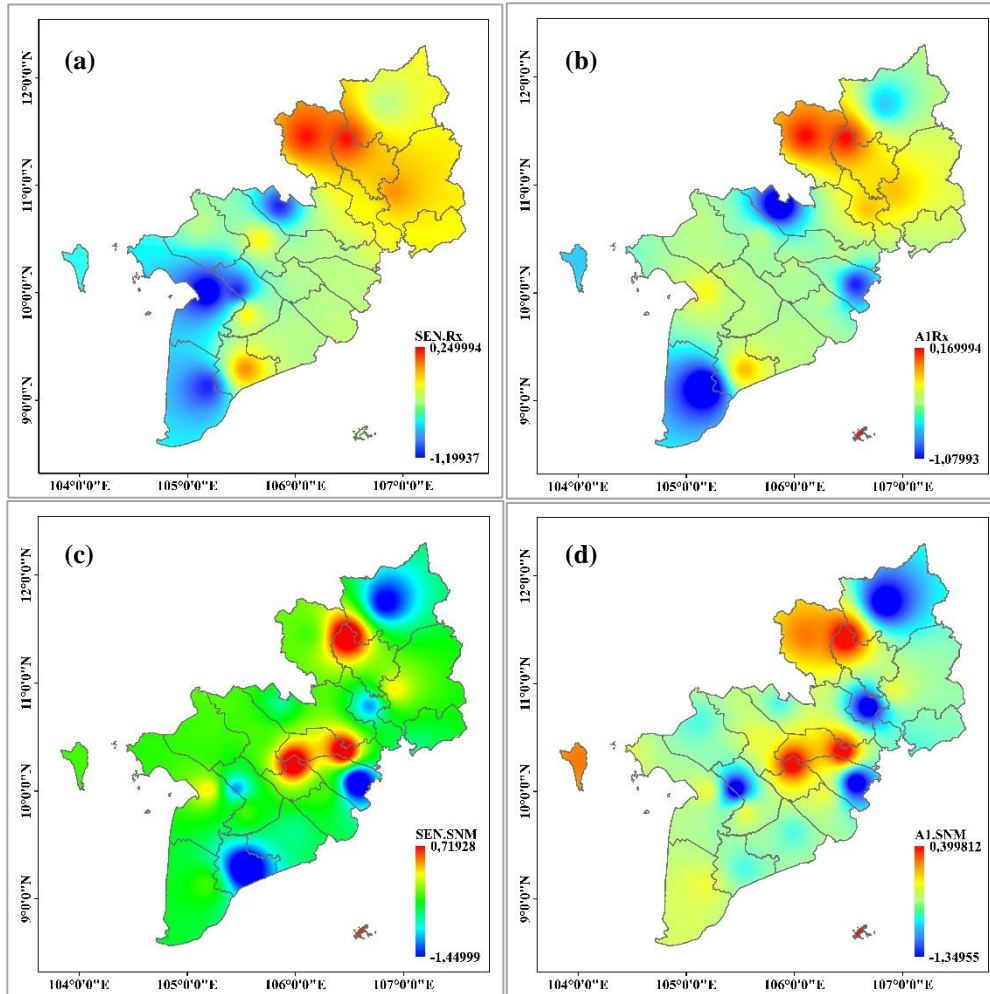
Hình 9c–9d thể hiện kết quả tính toán phân bố xu thế Sen và hệ số a1 của phương trình hồi quy của tổng lượng mưa mùa mưa. Xu thế giảm khá phổ biến trên các trạm ở Nam Bộ đối với lượng mưa mùa mưa. Tất cả các trạm đều có xu thế lượng mưa mùa mưa giảm, một số trạm có xu thế giảm đạt mức ý nghĩa 10% như Vũng Tàu, Sóc Trăng, Cà Mau, Rạch Giá, Châu Đốc, Mộc Hóa và Cần Thơ, riêng trạm Tây Ninh có xu thế lượng mưa mùa mưa tăng, điều này được thể hiện ở sự đồng thuận của cả hệ số Sen và a1.

### 3.8. Phân bố xu thế biến đổi của Rx và SNM

Cũng như độ dài mùa mưa và lượng mưa, xu thế biến đổi của lượng mưa Rx cũng có xu thế giảm trên phần lớn các trạm, ngoại trừ một số trạm như Tây Ninh, Đồng Xoài, Biên Hòa và Bạc Liêu có xu thế tăng nhưng không đạt mức ý nghĩa 10%. Các trạm có xu thế giảm đạt mức ý nghĩa 10% như Cà Mau, Rạch Giá, Cần Thơ và Mộc Hóa (Hình 10a). Phân bố xu thế



tuyến tính dựa trên hệ số a1 cũng tương đối phù hợp với xu thế Sen. Mức độ biến đổi tuyến tính của Rx phổ biến khoảng từ 6,08% đến 15,12% (so với TBNN).



**Hình 10.** Phân bố xu thế biến đổi của lượng mưa lớn nhất (Rx); (a) xu thế Sen's slope và (b) hệ số a1 của phương trình hồi quy. Và xu thế biến đổi của số ngày mưa (SNM); (c) xu thế Sen's slope và (d) hệ số a1 của phương trình hồi quy.

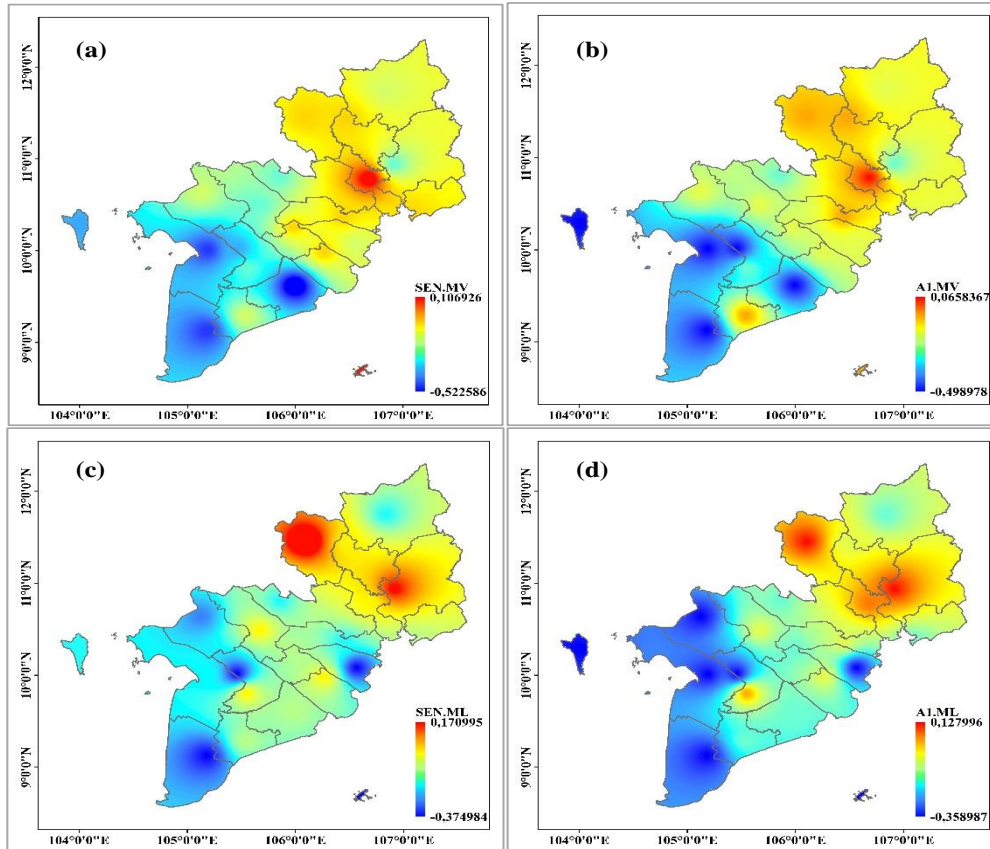
Cũng như độ dài mùa mưa và lượng mưa, xu thế biến đổi của lượng mưa Rx trên phần lớn các trạm cũng có xu thế giảm, ngoại trừ một số trạm có xu thế tăng nhưng không đạt mức ý nghĩa 10% như Tây Ninh, Đồng Xoài, Biên Hòa và Bạc Liêu. Các trạm Cà Mau, Rạch Giá, Cần Thơ và Mộc Hóa có xu thế giảm đạt mức ý nghĩa 10% (Hình 10a). Phân bố xu thế tuyến tính dựa trên hệ số a1 cũng tương đối phù hợp với xu thế Sen. Mức độ biến đổi tuyến tính của Rx phổ biến khoảng từ 6,09% đến 15,31%.

Hình 9c,d trình bày hệ số a1 và xu thế Sen của số ngày mưa (SNM) trong các tháng mùa mưa, có thể thấy các trạm có xu thế giảm SNM chiếm 70,09%. Tuy nhiên chỉ có Sóc Trăng và Trà Vinh đạt mức ý nghĩa thống kê 10%. Mỹ Tho và Đồng Xoài có xu thế tăng lượng mưa (Hình 10c). Mức độ biến đổi tuyến tính của SNM phổ biến khoảng từ 7,3 đến 15,2 ngày. (Hình 10d).

### 3.9. Phân bố xu thế biến đổi của số ngày mưa vừa và lớn

Chuỗi SNMV và SNML theo kết quả tính toán xu thế biến đổi dựa trên xu thế Sen và hệ số a1 của phương trình hồi quy tuyến tính được đưa ra trong Hình 11. Trong các đặc trưng mưa, xu thế giảm cả SNMV và SNML đều khá nhất quán ở Nam Bộ. Điều này được thể hiện

thông quan cả hai hệ số Sen và a1 âm chiếm tới 91,86% số trạm; ngoại trừ trạm HCM và Phú Quốc đối với SNMV; khu vực có SNML tăng là HCM và Tây Ninh.



**Hình 11.** Phân bố xu thế biến đổi của số ngày mưa vừa (SNMV) và số ngày mưa lớn (SNML), (a) xu thế Sen's slope và (b) hệ số a1 của phương trình hồi quy.

