



Original Article

## Observations and Numerical Simulation of Storm Surge during Typhoon Kajiki (August 2025)

Nguyen Ba Thuy<sup>1</sup>, Pham Van Tien<sup>2</sup>, Nguyen Kim Cuong<sup>3,\*</sup>,  
Vu Hai Dang<sup>4</sup>, Bui Manh Ha<sup>1</sup>, Duong Ngoc Tien<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Center for Hydro-Meteorological Forecasting, 24 Huynh Thuc Khang, Lang, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Institute of Meteorology, Hydrology and Climate Change, 62 Nguyen Chi Thanh, Lang, Hanoi, Vietnam

<sup>3</sup>VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

<sup>4</sup>Institute of Earth Sciences, VAST, 68 Huynh Thuc Khang, Lang, Hanoi, Vietnam

Received 25<sup>th</sup> August 2025

Revised 15<sup>th</sup> October 2025; Accepted 30<sup>th</sup> October 2025

**Abstract:** In this study, the storm surge associated with Typhoon No. 5 (Kajiki, August 2025) was analyzed using both observational data and numerical model simulations. Observational data from the Hon Ngu and Hon Dau oceanographic stations were selected for analysis. The simulations were conducted using the SuWAT model, an integrated numerical system that couples tides, wind waves, and storm surge processes. The results indicate that at the Hon Ngu station, the observed water level reached 3.99 m, with a maximum storm surge of 2.31 m - the highest value recorded over the past 30 years. At the Hon Dau station, although located far from the typhoon center, the maximum storm surge still reached 0.63 m. The maximum surge at Hon Ngu occurred when the typhoon center was approximately 80 km offshore, whereas at Hon Dau it happened when the typhoon center had moved about 50 km inland. At Hon Ngu, the surge induced solely by atmospheric pressure reduction was approximately 0.5 m; however, it occurred after the peak total surge.

**Keywords:** Kajiki typhoon; Storm surges; SWAT model; Hon Ngu.

\* Corresponding author.

E-mail address: [cuongnk@hus.edu.vn](mailto:cuongnk@hus.edu.vn)

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5391>

## Quan trắc và mô phỏng số trị hiện tượng nước dâng do bão Kajiki (8/2025)

Nguyễn Bá Thủy<sup>1</sup>, Phạm Văn Tiến<sup>2</sup>, Nguyễn Kim Cương<sup>3,\*</sup>  
Vũ Hải Đăng<sup>4</sup>, Bùi Mạnh Hà<sup>1</sup>, Dương Ngọc Tiến<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trung tâm Dự báo Khí tượng thủy văn Trung ương, 24 Huỳnh Thúc Kháng, Láng, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu, 62 Nguyễn Chí Thanh, Láng, Hà Nội, Việt Nam

<sup>3</sup>Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội,

334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

<sup>4</sup>Viện Các Khoa học Trái đất, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam,

68 Huỳnh Thúc Kháng, Láng, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 25 tháng 8 năm 2025

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

**Tóm tắt:** Trong nghiên cứu này, diễn biến nước dâng trong bão số 5 (Kajiki, 8/2025) được phân tích từ số liệu quan trắc và kết quả mô phỏng từ mô hình số trị. Số liệu quan trắc từ trạm hải văn Hòn Ngur và Hòn Dấu được lựa chọn để phân tích. Mô phỏng được thực hiện bằng mô hình số trị tích hợp thủy triều, sóng biển và nước dâng do bão (SuWAT). Kết quả phân tích cho thấy, tại trạm hải văn Hòn Ngur ghi nhận mực nước quan trắc 3,99 m, với nước dâng do bão lớn nhất 2,31 m, cao nhất trong vòng 30 năm qua. Tại Hòn Dấu, mặc dù ở vị trí rất xa tâm bão nhưng cũng ghi nhận nước dâng do bão cao 0,63 m. Bão số Kajiki gây nước dâng lớn nhất tại Hòn Ngur ở thời điểm tâm bão còn cách trạm khoảng 80 km và tại Hòn Dấu khi tâm bão đi sâu vào bờ khoảng 50 km. Tại Hòn Ngur, nước dâng do độ giảm khí áp lớn nhất khoảng 0,5 m, tuy nhiên thời gian xuất hiện muộn hơn thời điểm nước dâng tổng hợp cao nhất.

**Từ khóa:** Bão Kajiki, nước dâng do bão, mô hình SuWAT, trạm Hòn Ngur.

### 1. Mở đầu

Bão là thiên tai nguy hiểm mà hệ quả là hiện tượng ngập lụt vùng ven biển, xói lở bờ và xâm nhập mặn do nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn, nhất là trong bối cảnh biến đổi khí hậu, được nhận định sẽ có nhiều bão mạnh/siêu bão với diễn biến bất thường có thể ảnh hưởng tới đất liền Việt Nam. Trên thế giới, lịch sử đã chứng kiến nhiều cơn bão gây nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn làm ngập vùng ven bờ trên diện rộng: Bão Katrina đổ bộ vào thành phố New

Orleans - Mỹ tháng 8 năm 2005 gây nước dâng cao từ 5-9 m làm khoảng 1.800 người chết, thiệt hại 81,2 tỷ đô la với nguyên nhân chủ yếu do ngập lụt bởi nước dâng cao [1]; Bão Nargis đổ bộ vào Myanmar tháng 5 năm 2008, là cơn bão gây thương vong về người nhiều nhất trong lịch sử Myanmar, số người chết tới 90.000 và hơn 56.000 người mất tích, ước tính thiệt hại khoảng 10 tỷ đô la; Siêu bão Haiyan với cấp 17 đổ bộ vào Phillipine đã làm chết hơn 7.000 người, trong đó chủ yếu bởi ngập lụt do nước dâng bão

\* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: cuongnk@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5391>

cao tới 5 m đúng vào thời điểm thủy triều cao [2]. Tại Việt Nam, lịch sử đã ghi nhận nhiều cơn bão gây nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn làm tràn, vỡ đê, gây ngập lụt trên diện rộng. Riêng giai đoạn từ năm 2005 đến nay đã có một loạt cơn bão đổ bộ vào thời điểm triều cường với nước dâng bão cao từ 1-2 m làm vỡ đê, gây ngập úng nghiêm trọng (Washi - 2005 tại Hải Phòng; Damrey - 2005 tại Nam Định; Xangsane - 2006 và Ketsana - 2009 tại Huế và Đà Nẵng; Kalmaegy - 2014 tại Quảng Ninh; Doksuri - 2017 tại Nghệ An - Hà Tĩnh; Vamco - 2020 tại Quảng Bình - Quảng Trị). Bão Doksuri (7/2017) đổ bộ vào ven biển Nghệ An - Hà Tĩnh đúng thời điểm ven biển Bắc Bộ đang kỳ triều cao đã gây nước dâng tràn ngập nhiều tuyến đê biển từ Hải Phòng tới Hà Tĩnh làm ngập úng nhiều khu vực trung [2]. Bão Yagi (9/2024) đổ bộ vào Quảng Ninh Hải Phòng đã gây nước dâng lớn nhất tới gần 2,0 m tại Trà Cổ (Quảng Ninh), tuy nhiên, do bão đổ bộ vào kỳ thủy triều thấp nên không gây ngập lụt tại ven biển khu vực bão ảnh hưởng [3]. Bên cạnh đó, cũng có nhiều trường hợp bão có cường độ không mạnh nhưng đổ bộ vào kỳ triều cường cũng gây ngập úng ven biển, ví dụ như bão SinLaku tháng (7/2020) đổ bộ vào Nghệ An với cường độ cấp 8 [4].

Nước biển dâng trong bão phụ thuộc vào các tham số bão (độ giảm áp ở tâm, cấu trúc trường gió, hướng và tốc độ di chuyển), địa hình vùng bờ (độ sâu và hình dạng đường bờ), thủy triều và sóng biển. Thông thường, nước dâng do bão lớn nhất xuất hiện ở khoảng thời gian bão đổ bộ vào bờ. Tuy nhiên, nghiên cứu của Phạm Trí Thức (2021) về dao động bất thường của mực nước biển tại một số trạm hải văn ở ven biển Bắc Bộ và Bắc Trung Bộ trong vòng 30 năm từ số liệu quan trắc đã phát hiện, nhiều cơn bão gây nước dâng lớn nhất trước và sau khi bão đổ bộ vào bờ nhiều giờ [5]. Nghiên cứu của Thuy và cộng sự (cs) (2020) về nước dâng trong bão Kalmaegy (9/2014) đổ bộ vào Quảng Ninh cho thấy, nước dâng chỉ xuất hiện sau khoảng thời gian bão đã vào bờ từ 8 - 10 giờ và duy trì nước dâng cao trong khoảng từ 6 - 8 giờ, nguyên nhân do bởi vẫn tồn tại trường gió mạnh hướng vuông góc với bờ sau khi bão tan [6]. Bão Doksuri (9/2017)

đổ bộ vào Hà Tĩnh - Quảng Bình, nhưng gây nước dâng cao tới 0,78 m tại Hòn Dấu (Hải Phòng). Thời gian bão ảnh hưởng ven biển Bắc Bộ đang kỳ triều cường, nước dâng do bão cao kết hợp với triều cường đã gây ngập các khu vực trung, thấp, đường giao thông ở ven biển, ven sông suối từ Hải Phòng tới Hà Tĩnh [2].

Các nghiên cứu về nước dâng và sóng trong bão và hệ quả ngập lụt vùng ven biển đã được tiến hành từ lâu và nhiều phương pháp, công nghệ và quy trình dự báo được xây dựng phục vụ quy hoạch và dự báo phục vụ ứng phó. Đối với mô phỏng nước dâng do bão, gần đây xu hướng sử dụng mô hình số trị có xét tới tương tác nước dâng, sóng và thủy triều (mô hình tích hợp) đang được quan tâm do có nhiều ưu việt so với phương pháp truyền thống (chỉ xét tới tác động của gió và khí áp). Với mô hình tích hợp, tác động của sóng tới nước dâng bão được thể hiện qua ứng suất bề mặt do sóng và ứng suất bức xạ sóng tại vùng ven bờ. Một vài nghiên cứu đã kiểm tra tác động của ứng suất bề mặt do sóng cho thấy mô hình tích hợp đã cải thiện đáng kể kết quả tính toán nước dâng bão khi so với số liệu quan trắc, nhất là đối với khu vực ven bờ [7, 8]. Đã có nhiều mô hình số trị dự báo nước dâng có xét tới ảnh hưởng của ứng suất bức xạ sóng [7-10]. Funakoshi và cs (2008) kết hợp mô hình mô phỏng nước dâng bão ADCIRC và mô hình sóng SWAN và cho thấy nước dâng do sóng có thể đóng góp từ 10-15% vào mực nước dâng cực trị trong bão [7]. Nghiên cứu của Chen và cs (2010) đưa ra kết luận rằng, trong cơn bão Katrina năm 2005 tại Hoa Kỳ, nước dâng do các hiệu ứng sóng ven bờ chiếm tới 80% mực nước dâng cực trị trong khi các ảnh hưởng khác như thủy triều, sóng bề mặt và nước dâng do gió chỉ đóng góp 20% [10]. Kim và cs (2010) đã xây dựng mô hình tích hợp nước dâng, sóng và thủy triều (SuWAT-Surge Wave and Tide), có thiết kế lưới lồng để tính toán nước dâng do bão. Mô hình đã được áp dụng tính nước dâng bão tại vịnh Tosa - Nhật Bản và cho kết quả rất phù hợp với số liệu đo đạc, trong khi trước đó rất nhiều mô hình không tính đến nước dâng do sóng đều cho kết quả thấp hơn [9].