Một số trạm có xu thế giảm Đối với SNML bằng kiểm nghiệm phi tham số Mann–Kendall đạt mức ý nghĩa 10%. Mức độ giảm tuyến tính của SNMV dao động phổ biến trong khoảng từ 2,3 đến 7,4 ngày/hai thập kỷ, trung bình tất cả các trạm khoảng 4,6 ngày. Mức độ giảm tuyến tính của SNML dao động phổ biến khoảng 1–3 ngày.

#### 4. Kết luận

Với cơ sở dữ liệu được thu thập từ Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ, số liệu mưa ngày trong 26 năm tại 21 trạm khí tượng đã tính toán cũng như đánh giá xu thế một số đặc trưng mùa mưa; đặc điểm, xu thế mưa và xu thế đổi của một số đặc trưng mưa trong mùa mưa, một số kết quả nghiên cứu đã được tổng hợp như sau:

Kết quả đánh giá nghiên cứu trong giai đoạn 1996–2021 so với các nghiên cứu trước đây [12, 17, 22] về một số đặc trưng mưa trong mùa mưa đều tương đồng, chuẩn xác và có độ tin cậy cao, cụ thể: mùa mưa bắt đầu khoảng từ đầu tháng 4 đến giữa tháng 4 và kết thúc mùa mưa vào khoảng từ giữa đến cuối tháng 11 ở khu vực phía Nam và khu vực phía Tây Bắc Nam Bộ. Thời kỳ bắt đầu mùa mưa của các tỉnh trung tâm Nam Bộ khoảng từ giữa tháng 4 đến đầu tháng 5 và khoảng đầu đến giữa tháng 11 là kết thúc mùa mưa. Trong mùa mưa, các đặc trưng mưa phân bố tương tự nhau số liệu cao ở phía cực Nam và phía Bắc Nam Bộ, thấp ở các tỉnh trung tâm Nam Bộ, bao gồm cả Vũng Tàu.

So với TBNN, các đặc trưng mưa có chênh lệch thấp hơn trong các năm El Nino, cụ thể: độ dài mùa mưa thấp hơn từ 10–15 ngày, tổng lượng mưa trong mùa mưa thấp hơn 100–200 mm, số ngày mưa thấp hơn 5–8 ngày, 2–4 ngày đối với số ngày mưa vừa và 1–2 ngày đối với số ngày mưa lớn. Ngược lại, chênh lệch cao hơn trong các năm La Nina, từ 15,3–25,8 ngày đối với độ dài mùa mưa, khoảng 8–120 mm đối lượng mưa mùa mưa, khoảng 2,2–3,3

ngày đối với số ngày mưa và số ngày mưa vừa; đối với số ngày mưa lớn chênh lệch không đáng kể khoảng 1 ngày.

Dựa trên xu thế Sen và tuyến tính kiểm nghiệm Mann–Kendall và Student, phần lớn các trạm đều có xu thế giảm với các kết quả về đặc trưng mưa trong nghiên cứu. Nhưng phần ít trạm đạt mức ý nghĩa 10%, độ tin cậy thấp và chưa được kiểm chứng rõ ràng.

Hạn chế của nghiên cứu này: (1) Số lượng trạm còn hạn chế so với mạng lưới quan trắc Khí tượng Thủy văn hiện tại; (2) Trong nghiên cứu chỉ sử dụng số liệu quan trắc của trạm Khí tượng Thủy văn nên chưa đa dạng được nhiều nguồn số liệu để kiểm chứng và phân tích nhiều thời đoạn khác nhau để so sánh chuẩn xác và độ tin cậy cao; (3) Trong các công trình nghiên cứu trước đây [15, 19, 20], đã cho thấy xu thế lượng mưa ở phía Nam có xu thế tăng trong giai đoạn trước đây (1961–2007) ở một số trạm đại diện. So với kết quả nghiên cứu này, lượng mưa có xu thế giảm ở phần lớn số trạm. Điều này hoàn toàn có thể giải thích là hai giai đoạn xác định xu thế khác nhau dẫn đến kết quả xu thế khác nhau và đây là giả thiết chưa được nghiên cứu khảo sát cụ thể. Mặt khác, cần một số trạm có thời kỳ dài trước đây và phân tách thành nhiều giai đoạn để có kết quả chuẩn xác hơn.

**Lời cảm ơn:** Bài báo hoàn thành có sự hỗ trợ về mặt dữ liệu của Trung tâm dự báo Khí tượng Thủy văn Quốc gia, Đài Khí tượng Thủy văn Khu vực Nam Bộ. Luận văn tốt nghiệp [24].

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

#### **Tài liệu tham khảo**

1. Jose, A.M.; Cruz, N.A. Climate change impacts and responses in the Philippines: water resources. *Clim. Res.* **1999**, *12*, 77–84.
2. Hiroshi, T. Yasunari. A Climatological Monsoon Break in Rainfall over Indochina–A Singularity in the Seasonal March of the Asian Summer Monsoon. *J. Clim.* **2006**, *19*, 1545–1556.
3. Juneng, L.; Tangang, F.T. Evolution of ENSO–related rainfall anomalies in Southeast Asia region and its relationship with atmosphere–ocean variations in Indo–Pacific sector. *Clim. Dyn.* **2005**, *25*, 337–350.
4. Qian, W.; Lee, D.K. Distribution of seasonal rainfall in the East Asian monsoon region. *Theor. Appl. Climatol.* **2002**, *73*, 1–18.
5. Matsumoto, J. Seasonal Transition of Summer Rainy Season over Indochina and Adjacent Monsoon Region. *J. Adv. Atmos. Sci.* **1997**, *14*(2), 231. Doi:10.1007/s00367-997-0022-0.
6. Bin, W.; Ho, L. Rainy Season of the Asian–Pacific Summer Monsoon. *J. Clim.* **2002**, *15*, 386–398.
7. Monron, V. et al. Spatio–temporal variability and predictability of summer monsoon onset over the Philippines. *Clim. Dyn.* **2009**, *33*, 1159–1177.
8. Zhai, P.; Zhang, X.; Wan, H.; Pan, X.H. Trends in Total Precipitation and Frequency of Daily Precipitation Extremes over China. *Am. Meteorol. Soc.* **2005**, *18*, 1096–1108.
9. Endo, N.; Matsumoto, J.; Lwin, T. Trends in Precipitation Extremes over Southeast Asia. *SOLA* **2009**, *5*, 168–171. Doi:10.2151/sola.2009-043.
10. Awan, J.A.; Baea, D.H.; Kim, K.J. Identification and trend analysis of homogeneous rainfall zones over the East Asia monsoon region. *Q. J. R. Meteorolog. Soc.* **2014**, *15*, 1422–1433. Doi:10.1002/joc.4066.
11. Limsaku, A.; Singhruck, P. Long–term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand. *Atmos. Res.* **2016**, *169*, 301–317.
12. Toàn, P.N.; Đắc, P.T. Khí hậu Việt Nam,. Nhà Xuất bản khoa học và kỹ thuật Việt Nam, 1975, tr. 312.

13. Ngử, N.Đ. Tác động của ENSO đến thời tiết, khí hậu, môi trường và kinh tế-xã hội ở Việt Nam. Hội thảo chuyên đề về Đa dạng sinh học và Biến đổi khí hậu: Mối liên quan tới Đói nghèo và Phát triển bền vững Hà Nội, 2007, tr. 259.
14. Tân, P.V. Nghiên cứu tác động của biến đổi khí hậu toàn cầu đến các yếu tố và hiện tượng khí hậu cực đoan ở Việt Nam, khả năng dự báo và giải pháp chiến lược ứng phó. Báo cáo tổng kết đề tài KC08. 29/06–10, 2010, tr. 29.
15. Hằng, V.T. và cs. Xu thế biến đổi của lượng mưa ngày cực đại ở Việt Nam giai đoạn 1961–2007. *Tap chí Khoa học ĐHQGHN, khoa học tự nhiên và công nghệ*, **2009**, 25, 423–430.
16. Mậu, N.Đ.; Trường, N.M.; Sasaki, H.; Takayabu, I. Dự tính biến đổi lượng mưa mùa mưa ở khu vực Việt Nam vào cuối thế kỷ 21 bằng mô hình NHRCM. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2017**, 613, 7–13.
17. Thuận, N.T.H. Ảnh hưởng của ENSO đến gió mùa mùa hè (GMMH) và mưa ở Nam Bộ. *Viên Khí tượng Thủy văn và môi trường*, 2007, tr. 162.
18. Thành, N.Đ.; Tân, P.V. Kiểm nghiệm phi tham số xu thế biến đổi của một số yếu tố khí tượng cho giai đoạn 1961–2007. *Tap chí Khoa học ĐHQGHN, khoa học tự nhiên và công nghệ*, **2012**, 28, 129–135.
19. Bộ Tài nguyên và Môi trường. Kịch bản Biến đổi Khí hậu, nước biển dâng cho Việt Nam, NXB Bộ Tài nguyên – Môi trường và Bản đồ Việt Nam, Hà Nội, 2020, tr. 286.
20. Lan, L.T.X. Các hình thái thời tiết ảnh hưởng đến khu vực Nam Bộ, Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ, TP.HCM, 2004.
21. Tân, P.V. Các Phương Pháp Thống kê trong khí tượng khí hậu. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội, 2005, tr. 260.
22. Zhang, Y.; Wang, B.; Wu, G. Onset of the summer monsoon over the Indochina Peninsula: Climatology and interannual variation. *J. Clim.* **2002**, 159, 3206–3221.
23. McLeod, A.I. Kendall Rank Correlation and Mann–Kendall Trend Test. R Package “Kendall”. 2005. <https://cran.r-project.org/web/packages/Kendall/>.
24. Đặng Thị Lan Anh, Đ.T.L. Luận văn thạc sĩ: Nghiên cứu biến đổi của một số đặc trưng mưa trong mùa mưa khu vực Nam Bộ. Trường Đại học Khoa học Tự nhiên Hà Nội, 2019, tr. 64.

## **The study on changes in intra–season rainfall characteristics in the Southern Vietnam**

**Dang Thị Lan Anh<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Ben Tre Hydro–meteorological Center, Southern Hydro–meteorological Regional Center, Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration; lananhkttv@gmail.com

**Abstract:** This study evaluates the changes in some rain characteristics during the rainy season in the Southern Vietnam in the recent period (1996–2021) including rain seasons, p rainfall, daily rainfall, the maximum number of rainy days, the number of days with moderate and heavy rain, etc. In this study, statistical methods, trend calculation and linear methods were used to synthesize the observed rainfall data at 21 meteorological stations representing 19 provinces and 2 islands in the Southern Vietnam. The research results show the spatial distribution of rain characteristics, analyze the difference between ENSO year and all the others, as a premise for science and field knowledge, field and regional specific climate in order to improve forecasting capacity and develop basic science plans.

**Keywords:** Rainfall characteristics; Southern Vietnam; ENSO.

Bài báo khoa học

## Ứng dụng AI trong quan trắc mực nước bằng Camera

Nguyễn Nam Đức<sup>1\*</sup>, Lê Ngọc Quyền<sup>1</sup>, Phạm Hồ Quốc Tuấn<sup>1</sup>, Nguyễn Minh Giám<sup>1</sup>,  
Trần Minh Triết<sup>2</sup>, Trần Tiến Dũng<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ; [ngnamduc@gmail.com](mailto:ngnamduc@gmail.com);  
[quyentccb@gmail.com](mailto:quyentccb@gmail.com); [phamhoquoctuan@yahoo.com](mailto:phamhoquoctuan@yahoo.com); [nmg@kttvnb.vn](mailto:nmg@kttvnb.vn)

<sup>2</sup> Đại học Khoa học Tự nhiên Thành phố Hồ Chí Minh, Đại học Quốc gia Việt Nam;  
[tmtriet@hcmus.edu.vn](mailto:tmtriet@hcmus.edu.vn)

<sup>3</sup> Văn phòng Tổng cục khí tượng thủy văn, Tổng cục Khí tượng Thủy văn;  
[dungtranca5@gmail.com](mailto:dungtranca5@gmail.com)

\*Tác giả liên hệ: [ngnamduc@gmail.com](mailto:ngnamduc@gmail.com); Tel.: +84–903788140

Ban Biên tập nhận bài: 5/2/2023; Ngày phản biện xong: 1/3/2023; Ngày đăng bài: 25/3/2023

**Tóm tắt:** Nghiên cứu xử lý nhận dạng hình ảnh thu được từ hệ thống camera trên cơ sở các thuật toán trí tuệ nhân tạo (*Artificial Intelligence – AI*) nhằm chuyển các trạm quan trắc mực nước thủ công thành các trạm quan trắc mực nước tự động. Đồng thời kết hợp công nghệ thông tin nhằm thu thập, kết nối dữ liệu quan trắc mực nước từ các trạm thủy văn để tăng cường số lượng và chất lượng dữ liệu cung cấp cho các mô hình dự báo thủy văn. Nghiên cứu này đáp ứng yêu cầu chuyển đổi số, tự động hóa các trạm quan trắc thủ công thành các trạm tự động trên cơ sở các công nghệ chuyên môn hiện có, đồng thời tiết kiệm được nguồn nhân lực tại các trạm khí tượng thủy văn; giải quyết bài toán thiếu hụt nhân sự, khó khăn trong việc tuyển dụng nhân lực cho các trạm theo vị trí việc làm.

**Từ khóa:** Camera; Khí tượng thủy văn; Trí tuệ nhân tạo; AI.

### 1. Đặt vấn đề

Trên hệ thống mạng lưới trạm khí tượng thủy văn thuộc Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ còn nhiều trạm thủy văn thủ công, trạm truyền thống đang quan trắc mực nước bằng công trình tuyến cọc, hệ thống thủy chí và máy tự ghi mực nước. Máy tự ghi được trang bị tại các trạm hầu hết là máy tự ghi Stevens. Các trạm thủ công cần có quan trắc viên để vận hành và xử lý thiết bị trong quá trình quan trắc. Tuy nhiên, trong tình huống đặc biệt như bối cảnh dịch bệnh Covid-19, các địa phương thực hiện giãn cách xã hội theo Chỉ thị 16 của Thủ tướng chính phủ [1]. Một số trạm thủy văn cũng bị ảnh hưởng theo, các quan trắc viên không thể tới trạm để quan trắc, trích xuất số liệu để phục vụ cho công tác dự báo, cảnh báo phòng chống thiên tai. Giải pháp sử dụng camera kết hợp với các thuật toán trí tuệ nhân tạo để quan trắc từ xa đối với các trạm bị phong tỏa rất hữu ích khi có thể trực tiếp thu thập số liệu bất kỳ thời gian nào để phục vụ chuyên môn. Đồng thời có thể nâng cấp chuyển đổi các trạm từ quan trắc mực nước thủ công thành các trạm quan trắc tự động.

Hiện nay trên thế giới, lĩnh vực trí tuệ nhân tạo được ứng dụng rộng rãi cho nhiều ngành [2–7], trong đó có khí tượng thủy văn. Nhiều nước đã và đang đầu tư xây dựng các hệ thống dự báo hay cảnh báo sớm dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo như: hệ thống cảnh báo sớm lũ tại Jakarta của Indonesia; hệ thống dự báo ngập do mưa tại Nhật; hệ thống dự báo và cảnh báo sớm lũ lụt tại Ấn Độ... Trong nước cũng có nhiều nghiên cứu ứng dụng trong ngành khí tượng thủy văn như: [8] đã nghiên cứu trong đề tài cấp Bộ “Nghiên cứu, xây dựng công cụ nhận dạng và số hóa các giản đồ tự ghi khí tượng thủy văn” [8–11]; đề tài cấp thành phố [12]



đã nghiên cứu xây dựng và triển khai thử nghiệm hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo tại Thành phố Hồ Chí Minh, đã nghiên cứu và sử dụng hình ảnh từ các camera đo ngập lụt trên đường phố cũng như khai thác nguồn các video từ hệ thống camera giám sát giao thông qua ứng dụng AI để dự báo ngập tại các tuyến đường của thành phố; [13] đã nghiên cứu một giải pháp dựa trên Vision Transformer, để phân loại bốn cấp độ mưa và ngập lụt ở các khu vực đô thị từ camera...

Nghiên cứu xử lý nhận dạng hình ảnh thu được từ hệ thống camera trên cơ sở AI đáp ứng yêu cầu chuyển đổi số [14–16], tự động hóa các trạm quan trắc thủ công trên cơ sở các công trình chuyên môn hiện có. Đồng thời đáp ứng được Chiến lược phát triển ngành khí tượng thủy văn đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 [17].

## 2. Phương pháp nghiên cứu và tài liệu thu thập

### 2.1. Giới thiệu phạm vi khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu thuộc phạm vi quản lý của Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ với 19 tỉnh thành. Hiện nay mạng lưới trạm thủy văn thủ công ở Nam Bộ bao gồm 50 trạm truyền thống, trong đó hầu hết được trang bị máy tự ghi mực nước Stevens, Valdai, GR–38 [18]. Để thử nghiệm, nhóm nghiên cứu chọn 02 trạm thủy văn có đặc thù chung cho các trạm thủ công ở Nam Bộ là Trạm Thủy văn Mỹ Tho và Trạm Thủy văn Long Định như Bảng 1.

**Bảng 1.** Danh sách và vị trí trạm thử nghiệm.

TT	Tên trạm	Tên sông	Kinh độ (°)	Vĩ độ (°)
1	Thủy văn Mỹ Tho	Sông Tiền	106°20'48"	10°20'54"
2	Thủy văn Long Định	Kênh Xáng	106°15'23"	10°23'60"

### 2.2. Hệ thống camera, chế độ hoạt động và truyền dữ liệu

#### 2.2.1. Tiêu chí lựa chọn thiết bị camera

Camera là loại cố định, độ phân giải FullHD (1080) trở lên; Có thể quan sát trong điều kiện thời tiết xấu (mưa lớn), chế độ màu cả ngày và đêm, cho phép lựa chọn vùng quan sát; mã hóa hình ảnh theo chuẩn nén H.265; H.264; H.264B; MJPEG; kết nối mạng theo chuẩn RJ45, WiFi; truyền dữ liệu (video, ảnh) trực tiếp về máy chủ, cấu hình từ xa; vỏ kim loại, lắp đặt ngoài trời, khả năng chống nước, bụi chuẩn IP 67 trở lên; thông dụng nhiều hãng cung cấp trên thị trường, dễ lắp đặt.

#### 2.2.2. Nguồn điện sử dụng

Thuận tiện nhất hiện tại các camera đều sử dụng nguồn điện một chiều DC 12V và dòng tiêu thụ tương đối nhỏ, do đó đối với vấn đề nguồn cung cấp duy trì hoạt động có nhiều phương án để thực hiện và có thể áp dụng tại tất cả các trạm thủy văn. Tuy nhiên, để đảm bảo hoạt động liên tục, tránh bị gián đoạn do mất điện lưới, cần thiết lập hệ thống nguồn cung cấp ổn định từ ắc quy và nạp lại tự động bằng panel mặt trời, điện lưới.



**Hình 1.** Hình ảnh IP camera 2.0MP được sử dụng thử nghiệm.



Hình 2. Vị trí lắp đặt camera tại Trạm thủy văn Mỹ Tho.



Hình 3. Vị trí lắp đặt camera tại Trạm thủy văn Long Định.