Tại Việt Nam, mô hình số trị tích hợp thủy triều, sóng và nước dâng do bão được phát triển bởi Kim và cs (2010) đã ứng dụng nghiên cứu rộng rãi [2, 5, 11-16]. Mặc dù sử dụng lưới không gian có độ phân giải còn thô, tuy nhiên các nghiên cứu trên đều chỉ ra rằng sóng biển đóng góp một phần đáng kể tới độ lớn nước dâng và ngập lụt ven bờ do bão.

Bão số 5 (8/2025) với tên quốc tế là Kajiki với quỹ đạo như trên hình 1, được hình thành từ một áp thấp nhiệt đới vào tối ngày 22/8/2025 trên khu vực phía Đông đảo Luzon (Philippines). Khi bắt đầu đi vào vùng biển phía Đông khu vực Bắc Biển Đông, cường độ bão mạnh cấp 8, giật cấp 10 và di chuyển nhanh vào phía bờ biển Việt Nam với tốc độ khoảng 25 km/h. Trong quá trình di chuyển, cường độ bão liên tục mạnh thêm, đến sáng sớm ngày 24/8/2025, cường độ bão mạnh lên cấp 12, giật cấp 15. Chiều tối cùng ngày 24/8/2025, khi tới khu vực phía Tây Bắc của đặc khu Hoàng Sa, cường độ bão tăng lên cấp 14, giật cấp 16 và tốc độ di chuyển lại chậm lại, với tốc độ 15-20 km/h và theo hướng Tây Tây Bắc. Vào trưa ngày 25/8/2025, bão di chuyển vào vùng biển ven bờ khu vực Nghệ An - Hà Tĩnh,

cường độ bão giảm xuống cấp 13, giật cấp 15. Sau đó bão tiếp tục di chuyển chậm hơn và lệch về phía Nam, cường độ bão giảm xuống cấp 11 - 12, giật cấp 14. Chiều tối ngày 25/8/2025, bão số 5 đi vào đất liền khu vực Nam Nghệ An - Bắc Hà Tĩnh, cường độ bão giảm xuống cấp 10-11, giật cấp 13, di chuyển theo hướng Tây Tây Bắc với tốc độ khoảng 10 - 15 km/h. Đêm 25/8, bão di chuyển đến khu vực biên giới Việt-Lào, cường độ bão giảm xuống cấp 8, giật cấp 10, đến sáng sớm ngày 26/8 khi di chuyển sang khu vực Trung Lào thì bão Kajiki suy yếu thành ATNĐ, sau tiếp tục suy yếu thành vùng áp thấp [17].

Do ảnh hưởng của bão số 5, một loạt các trạm khí tượng hải văn ở các đảo và ven biển từ Quảng Ninh tới Hà Tĩnh đã ghi nhận tốc độ gió từ cấp từ cấp 7 tới cấp 10: Cô Tô (Quảng Ninh) 20 m/s; Bạch Long Vĩ (Hải Phòng) 17 m/s; Văn Lý (Ninh Bình) 24 m/s; Sầm Sơn (Thanh Hoá) 13 m/s; Hòn Ngư và Diễn Châu (Nghệ An) tương ứng là 23 m/s và 26,7 m/s; Kỳ Anh (Hà Tĩnh) 20 m/s; Cồn Cỏ (Quảng Trị) 17 m/s. Tại khu vực đất liền ven biển, khí áp thấp nhất quan trắc được tại trạm Hà Tĩnh là 979,4 HpA vào lúc 17h59 ngày 25/8 [17].



Hình 1. Đường đi của cơn bão Kajiki [17].

Bão Kajiki đã gây ra sóng lớn trên khu vực biển Bắc Trung Bộ và Bắc Bộ. Theo số liệu quan trắc sóng từ trạm ra đa biển cho thấy: trong phạm vi 20 km tính từ trạm Nghi Xuân (Hà Tĩnh) sóng

cao 6 - 8 m và trong phạm vi 50 km tính từ trạm Đồng Hới (Quảng Trị) sóng cao 7 - 9 m. Tại các trạm khí tượng hải văn đã ghi nhận sóng cao 6-7 m tại trạm Hòn Ngư (Nghệ An); 3,5-4,5 m tại Cô

Tô (Quảng Ninh); và 2,5-3,5 m tại Hòn Dấu (Hải Phòng) [17]. Nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn làm ngập lụt tại nhiều khu vực trũng, đường giao thông ven biển, ven sông, phá hủy nhiều cơ sở hạ tầng ven biển tại các tỉnh Từ Thanh Hoá tới Hà Tĩnh. Tại một số khu vực ở Nghệ An mực nước biển dâng cao đã vượt cao trình đê (Hình 2a) gây ngập trên diện rộng. Tại một số khu vực ven biển ở Thanh Hoá đã ghi nhận sóng tràn qua đê, kè, đường giao thông gây ngập trong đất liền

hàng trăm mét (Hình 2b), nhiều cơ sở hạ tầng ven biển bị phá hủy (Hình 3).

Trong nghiên cứu này sẽ tập trung phân tích diễn biến nước dâng trong bão Kajiki (8/2025) tại Hòn Ngur (Nghệ An) và Hòn Dấu (Hải Phòng) và với mối liên hệ với tốc độ gió, khí áp quan trắc và khoảng cách tâm bão tới trạm. Mô hình số trị tích hợp thủy triều, sóng và nước dâng do bão (mô hình SuWAT) được ứng dụng để mô phỏng và đánh giá vai trò của các thành phần gây nước dâng do bão.



(a)



(b)

Hình 2. Ngập lụt tại Cửa Lò, Nghệ An (a) và Sầm Sơn, Thanh Hoá (b) do nước biển dâng cao trong bão Kajiki [18, 19].



(a)



(b)

Hình 3. Kè biển (a) và biểu tượng du lịch (b) tại Hải Tiến, Thanh Hoá bị sóng trong bão Kajiki làm hư hại [20].

## 2. Số liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Số liệu

Để phân tích diễn biến về bão và nước dâng trong bão Kajiki, số liệu về quỹ đạo và tham số

bão được thu thập từ Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn quốc gia. Trong khi đó, số liệu quan trắc gió, khí áp và mực nước tại Hòn Ngur và Hòn Dấu trong thời gian bão Kajiki ảnh hưởng được thu thập và phân tích. Lý do nghiên cứu này

lựa chọn các trạm Hòn Dấu và Hòn Ngự để phân tích do bởi tại hai trạm này mực nước được quan trắc trong giếng triều tự động nên có độ tin cậy cao. Trong dải ven biển bão Kajiki ảnh hưởng cũng có một số trạm hải văn quan trắc mực nước như Sầm Sơn (Thanh Hoá), Hoành Sơn (Hà Tĩnh), tuy nhiên, tại hai trạm này mực nước được quan trắc bằng mắt trên thước ngắm nên sẽ có nhiều sai số, nhất là trong trường hợp có sóng lớn và gió mạnh khi có bão.

## 2.2. Phương pháp tính toán

Để xác định độ lớn nước dâng do bão từ mực nước quan trắc, phương pháp phân tích điều hoà được sử dụng để dự tính thủy triều, nước dâng

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial x} = fN - \frac{1}{\rho_w} d \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_s^x - \tau_b^x + F_x) + A_h \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{NM}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial y} = -fM - \frac{1}{\rho_w} d \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{\rho_w} (\tau_s^y - \tau_b^y + F_y) + A_h \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Với:  $\eta$ : mực nước bề mặt;  $M$ ,  $N$ : thông lượng trung bình theo độ sâu, theo hướng  $x$  và  $y$ ;  $f$ : tham số Coriolis;  $P$ : áp suất khí quyển;  $d$ : độ sâu tổng cộng  $d = \eta + h$ , với  $h$  là độ sâu mực nước tĩnh;  $A_h$ : hệ số khuếch tán rối theo phương ngang;  $\rho_w$ : mật độ nước;  $\tau_b$ ,  $\tau_s$ : ứng suất ma sát đáy và bề mặt;  $F_x$ ,  $F_y$ : ứng suất sóng được bổ sung để xét nước dâng do sóng, được tính từ mô hình SWAN theo các công thức dưới đây

$$F_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}; F_y = -\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad (4)$$

$$S_{xx} = \rho g \iint \left[ \frac{C_g}{C} \cos^2 \theta + \frac{C_g}{C} - \frac{1}{2} \right] E d\sigma d\theta \quad (5)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \rho g \iint [\cos \theta \sin \theta] E d\sigma d\theta \quad (6)$$

$$S_{yy} = \rho g \iint \left[ \frac{C_g}{C} \sin^2 \theta + \frac{C_g}{C} - \frac{1}{2} \right] E d\sigma d\theta \quad (7)$$

Với:  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yx}$  là ứng suất sóng;  $C$  và  $C_g$  tương ứng là vận tốc pha và vận tốc nhóm sóng;  $\sigma$ ,  $\theta$  là tần xuất góc và hướng truyền;  $E$  là mật độ

do bão được xác định bằng cách loại thủy triều từ mực nước quan trắc (Nước dâng do bão = Mực nước quan trắc - Thủy triều).