### 2.2.3. Chế độ hoạt động và truyền dữ liệu

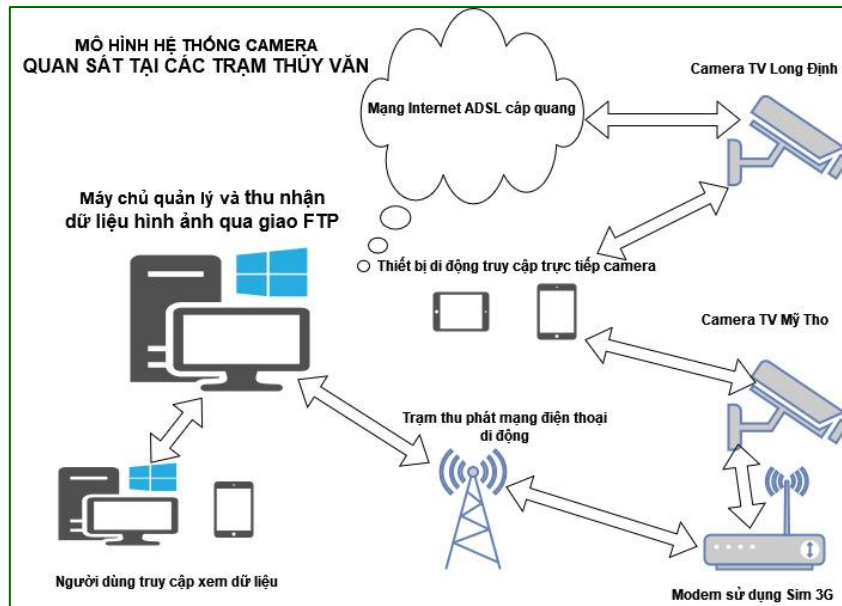
Thiết bị camera đều được cài đặt chế độ hoạt động truyền video và hình ảnh liên tục truyền về máy chủ, cho phép xem qua các ứng dụng trên thiết bị di động. Đồng thời trên máy chủ cài đặt phần mềm quản lý tập trung để có thể theo dõi, kiểm tra, giám sát và cấu hình thiết bị từ xa. Trọng tâm hoạt động của camera, ngoài quan sát video trực tiếp, làm sao có những ảnh tốt, rõ nét (độ phân giải 1080P với dung lượng 240KB) tại những khu vực quan tâm và truyền dữ liệu liên tục. Thông qua đó dùng công nghệ AI để xử lý nhận dạng, đưa ra số liệu theo thời gian thực. Phương thức truyền: Truyền dữ liệu về máy chủ đặt tại Đài với hai loại dữ liệu: (1) Hình ảnh video thực; (2) Ảnh chụp theo thời gian được cài đặt qua giao thức FTP. Mô hình hệ thống quan trắc và lưu trữ dữ liệu được thể hiện trên hình 4.

## 2.3. Phương pháp nghiên cứu

### 2.3.1. Đối với giản đồ máy Stevens

Các giải thuật đọc thông tin từ giản đồ Stevens: để có được số liệu chuẩn xác cần thực hiện các bước xử lý như: Xử lý vấn đề distortion (méo ảnh) do camera; xác định góc quay; xác định chính xác đầu kim để tính mực nước chính xác, ta cần phải quay ảnh chụp về góc 0 độ một cách tự động; xây dựng dữ liệu mẫu và đối sánh mẫu (*Template matching*) để xác

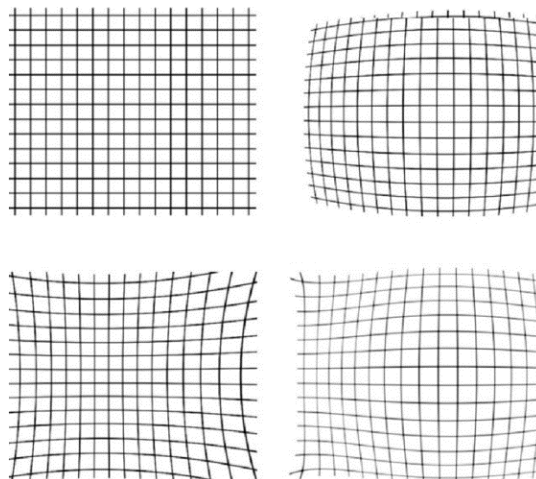
định vùng chứa mũi kim của máy Stevens, sử dụng thuật toán template matching sẽ cho kết quả nhanh và chính xác; các Keypoint; xử lý vấn đề đổi chiều của máy tự ghi Stevens.



**Hình 4.** Mô hình chung về hệ thống quan trắc và lưu trữ dữ liệu.

a) Vấn đề distortion do camera

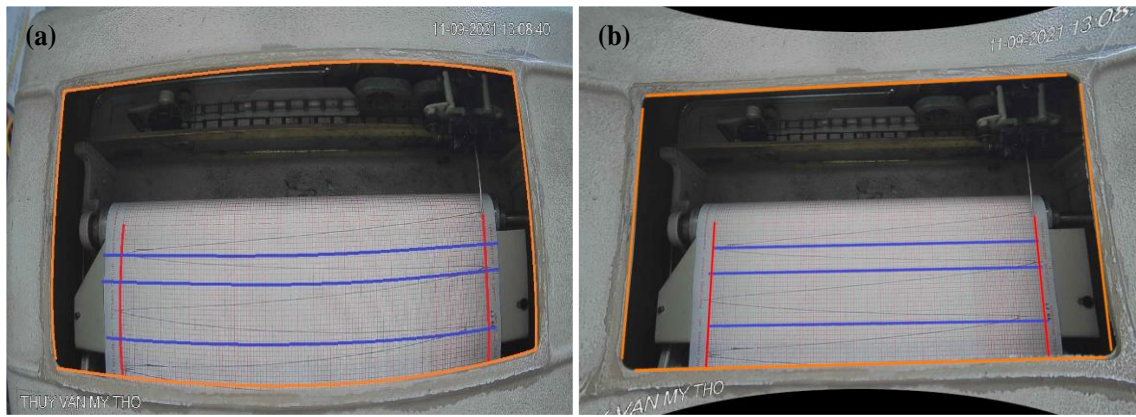
Một đặc điểm của các camera hiện đang được bán trên thị trường là cấu hình thấu kính của chúng. Do đa số camera trên thị trường được dùng cho mục đích quan sát ở khoảng cách xa và trên một không gian rộng, cấu hình thấu kính của những camera này thường được ưu tiên cho việc quan sát bao quát cự ly xa hơn là chi tiết nằm ở cự ly gần và mang tính đồng đều. Với một khung hình đều (thể hiện bằng lưới nằm tại góc trên, bên trái), khi đi qua thấu kính camera sẽ cho khung hình lồi (thể hiện bằng lưới nằm tại góc trên, bên phải).



**Hình 5.** Hiện tượng distortion do camera ghi nhận ảnh.

Distortion (méo ảnh) là hiện tượng các đường thẳng trên hình ảnh bị cong, nghiêng so với khung hình (Hình 5). Nguyên nhân là do các thấu kính trong ống kính máy ảnh và hiện tượng này thường xuyên xảy ra gây khó khăn trong việc căn chỉnh các vị trí ô li, đường thẳng giao nhau để xác định độ cao mực nước. Do đó, ta cần phải undistort (sửa méo) ảnh để việc căn chỉnh được chính xác. Những đường nét chính được thể hiện trong hình là những đường thẳng trên thực tế, tuy nhiên lại có dạng cong dưới góc nhìn của camera (Hình 6a). Việc này sẽ dẫn đến sai số ngày càng lớn khi càng về biên.



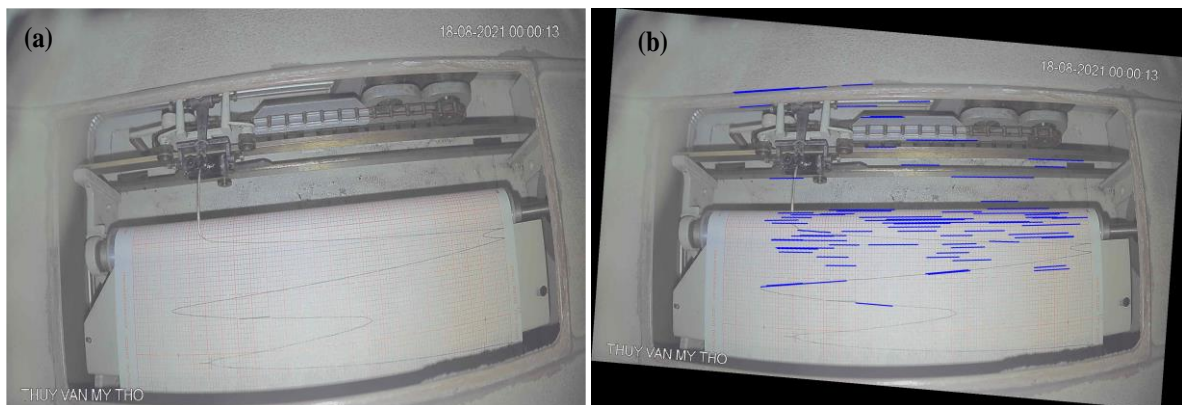


**Hình 6.** (a) Hiện tượng distortion với ảnh máy Stevens ghi nhận từ camera; (b) Ảnh chụp máy Stevens đã được khử hiện tượng distortion.

Để khắc phục điều này, đòi hỏi phải có cấu hình cụ thể của thấu kính. Với cấu hình thấu kính này, các bước biến đổi ngược sẽ có thể xây dựng lại gần đúng hình ảnh ban đầu. Vì vậy, việc có được cấu hình thấu kính là rất quan trọng. Hiện nay, các camera thường không công bố quy chuẩn kỹ thuật, bao gồm cấu hình thấu kính. Để giải quyết vấn đề này, một trong những ràng buộc này là đối tượng đã nằm ở trong khung nhìn của camera. Một ràng buộc khác là camera ở vị trí cố định. Hai ràng buộc này cho phép đối tượng cần phân tích luôn luôn nằm trong vị trí nhất định. Cấu hình của thấu kính theo đó có thể được mô phỏng để đạt được kết quả tốt nhất (Hình 6b).

b) Xác định góc quay

Đối với máy Stevens, trong thực tế, camera có những trường hợp bị lệch góc quay từ camera dẫn đến hình ảnh cũng bị lệch một góc (alpha) (Hình 7a). Để xác định chính xác đầu kim và mực nước chính xác, ta cần phải quay ảnh chụp về góc 0 độ một cách tự động. Đối với máy Stevens, trong thực tế, camera có những trường hợp bị lệch góc quay từ camera dẫn đến hình ảnh cũng bị lệch một góc (alpha). Để xác định chính xác đầu kim và mực nước chính xác, ta cần phải quay ảnh chụp về góc 0 độ một cách tự động (Hình 7b).



**Hình 7.** (a) Máy Stevens bị lệch do góc quay của camera; (b) Máy Stevens đã được quay tự động.

\* Thuật toán quay ảnh tự động:

Chuyển ảnh từ 3 kênh màu RGB sang ảnh xám.

Sử dụng thuật toán Canny để tìm những điểm ảnh có khả năng thuộc các biên cạnh.

Sử dụng thuật toán HoughLines để xác định những đường thẳng dựa trên các điểm ảnh từ thuật toán Canny.

Loại bỏ những đường thẳng có góc lệch quá lớn ( $> 5$  độ).