Đối với mô phỏng nước dâng do bão từ mô hình số trị, trong nghiên cứu này sử dụng mô hình tích hợp thủy triều, sóng biển và nước dâng do bão (SuWAT-Surge, Wave, and Tide) để tính toán nước dâng do bão. SuWAT là mô hình liên hợp (couple) dự tính đồng thời cả thủy triều, sóng biển và nước dâng do bão. Mô hình này được xây dựng tại Đại học Kyoto - Nhật Bản, bao gồm 2 mô hình thành phần là mô hình dựa trên hệ phương trình nước nông 2 chiều có tính đến nước dâng do ứng suất sóng và mô hình SWAN tính toán sóng. Hệ phương trình cơ bản của mô hình nước nông 2 chiều được mô tả như sau:

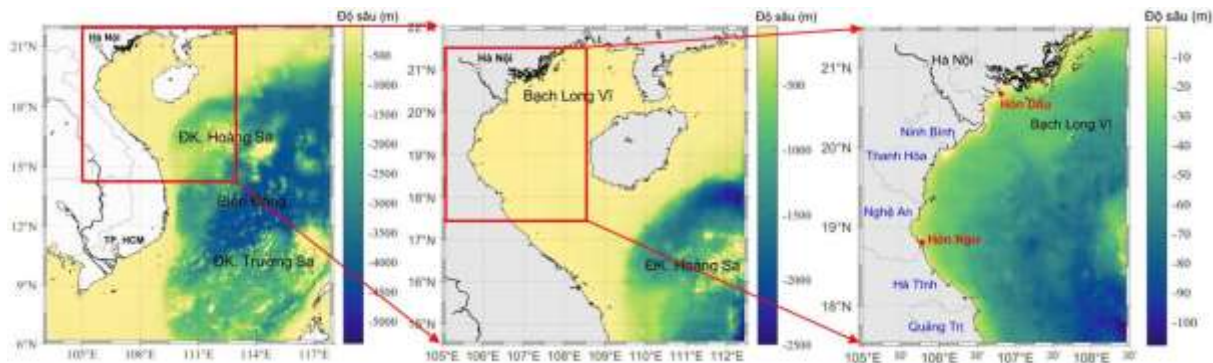
năng lượng phổ. Các tham số tại các công thức (5) - (7) được định nghĩa trong cơ sở lý thuyết của mô hình SWAN [3]. Mô hình SuWAT được thiết lập tính toán trên lưới lồng với cấu trúc minh họa như trên Hình 1. Cơ sở lý thuyết của mô hình SuWAT được trình bày chi tiết trong các công trình [8, 9].

Nghiên cứu này sử dụng mô hình SuWAT phiên bản được thiết lập cho dự báo nghiệp vụ nước dâng do bão tại Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn quốc gia sau khi đã được hiệu chỉnh và kiểm định trong một số nghiên cứu [6, 11, 12], với thông tin về miền và lưới tính như trên Bảng 1 và Hình 4. Các hệ số cho mô hình bao gồm hệ số nhám Manning  $n=0,025$ , hệ số ma sát đáy cho mô hình SWAN  $C_f=0,032$  và hệ số kéo của gió được xác định theo công thức của Janssen, 1991 [21]. Trường gió và khí áp trong bão Kajiki làm đầu vào cho tính nước dâng do bão được mô phỏng từ mô hình WRF đang chạy nghiệp vụ dự báo tại Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn quốc gia với độ phân giải chi tiết 3 km cho khu vực Biển Đông và đất liền Việt Nam [11, 12].



Bảng 1. Thông tin về miền và lưới tính của mô hình

| Lưới tính | Phạm vi                            | Độ phân giải (m)                     | Số điểm lưới theo kinh và vĩ độ |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|
| D1        | 103.0° - 120°E<br>6° - 22°N        | $\Delta x = \Delta y = 7400\text{m}$ | 226 x 211                       |
| D2        | 105.0° - 112.5°E<br>14.5° - 22.0°N | $\Delta x = \Delta y = 1850\text{m}$ | 450 x 450                       |
| D3        | 105.0° - 108.5°E<br>17.5° - 21.5°N | $\Delta x = \Delta y = 925\text{m}$  | 420 x 480                       |



Hình 4. Địa hình các miền tính D1, D2, D3.

### 3. Kết quả và thảo luận

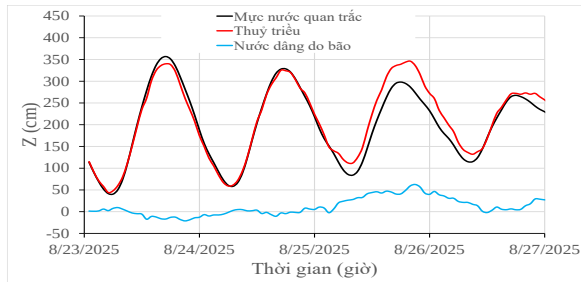
#### 3.1. Diễn biến nước dâng trong bão Kajiki từ số liệu quan trắc

Về diễn biến mực nước, trên Hình 5a-b thể hiện dao động của mực nước quan trắc, thủy triều dự tính và nước dâng do bão (lược bỏ thủy triều từ số liệu quan trắc) tại Hòn Dấu và Hòn Ngur trong thời gian bão Kajiki ảnh hưởng. Có thể thấy rằng, bão Kajiki đổ bộ vào khoảng thời gian ven biển Bắc Bộ và Bắc Trung Bộ đang kỳ triều trung bình, thời gian thủy triều cao nhất trong ngày tại Hòn Dấu là 18 giờ, Hòn Ngur là 17 giờ. Mặc dù bão đổ bộ không phải vào ngày triều cường và thời điểm nước dâng do bão lớn nhất không trùng với đỉnh triều, nhưng bão Kajiki đã gây mực nước biển rất cao tại Hòn Ngur với mực nước quan trắc cao nhất là 3,99 m lúc 16 giờ ngày 25/8/2025, cao nhất tại trạm này trong vòng 30 năm trở lại đây. Lưu ý rằng, Trong vòng 30 năm qua tới thời điểm bão Kajiki, trạm Hòn Ngur đã ghi hai cơn bão gây nước dâng lớn làm ngập lụt trên diện rộng ở dải ven biển Bắc Trung Bộ, đó là bão Wukong (9/2000) mực nước cao nhất 3,68 m và bão Doksuri (9/2017) 3,57 m [2, 6].

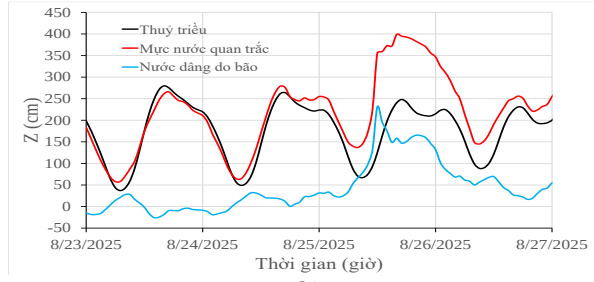
Mực nước biển dâng cao kèm theo sóng tràn trong bão Kajiki đã gây ngập nhiều tuyến đường giao thông ven biển ở Nghệ An và Hà Tĩnh (Hình 1). Kết quả phân tích xác định trên Hình 3 cho thấy, tại Hòn Ngur ghi nhận nước dâng do bão cao nhất 2,31 m lúc 12 giờ ngày 25/8/2025, đây là cũng là kỷ lục nước dâng do bão ghi nhận được ở các trạm hải văn của Việt Nam trong 30 năm qua. Mặc dù có cường độ bão nhỏ hơn bão Yagi (9/2024) (1,99 m tại Trà Cỏ, Quảng Ninh) [3], nhưng nước dâng do bão Kajiki lớn hơn, nguyên nhân do bởi bão Kajiki đi vào vùng biển thoáng, không có che chắn. Rất may mắn nước dâng do bão lớn nhất tại Hòn Ngur không trùng với thời điểm thủy triều cao nhất trong ngày. Tại trạm Hòn Dấu mặc dù nằm rất xa vị trí bão đổ bộ nhưng nước dâng lớn nhất ghi nhận lúc 22 giờ ngày 25/7/2025 là 0,63 m, mặc dù nước dâng tại Hòn Dấu tương đối lớn, tuy nhiên, do bão đổ bộ vào kỳ triều trung bình nên không ghi nhận hiện tượng ngập lụt tại ven biển Hải Phòng. Không chỉ gây nước dâng kỷ lục, bão Kajiki đã gây nước dâng lớn trong một khoảng thời gian rất dài tại Hòn Ngur. Thời gian ghi nhận nước dâng lớn hơn 0,5 m là 18 giờ, từ 8 giờ ngày 25 tới 14 giờ ngày

26 tháng 8 năm 2025 (Hình 3b). Nguyên nhân nước dâng do bão lớn và kéo dài do bão Kajiki có cường độ rất mạnh và di chuyển chậm khi tâm bão cập bờ. Thời gian xuất hiện nước dâng lớn nhất cũng khác biệt ở từng trạm quan

trắc do khoảng cách tới tâm bão, nước dâng lớn nhất ghi nhận tại Hòn Dấu lúc 22 giờ ngày 25/8, trong khi đó tại Hòn Ngự xuất hiện sớm hơn, vào 12 giờ ngày 25/8.

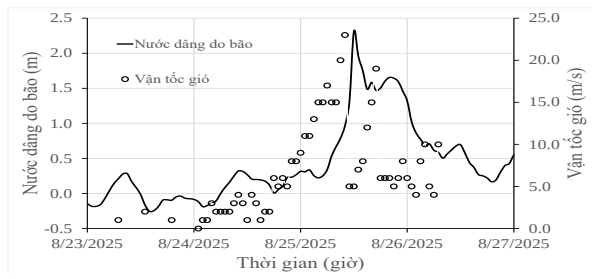


(a)

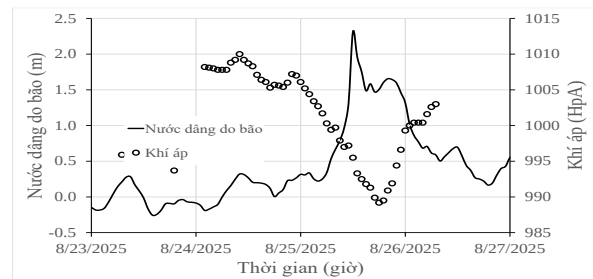


(b)

Hình 5. Diễn biến mực nước quan trắc, thủy triều và nước dâng do bão tại Hòn Dấu (a), Hòn Ngự (b) trong bão Kajiki.