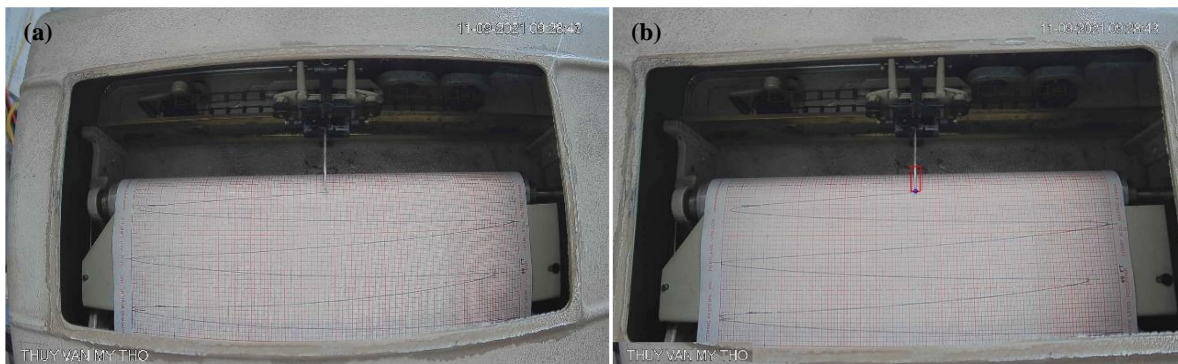
Lấy trung vị các góc lệch từ các đường thẳng vừa thu được.

Thực hiện phép quay với góc lệch trung vị.

c) Đối sánh mẫu (*Template matching*) để xác định vùng chứa mũi kim của máy Stevens  
 Để xác định độ cao của mực nước, trước tiên ta cần phải phát hiện được mũi kim của máy Stevens. Nhận xét thấy hình dáng của mũi kim tại cùng một máy là như nhau và không đổi, do đó ta sử dụng thuật toán template matching sẽ cho kết quả nhanh và chính xác. Ngoài ra, tại các vị trí khác nhau của mũi kim sẽ cho các hình dạng khác nhau do phép chiếu phối cảnh. Ta sẽ sử dụng nhiều template ở mỗi vị trí khác nhau để giải quyết bài toán ở mọi góc nhìn (Hình 8).



**Hình 8.** Hình ảnh minh họa vài template ở các vị trí khác nhau.



**Hình 9.** (a) Hình ảnh trước khi phát hiện mũi kim máy Stevens; (b) Hình ảnh đã phát hiện được mũi kim máy Stevens.

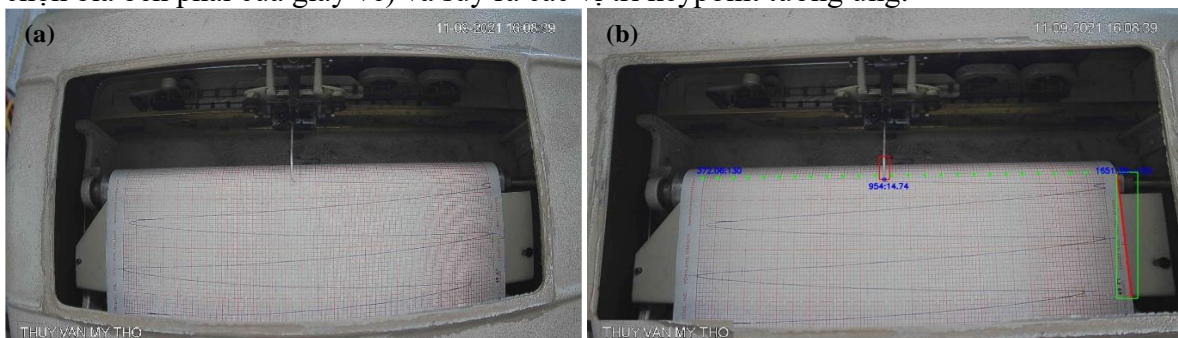
d) Cách xác định đầu kim

Do phép chiếu phối cảnh nên mũi kim khi tiến về hai biên của giấy vẽ sẽ bị lệch một đoạn nhất định. Ví dụ khi ở vị trí trung tâm của ảnh  $x = 960$ , mũi kim không bị lệch và khi di chuyển đến vị trí biên bên trái với tọa độ  $x = 360$ , mũi kim đã bị lệch 30 điểm ảnh.

Vì vậy khi mũi kim tiến càng tiến về hai biên của giấy vẽ, ta sẽ tăng dần chiều rộng của bounding box (hình chữ nhật màu đỏ) và mũi kim sẽ được xác định bằng trung điểm của cạnh dưới bounding box (mũi kim được minh họa bằng chấm tròn màu xanh dương là trung điểm của cạnh dưới hình chữ nhật màu đỏ).

e) Các Keypoint

Để xác định được độ cao của mực nước, ta cần xác định vị trí các ô li, từ đó suy ra được độ cao tương ứng bằng phương pháp nội suy tuyến tính. Nhận xét thấy khoảng cách giữa các ô li trên giấy vẽ là không đổi, do đó ta chỉ cần xác định một vị trí cột mốc cố định (ở đây ta chọn bìa bên phải của giấy vẽ) và suy ra các vị trí keypoint tương ứng.



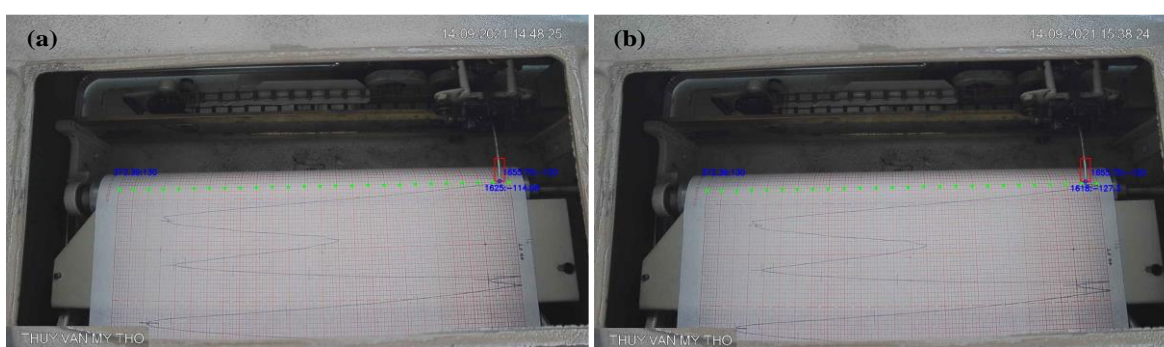
**Hình 10.** (a) Hình ảnh ban đầu từ máy Stevens; (b) Hình ảnh phát hiện bìa giấy bên phải và suy ra các vị trí ô li tương ứng.



f) Vấn đề đổi chiều

Trong những trường hợp mực nước đi ra khỏi khoảng giá trị của giấy vẽ, sẽ xảy ra hiện tượng đổi chiều. Do đó ta cần xác định vị trí đổi chiều và lấy được giá trị thực của độ cao mực nước (Hình 11a). Để xác định vị trí đổi chiều, ta sử dụng thuật toán như sau:

Tại thời điểm cần xác định độ cao mực nước, ta lần lượt quay ngược về các thời điểm trước đó. Ở mỗi bước quay ngược về, ta xác định vị trí tọa độ mũi kim và độ cao mực nước tương ứng (độ cao dựa trên giấy vẽ và không đảo chiều). Xác định lần chạm biên trái hoặc phải bằng cách xét 3 vị trí đầu kim  $(x_0, y_0)$ ,  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  và độ cao  $h_0, h_1, h_2$  ở các thời điểm liên tiếp  $t_0, t_1, t_2$ . Tính hai vector liên tiếp nhau và xác định góc giữa hai vector  $v_1 (x_1 - x_0, y_1 - y_0)$  và vector  $v_2 (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$ . Kiểm tra điều kiện chạm biên: góc giữa 2 vector là góc tù ( $\cos < 0$ ),  $h_1$  có giá trị cách giá trị mực nước ở 2 biên một khoảng nhỏ và  $x_0 < x_1 > x_2$  (đổi chiều biên phải),  $x_0 > x_1 < x_2$  (đổi chiều bên trái). Kết luận, nếu lúc quay ngược về các thời điểm trong quá khứ có 1 lần chạm biên thì thực hiện đổi chiều, nếu có 2 lần chạm biên thì không thực hiện đổi chiều (Hình 11b).



**Hình 11.** (a) Chuẩn bị xảy ra hiện tượng đảo chiều; (b) Quay ngược về quá khứ phát hiện có 1 lần chạm biên => đổi chiều.

2.3.2. Đối với hệ thống thủy chí

Các giải thuật cần xử lý để đọc thông tin từ hệ thống thủy chí để có được số liệu chuẩn xác, tương tự như giản đồ máy Stevens, cần xác định vị trí tuyến cọc, thủy chí đo mực nước, từ đó suy ra các cột mốc mực nước tương ứng. Sử dụng thuật toán template matching với các template là các thủy chí. Xử lý năng lượng từ hình ảnh thu nhận được qua ánh sáng ban ngày, ban đêm. Tạo mẫu để giải thuật AI học từ các tình huống thực tế có thể xảy ra như bèo, rác trôi, sóng từ thuyền ghe khi đi qua, mưa to...

\*Các giải thuật xử lý để đọc tự động thông tin từ ảnh chụp thủy chí

a) Template matching để xác định vị trí các thủy chí

Sử dụng thuật toán template matching với các template là các bảng  $P_1, P_2$  của thủy chí (Hình 12–14).