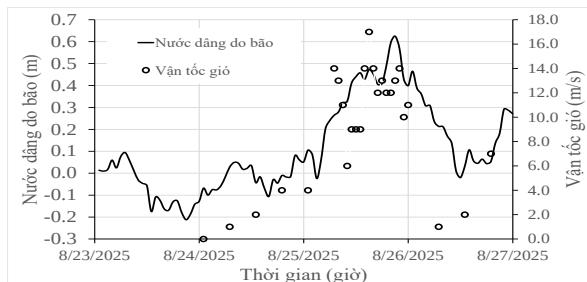


(a)

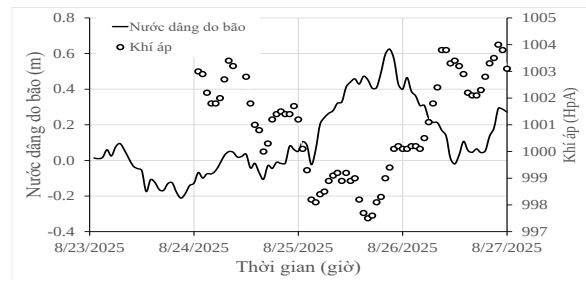


(b)

Hình 6. Diễn biến nước dâng do bão và tốc độ gió quan trắc (a), nước dâng do bão với khí áp (b) tại Hòn Ngự trong bão Kajiki.



(a)



(b)

Hình 7. Diễn biến nước dâng do bão và tốc độ gió quan trắc (a), nước dâng do bão với khí áp (b) tại Hòn Dấu trong bão Kajiki.

Diễn biến độ lớn nước dâng do bão với tốc độ gió và khí áp tại Hòn Ngự và Hòn Dấu, tương ứng thể hiện trên Hình 6 và 7 và với khoảng cách từ tâm bão tới trạm Hòn Ngự trên Hình 8. Kết quả phân tích cho thấy, tại Hòn Ngự, nơi gần vị

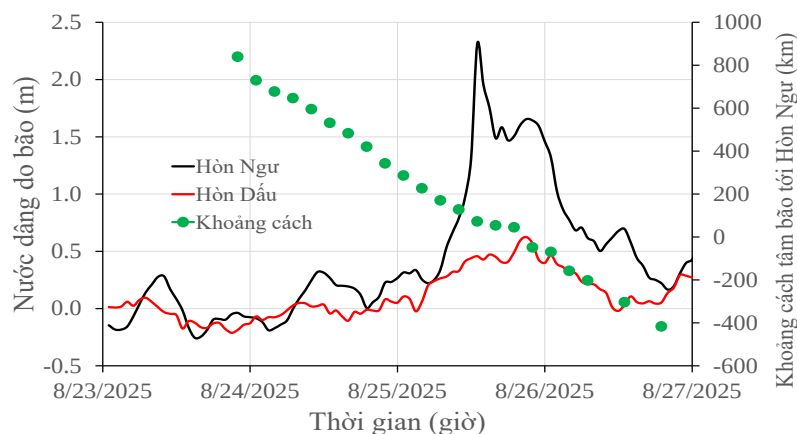
trí bão đổ bộ đã ghi nhận tốc độ gió lớn nhất 23 m/s (cấp 9) lúc 9 giờ 45 phút ngày 25/8, trong khi đó khí áp thấp nhất 989,2 Hpa lúc 18 giờ ngày 25/8. Như vậy tại Hòn Ngự thời gian có gió mạnh nhất trước khi tâm bão đi vào khoảng 8



giờ. Thời gian có gió mạnh từ 17 m/s (cấp 7) trở lên tập trung từ 6 - 19 giờ và nước dâng do bão lớn nhất lúc 12 giờ ngày 25/8. Sau 17 giờ ngày 25/8, mặc dù gió đã giảm nhưng nước dâng bão vẫn duy trì cao trên 1,0 m tới 1 giờ sáng ngày 26/8. Trong khi đó, khoảng thời gian xuất hiện nước dâng lớn nhất tới lúc ghi nhận khí áp tại trạm nhỏ nhất là 6 giờ. Tại thời điểm Hòn Ngur có nước dâng lớn nhất, tâm bão cách trạm khoảng 80 km (Hình 8). Như vậy, có thể thấy, tại Hòn Ngur tốc độ gió mạnh xuất hiện trước khi tâm bão đi vào 6 giờ. Nước dâng bão tại Hòn Ngur vẫn duy trì cao sau khi tốc độ gió đã giảm một phần do bởi độ giảm khí áp trong bão.

Trong khi đó, tại trạm Hòn Dấu, tốc độ gió thấp hơn tại Hòn Ngur, ngoại trừ lúc 15 giờ ngày 25/8 ghi nhận tốc độ gió lớn nhất (17 m/s - cuối cấp 7), còn lại tốc độ gió chỉ lớn nhất chỉ khoảng

14 m/s (đầu cấp 7) và kéo dài từ 16 tới 22 giờ ngày 25/8. Nước dâng do bão lớn nhất xuất hiện lúc 22 giờ ngày 25/8, muộn hơn 10 giờ so với tại Hòn Ngur, tại thời điểm này tâm bão đã đi vào bờ và cách đảo Hòn Ngur khoảng 50 km. Thời điểm có khí áp thấp nhất 13 - 15 giờ ngày 25/8 (997,5 HpA), trước khi ghi nhận nước dâng lớn nhất. Như vậy, có thể thấy, tốc độ gió tại Hòn Dấu không lớn (cỡ áp thấp nhiệt đới) nhưng đã ghi nhận nước dâng lớn nhất tới 0,63 m, nguyên nhân ngoài do tác động của gió, độ giảm khí áp và nước dâng do sóng còn do quá trình lan truyền của nước dâng trên từ cửa Vịnh Bắc Bộ lên phía bắc đối với những cơn bão có quỹ đạo đổ bộ như bão Kajiki. Trong quá khứ một số cơn bão có quỹ đạo tương tự Wukong (9/2000), Doksuri (9/2017) cũng ghi nhận hiện tượng này [2, 6].