**Hình 12.** Hình ảnh minh họa vài template bảng  $P_1$ .



**Hình 13.** Hình ảnh minh họa vài template thủy chí  $P_2$ .



**Hình 14.** Phát hiện hai thủy chí với bảng P<sub>1</sub> và P<sub>2</sub>.

b) Giải pháp ban ngày

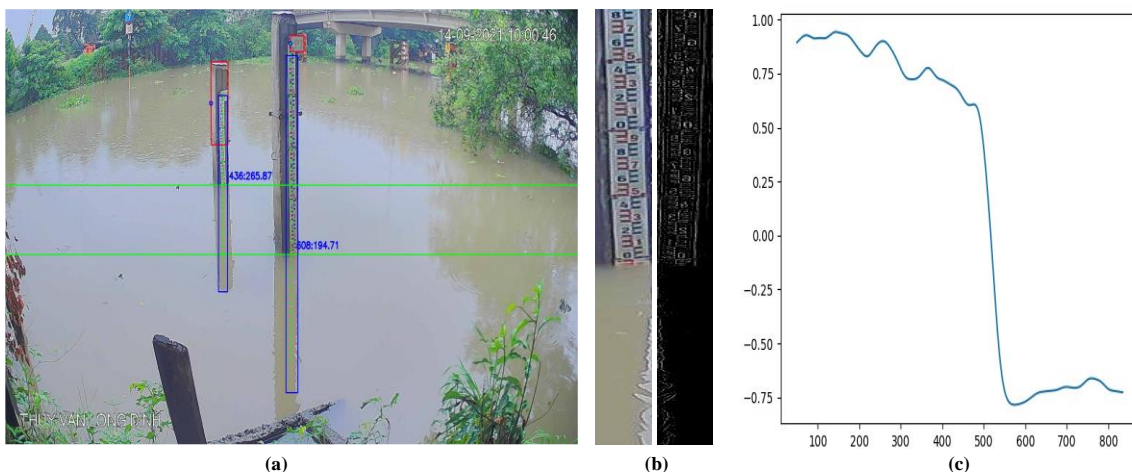
Sau khi tìm được vị trí hai thủy chí P<sub>1</sub> và P<sub>2</sub>, ta tiến hành xác định mực nước với thuật toán như sau:

- Xác định vùng xung quanh thủy chí dựa trên vị trí hai cột P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> (Hình 15a).
- Tính gradient ở mỗi độ cao bằng cách lấy tổng theo chiều ngang trong vùng cần xác định và chuẩn hóa về đoạn [0, 1] (Hình 15b).
- Tính giá trị kênh màu green ở mỗi độ cao bằng cách lấy tổng theo chiều ngang trong vùng cần xác định và chuẩn hóa về đoạn [0, 1].
- Tính giá trị năng lượng bằng công thức:

$$\alpha \times \text{gradient} + \beta \times \text{green}$$

- Duyệt vùng cần xác định từ cao đến thấp, nếu tại một độ cao bất kì thỏa mãn điều kiện mực nước thì sẽ dừng thuật toán.

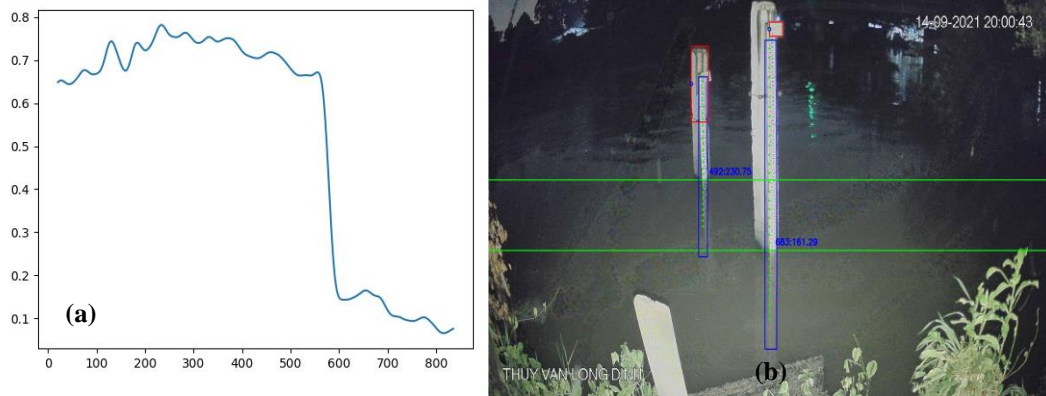
- Điều kiện mực nước: giá trị năng lượng ở độ cao cần xác định < giá trị năng lượng trung bình của các độ cao bên trên -0,5 và có độ lớn đạo hàm đạt cực đại (Hình 15c).



**Hình 15.** (a) Vùng cần xác định mực nước là hình chữ nhật màu xanh; (b) Minh họa tính gradient tại vùng cần xác định; (c) Minh họa biểu đồ năng lượng ban ngày và mực nước thỏa điều kiện ở vị trí 543 (pixel trên ảnh).

c) Giải pháp ban đêm

Tương tự như giải pháp ban ngày nhưng thay vì tính gradient và kênh màu green, ta sẽ tính giá trị độ sáng và gradient của ảnh do ban đêm những điểm trên thủy chí với điều kiện chiếu sáng từ đèn sẽ có độ sáng cao hơn những điểm dưới nước (Hình 16).

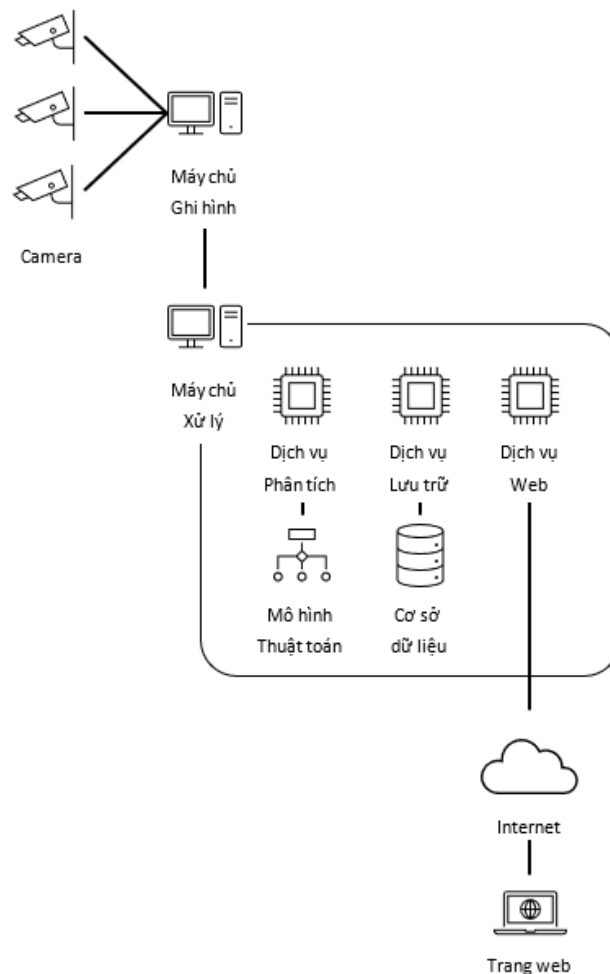


**Hình 16.** (a) Minh họa biểu đồ năng lượng ban đêm và mực nước thỏa điều kiện ở vị trí 589 (pixel trên ảnh); (b) Kết quả giá trị mực nước thu được là vạch kẻ màu xanh lá.

### 2.3.3. Hệ thống dịch vụ trên web xử lý và cung cấp thông tin các trạm thủy văn

Giải pháp là sự kết hợp giữa các thành phần độc lập với nhau. Các thành phần bao gồm:

- Camera: với nhiệm vụ ghi lại hình ảnh tại các trạm. Để phân tích được kết quả tốt và chính xác nhất, camera được lắp đặt và cố định tại một vị trí với khung nhìn bao quát phổ chuyên động. Trong ứng dụng hiện tại, phổ chuyên động này bao gồm khoảng từ biên trái đến biên phải của đầu kim máy Stevens tại Trạm thủy văn Mỹ Tho. Tại trạm thủy văn Long Định, phổ này là từ giới hạn dưới và trên của hai cột thủy chí trên sông.



**Hình 17.** Kiến trúc chung của hệ thống dịch vụ trên web để xử lý và cung cấp thông tin cho các trạm thủy văn.

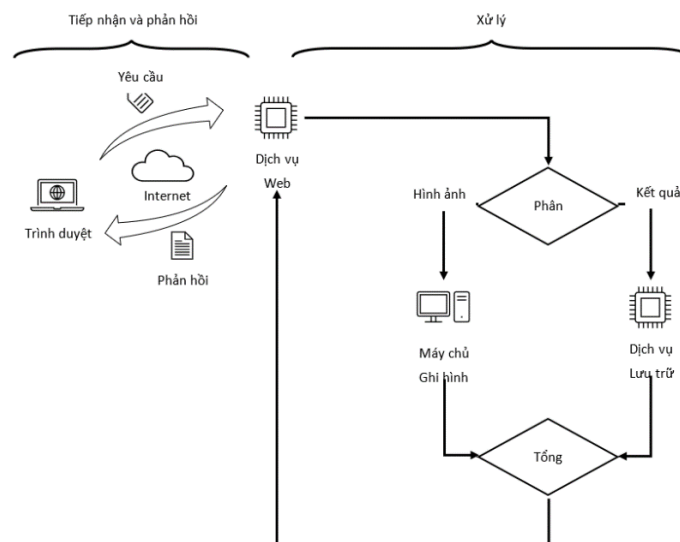
- Máy chủ ghi hình: có nhiệm vụ tổng hợp các nguồn dữ liệu video từ camera. Do số lượng camera có thể nhiều, việc thành lập một điểm tổng hợp và lưu trữ hình ảnh là hợp lý. Hơn nữa, vị trí các camera thường phải phụ thuộc vào trạm thủy văn, do đó các phương thức kết nối mạng để truyền tải dữ liệu cho các camera này có thể rất đa dạng, đặt ra một số thử thách cho việc lấy dữ liệu đầu vào nhằm mục đích lưu trữ cũng như xử lý. Ở một số nơi không có kết nối internet có dây, kết nối không dây 4G thường được triển khai.

- Máy chủ xử lý: có nhiệm vụ xử lý và phân tích thông tin hình ảnh camera và cung cấp các kết quả phân tích này. Các hoạt động được thực thi tại máy chủ xử lý được phân tách ra một số thành phần (module) nhỏ hơn, nhằm dễ dàng thay thế cũng như khắc phục các lỗi xảy ra. Các thành phần này được chia thành các dịch vụ, bao gồm:

+ Dịch vụ phân tích có nhiệm vụ nhận một hình ảnh đầu vào, kèm theo một cấu hình mô tả mô hình thuật toán, sau đó tiến hành phân tích và trả kết quả. Đây là dịch vụ chính và quan trọng nhất của toàn bộ giải pháp. Đi kèm với dịch vụ này là các mô hình thuật toán cụ thể cho các camera. Các mô hình được áp dụng cho toàn bộ camera, tuy nhiên mỗi camera sẽ có các cấu hình riêng được tinh chỉnh để cải thiện độ chính xác cao nhất có thể được, thông qua các ví dụ sai dưới dạng các ảnh mà mô hình gốc nhận diện chưa chính xác.

+ Dịch vụ lưu trữ có nhiệm vụ định dạng, gắn nhãn, lưu trữ và tra cứu các kết quả đã phân tích. Nhiệm vụ này đòi hỏi một lớp trừu tượng hóa các phương thức lưu trữ, cho phép khả năng linh hoạt trong việc lựa chọn vị trí lưu trữ. Ngoài ra, dịch vụ này cũng cung cấp các kết quả phân tích trong quá khứ (tra cứu) với đầu vào mô tả một bộ lọc, gồm tên camera và thời điểm trong quá khứ. Các dữ liệu kết quả trong quá khứ sẽ được tra cứu. Kết quả tại thời điểm gần với thời điểm được đưa ra trong bộ lọc nhất sẽ được trả về.

+ Dịch vụ web nằm trong nhóm các dịch vụ với nhiệm vụ cung cấp thông tin kết quả. Về mặt bản chất, dịch vụ này sẽ cung cấp thông tin kết quả qua môi trường web. Với mỗi loại yêu cầu, dịch vụ web sẽ liên hệ với các dịch vụ khác để thu thập kết quả tương ứng, sau đó tổng hợp lại và chuyển định dạng sang ngôn ngữ web phù hợp cho việc trình bày trên trình duyệt và gửi kết quả về người dùng.



**Hình 18.** Nguyên lý hoạt động của dịch vụ web.

Các đường dẫn của dịch vụ web được thiết kế theo quy chuẩn tài nguyên REST mang tính thống nhất:

/api cung cấp thông tin dạng chữ thuần túy. Dạng thông tin này giúp kết quả được truyền đi nhanh hơn, cũng như giúp việc phát triển ứng dụng tích hợp dễ dàng hơn (ứng dụng cho máy tính hoặc các thiết bị thông minh)

+ /api/<tên trạm thủy văn>/current\_water\_level: cung cấp thông tin mực nước của trạm thủy văn tại thời điểm mới nhất



+ /api/<tên trạm thủy văn>/history?time=yyyy-MM-dd-HH-mm-ss: cung cấp thông tin mực nước của trạm thủy văn gần nhất với thời điểm năm yyyy, tháng MM (2 chữ số), ngày dd (2 chữ số), giờ HH (dạng 24 giờ, 2 chữ số), phút mm (2 chữ số), giây ss (2 chữ số)

/img cung cấp thông tin dạng hình ảnh. Dạng thông tin này cho phép hiển thị trực quan hình ảnh gốc lẫn kết quả phân tích nếu có.

+ /img/<tên trạm thủy văn>/current\_water\_level: cung cấp hình ảnh mực nước của trạm thủy văn tại thời điểm mới nhất

+ /img/<tên trạm thủy văn>/history?time=yyyy-MM-dd-HH-mm-ss: cung cấp hình ảnh mực nước của trạm thủy văn gần nhất với thời điểm năm yyyy, tháng MM (2 chữ số), ngày dd (2 chữ số), giờ HH (dạng 24 giờ, 2 chữ số), phút mm (2 chữ số), giây ss (2 chữ số)

<tên trạm thủy văn> thể hiện trang web bao gồm hình ảnh lẫn kết quả phân tích cho trạm thủy văn.

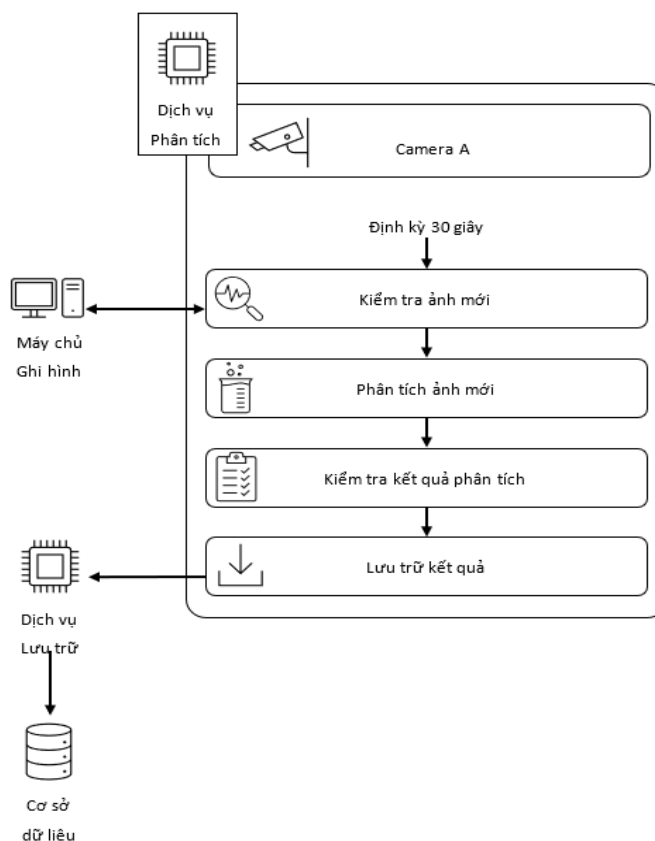
Dịch vụ phân tích sẽ đọc các cấu hình camera, sau đó khởi động các quy trình phân tích cho từng camera dựa trên những cấu hình này. Mỗi quy trình phân tích bao gồm một số bước và được lặp lại định kỳ sau một khoảng thời gian nhất định có thể cấu hình được.

Kiểm tra ảnh mới: tại bước này, dịch vụ sẽ tiến hành liên hệ đến máy chủ ghi hình để kiểm tra sự tồn tại của ảnh mới. Trong trường hợp có ảnh mới, ảnh này sẽ được tải về và gắn nhãn dựa trên thời điểm ghi hình. Ngược lại, trong trường hợp không có ảnh mới, điều này có nghĩa kết quả hiện tại là mới nhất và không cần làm gì thêm.

Sau khi ảnh mới được tải về, thuật toán nhận dạng và phân tích sẽ được triển khai trên ảnh và đưa ra kết quả.

Với kết quả phân tích thu thập được sau khi thuật toán hoàn thành, các bước kiểm tra kết quả sẽ được thực thi để đảm bảo kết quả là hợp lý và đúng định dạng.

Cuối cùng, các kết quả hợp lệ sẽ được chuyển sang dịch vụ lưu trữ và theo đó ghi vào cơ sở dữ liệu đã được cấu hình (Hình 19).



**Hình 19.** Quy trình xử lý ảnh từ trạm thủy văn để đọc thông tin tự động và ghi dữ liệu vào cơ sở dữ liệu.



### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Kết quả sản phẩm thu được

Sau khi lắp đặt, qua thời gian thử nghiệm, nhận thấy hiện nay hoạt động của hệ thống thu nhận được kết quả như mong muốn. Với đầy đủ các chức năng, vừa có thể xem hình ảnh thực và các ảnh gửi về đầy đủ, đảm bảo cho bước xử lý hình ảnh để đưa ra các số liệu thực. Đồng thời qua theo dõi nhận thấy với buổi tối ánh sáng kém, thời tiết xấu như mưa vẫn có thể thu nhận được các ảnh có chất lượng.

Đánh giá kết quả so với số liệu quan trắc thủ công:

- So sánh số đọc thủ công trực tiếp từ thủy chí và số liệu sử dụng camera trên nền tảng công nghệ AI cho kết quả tốt. Tỷ lệ số liệu bằng nhau chiếm trên 35%, sai số chênh lệch của hai phương pháp đo phần lớn dao động từ -0,5 cm đến 0,5 cm chiếm trên 75%. Kết quả đánh giá được trích xuất từ Báo cáo tại Hội thảo Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong lĩnh vực khí tượng thủy văn [19].

- So sánh giữa số liệu trích xuất thủ công từ giàn đồ máy Stevens và số liệu sử dụng camera, kết quả của hai phương pháp khá đồng nhất, chênh lệch của hai phương pháp đo phần lớn dao động từ 0,5 cm đến 1,5 cm trong phạm vi sai số cho phép. Kết quả đánh giá được trích xuất từ Báo cáo tại Hội thảo Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong lĩnh vực khí tượng thủy văn [19].

Tuy trong thời gian thử nghiệm (cho máy học) nhưng sai số chênh lệch nằm trong giới hạn cho phép, có thể áp dụng trong thực tế được.

#### 3.2. Nhược điểm, hạn chế và giải pháp

- Kết quả còn phụ thuộc vào đường truyền internet, 3G; phụ thuộc vào thời tiết khi mưa to, làm ảnh hưởng đến chất lượng hình ảnh. Giải pháp xử lý là tăng dung lượng đường truyền và chất lượng hình ảnh của camera.

- Độ chính xác có thể bị ảnh hưởng đối với các trạm bị bèo, rác bao quanh thủy chí. Giải pháp xử lý là che chắn thủy chí hoặc vớt bèo, rác che chắn quanh thủy chí.

- Đòi hỏi phải có vị trí lắp camera thuận lợi, camera phải cố định, chắc chắn, chịu được mưa to, gió lớn khi lắp đặt ngoài trời khi dùng để đọc trắc thủy chí. Giải pháp xử lý là thiết kế vị trí lắp đặt camera chắc chắn.

- Khoảng cách từ camera đến thủy chí không quá xa. Sẽ có khó khăn khi trạm thủy văn ở bãi lầy, có nhiều thủy chí. Giải pháp xử lý là có thể phải gắn thêm camera.

#### 3.3. Hiệu quả kinh tế

- Giải quyết được bài toán tinh giảm biên chế theo chủ trương của Đảng và Nhà nước, tiết kiệm được nguồn nhân lực; giải quyết bài toán thiếu hụt nhân sự, khó khăn trong việc tuyển dụng theo vị trí việc làm.

- Chi phí đầu tư để xây dựng công trình, trang thiết bị cho trạm quan trắc mực nước bằng camera kết hợp công nghệ AI thấp hơn nhiều so với mức đầu tư hiện tại. Đồng thời dễ thay thế, bảo dưỡng công trình, thiết bị.

#### 3.4. Ưu điểm, thuận lợi

- Đảm bảo độ chính xác của số liệu, khách quan, không bị chi phối bởi yếu tố chủ quan của người đọc.

- Có thể chuyển đổi số, tự động hóa các trạm quan trắc thủ công thành các trạm tự động trên cơ sở công trình chuyên môn hiện có.

- Khai thác số liệu thuận lợi, không quá khó khăn.

- Kinh phí để trang bị cho toàn bộ hệ thống camera, đường truyền số liệu... không quá lớn.

- Lắp đặt đơn giản, dễ dàng không đòi hỏi kỹ thuật quá cao.

- Giải quyết được bài toán trong thời gian dịch bệnh Covid-19, trạm nằm trong khu phong tỏa, quan trắc viên không đến trạm được. Giải pháp dùng camera để có ngay số liệu để phục vụ cho công tác dự báo, cảnh báo.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu xử lý nhận dạng hình ảnh thu được từ hệ thống camera trên cơ sở các thuật toán trí tuệ nhân tạo để tính toán xác định giá trị mực nước tự động tại các thời điểm, lưu trữ hình ảnh và số liệu tương ứng vào cơ sở dữ liệu tại máy chủ của Đài. Nghiên cứu cho thấy kết quả đảm bảo độ chính xác của số liệu, khách quan, không bị chi phối bởi yếu tố chủ quan của người đọc. Kết quả nghiên cứu cho thấy có thể ứng dụng để chuyển đổi số, để tự động hóa các trạm quan trắc thủ công hiện nay thành các trạm tự động trên cơ sở công trình chuyên môn hiện có.

Ngoài ra, để đẩy mạnh việc tự động hóa, số hóa, Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ đã chủ động phối hợp với Trường Đại học Khoa học Tự nhiên TP. Hồ Chí Minh nghiên cứu, sử dụng và phát triển các ứng dụng chuyên ngành trên nền trí tuệ nhân tạo.

**Đóng góp của tác giả:** Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: L.N.Q.; Lắp đặt camera thử nghiệm: P.H.Q.T.; Viết bản thảo bài báo: P.H.Q.T., N.N.Đ., T.T.D.; Thực hiện các thuật toán AI: T.M.T.; Thu thập, so sánh số liệu: N.N.Đ.; Chỉnh sửa bài báo: N.N.Đ., T.T.D., N.M.G.

**Lời cảm ơn:** Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ đã cho khai thác, sử dụng số liệu và các báo cáo; Cảm ơn Trường Đại học Khoa học Tự nhiên TP. Hồ Chí Minh đã phối hợp tốt để nhóm tác giả trình bày những kết quả nghiên cứu.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

#### Tài liệu tham khảo

1. Chỉ thị 16/CT-TTg của Thủ tướng Chính phủ về thực hiện các biện pháp cấp bách phòng, chống dịch Covid-19.
2. Thúc, N.D. Trí tuệ nhân tạo – Lập trình tiến hóa. Nhà xuất bản Giáo dục, 1995.
3. Thủy, N.T. Trí tuệ nhân tạo – Các phương pháp giải quyết vấn đề và kỹ thuật xử lý tri thức. Nhà xuất bản Giáo dục, 1995.
4. Luger, G.F.; William, A. Stubblefield – Albuquerque – Artificial Intelligence. Wesley Publishing Company, Inc, 1997.
5. Toại, B.X.; Việt T.G. Trí tuệ nhân tạo – Các cấu trúc và chiến lược giải quyết vấn đề. Nhà xuất bản Thông kê, 2000 (Phần I và Phần II).
6. Geogre, F. Luger – Artificial Intelligence, Structures and Strategies for Complex Problem Solving– Addison – Wesley Publishing Company, Inc, 2002.
7. Tom, M. Mitchell – Machine Learning – McGraw Hill, Inc.
8. Phương, P.L. và cs. Nghiên cứu, xây dựng công cụ nhận dạng và số hóa các giản đồ tự ghi khí tượng thủy văn. Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ. Mã số TNMT.2018.05.16, 2018.
9. Thái, T.H.; Khiêm, M.V.; Thủy, N.B.; Hà, B.M.; Ngọc, P.K. Xây dựng mô hình mạng nơ-ron hồi quy dự báo độ cao sóng có nghĩa tại trạm Cồn Cỏ, Quảng Trị, Việt Nam. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2022**, EME4, 73–84.
10. Chinh, T.H.; Lâm, H.P.; Thăng, V.V.; Kiên, T.B. Thử nghiệm khả năng dự báo số ngày nắng nóng trên lãnh thổ Việt Nam bằng mạng thần kinh nhân tạo. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2022**, 741, 98–105.
11. Thanh, N.C; Giang, N.T. Xây dựng mô hình máy học LSTM (Long Short Term Memory) phục vụ công tác dự báo mặn tại trạm đo mặn Đại Ngãi. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2022**, 740(1), 98–104.

12. Quyền, L.N. và cs. Nghiên cứu, xây dựng và triển khai thử nghiệm hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt đô thị dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo tại Thành phố Hồ Chí Minh. Báo cáo tổng kết đề tài NCKH cấp Thành phố, 2022.
13. Le, Q.C.; Le, M.Q.; Tran, M.K.; Le, N.Q.; Tran, M.T. FL-Former: Flood Level Estimation with Vision Transformer for Images from Cameras in Urban Areas. *LNCS 2023*, 13833, 408–419.
14. Quyết định 749/QĐ-TTg ngày 03 tháng 6 năm 2020 của Thủ tướng Chính phủ phê duyệt “Chương trình Chuyển đổi số quốc gia đến năm 2025, định hướng đến năm 2030”.
15. <http://vnmha.gov.vn/kttv-voi-san-xuat-va-doi-song-106/ung-dung-chuyen-doi-so-nang-tam-du-bao-canh-bao-khi-tuong-thuy-van-13999.html>.
16. <http://vnmha.gov.vn/chi-dao-dieu-hanh-103/tong-cuc-khi-tuong-thuy-van-daymanh-ung-dung-tri-tue-nhan-tao-trong-linh-vuc-khi-tuong-thuy-van-14112.html>.
17. Quyết định số 1970/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược phát triển ngành khí tượng thủy văn đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045.
18. Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Nam Bộ. Báo cáo Tổng kết công tác năm 2022, 2022.
19. Tổng cục Khí tượng Thủy văn. Hội thảo “Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong lĩnh vực khí tượng thủy văn” tổ chức tại Tổng cục KTTV, ngày 22/9/2021.
20. Bonafilia, D.; Tellman, B.; Anderson, T.; Issenberg, E. Sen1floods11: a georeferenced dataset to train and test deep learning flood algorithms for sentinel-1. In: 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). 2020, pp. 835–845.

## Applying AI in water level measurement by Camera

Nguyen Nam Duc<sup>1\*</sup>, Le Ngoc Quyen<sup>1</sup>, Pham Ho Quoc Tuan<sup>1</sup>, Nguyen Minh Giam, Tran Minh Triet<sup>2</sup>, Tran Tien Dung<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Southren Regional Hydrometeorological Center; nngnamduc@gmail.com; quyentccb@gmail.com; phamhoquoctuan@yahoo.com; nmg@kttvnb.vn

<sup>2</sup> University of Science, VNU-HCM, Ho Chi Minh City, Viet Nam National University; tmtriet@hcmus.edu.vn

<sup>3</sup> Office of Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration; dungtranca5@gmail.com

**Abstract:** Researching and processing image recognition obtained from the camera system on the basis of artificial intelligence algorithms (AI) to convert manual water level monitoring stations into automatic water level monitoring stations. Simultaneously, combining information technology to collect and connect water level monitoring data from hydrological stations to enhance the quantity and quality of data provided for hydrological forecasting models. This study meets the requirements of digital transformation and automation of manual monitoring stations into automatic stations on the basis of existing professional works, while saving human resources at hydro-meteorological stations. ; solve the problem of shortage of personnel, difficulties in recruiting human resources for stations according to job positions.

**Keywords:** Camera; Hydrometeorology; Artificial intelligence; AI.

# Table of content

- 1** Quyet, L.D.; Giam, N.M.; Nhan, H.M.; Hung, T.X.; Hien, L.X.; Tuyet, N.T. Analysis of correlation between supplementary water levels and water levels at Southwest coastal water stations. *VN J. Hydrometeorol.* **2023**, 747, 1–8.
- 9** Quang, L.T.; Dung, L.D.; Anh, T.N. Simulation and development of flood maps in downstream of Dong Nai River system. *VN J. Hydrometeorol.* **2023**, 747, 9–20.
- 21** Giam, N.M.; Quyen, L.N.; Duc, N.N.; Thanh, D.Q.; Quyet, L.D.; Nguyen, N.N.; Chi, N.T.P. The main causes of flooding in Ho Chi Minh City. *VN J. Hydrometeorol.* **2023**, 747, 21–36.
- 37** Lam, D.H.; Dinh, N.P.; Sy, N.V. Developed a saline intrusion forecasting plan on the main river in Ben Tre. *VN J. Hydrometeorol.* **2023**, 747, 37–53.
- 54** Ha, D.T.V. Trending of rainfall and temperature in Kien Giang Province. *VN J. Hydrometeorol.* **2023**, 747, 54–69.
- 70** Hoat, D.H.; Quyen, L.N.; Hong, V.D.; Thanh, N.C. Building rainfall estimation tool from radar reflectivity using artificial intelligence technique. *VN J. Hydrometeorol.* **2023**, 747, 70–80.
- 81** Quyen, L.N.; Hung, N.V.; Long, D.T.; Quyet, L.D.; Dong, N.P.; Thanh, D.Q.; Dung, L.M.; Thao, N.T.T.; Trang, H.T.P.; Hoat, D.H. Research, build and test the urban flood early warning system based on artificial intelligence in Ho Chi Minh City. *VN J. Hydrometeorol.* **2023**, 747, 81–97.
- 98** Anh, D.T.L. The study on changes in intra–season rainfall characteristics in the Southern Vietnam. *VN J. Hydrometeorol.* **2023**, 747, 98–112.
- 113** Duc, N.N.; Quyen, L.N.; Tuan, P.H.Q.; Giam, N.M.; Triet, T.M.; Dung, T.T. Applying AI in water level measurement by Camera. *VN J. Hydrometeorol.* **2023**, 747, 113–126.