Hình 8. Diễn biến nước dâng do bão với khoảng cách từ tâm bão tới trạm tại Hòn Ngur trong bão Kajiki.

### 3.2. Kết quả mô phỏng nước dâng bão Kajiki

Nước dâng và sóng trong bão số Kajiki được thực hiện tính toán từ mô hình số trị tích hợp SuWAT. Kết quả mô phỏng nước dâng do bão và độ cao sóng lớn nhất thể hiện trên Hình 9. So sánh diễn biến độ cao nước dâng do bão giữa tính toán và quan trắc tại Hòn Ngur và Hòn Dấu thể hiện trên Hình 10. Có thể thấy rằng, bão Kajiki đã gây nước dâng lớn hơn 1,0 m trên dải ven biển rất dài từ Hà Tĩnh tới Nam Ninh Bình, nước dâng lớn hơn 2,0 m tập trung tại ven biển Nghệ An và Bắc Hà Tĩnh, trong đó, nhiều vị trí thuộc hai tỉnh này có nước dâng do bão lên tới gần 3,0 m (Hình 9a).

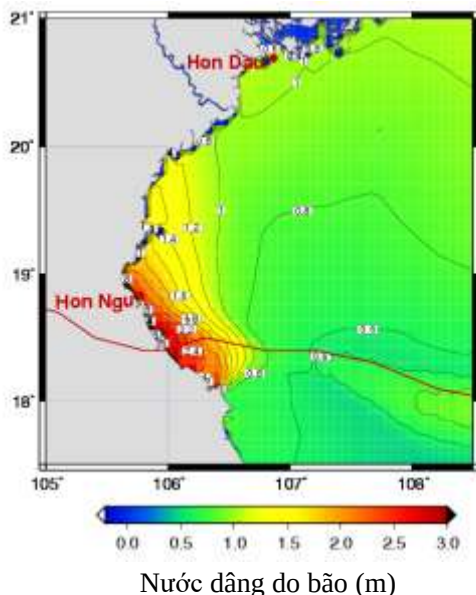
Từ kết quả so sánh trên Hình 10 có thể thấy rằng mô hình đã mô phỏng được khoảng thời gian xuất hiện nước dâng lớn nhất cả ở Hòn Ngur và Hòn Dấu. Tại Hòn Ngur, mặc dù đỉnh nước dâng gần như không khác biệt so với số liệu quan trắc, tuy nhiên mô hình không dự báo được thời đoạn nước dâng cao sau 18 giờ ngày 25/8. Trong khi đó, Tại Hòn Dấu kết quả tính nước dâng lớn nhất thiên cao so với số liệu quan trắc với chênh lệch khoảng 0,2 m và sai số lớn giữa tính toán và quan trắc ở thời đoạn trước và sau nước dâng đạt đỉnh. Những sai số theo như phân tích ở trên một phần nguyên nhân do bởi mô hình dự báo khí tượng

WRF chưa mô tả được trường gió với trường hợp bão đi chậm sau khi vào sát bờ và độ phân giải lưới tính của mô hình dự báo nước dâng còn thô (1 km), chưa mô phỏng đầy đủ nước dâng gây bởi ứng suất sóng như một số nghiên cứu trước đó đã đề cập [2, 6 - 9].

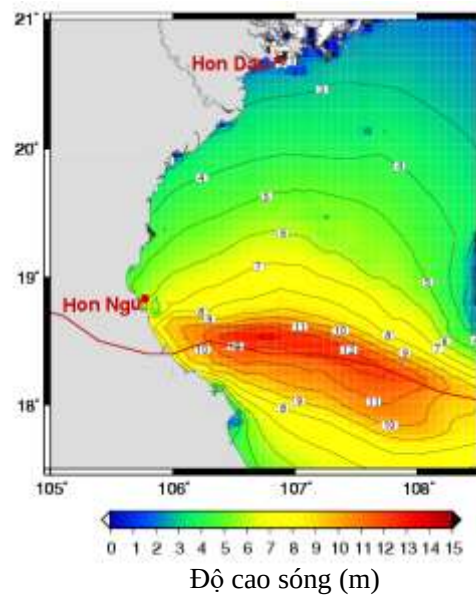
Kết quả mô phỏng trên Hình 9b cho thấy, tại khu vực ven bờ, độ cao sóng trong bão Kajiki cao tới 6 - 8 m, tại Hòn Ngự độ cao sóng khoảng 6 m, kết quả mô phỏng cũng tương đối phù hợp với số liệu mà quan trắc viên tại Hòn Ngự ước lượng được [17].

Phần lớn những nghiên cứu về nước dâng do bão trước đây chủ yếu đề cập đến nước dâng do tổ hợp tác động của gió, độ giảm khí áp và sóng trong bão. Các nghiên cứu xác định sự đóng góp của từng thành phần như ứng suất sóng, độ giảm khí áp và ứng suất sóng chủ yếu thực hiện theo các công thức giải tích, nghiên cứu bằng mô hình số trị chưa được thực hiện nhiều. Trong nghiên cứu của Vũ Hải Đăng và cs (2017) đã thực hiện tính toán nước dâng gây bởi ứng suất gió, khí áp và ứng suất sóng trong bão Xangxane (9/2006) và phân tích kết quả tại trạm hải văn Sơn Trà (Đà Nẵng) [15]. Đóng góp riêng của thành phần gây nước dâng do có thể có nhiều khác biệt theo

không gian trong phạm vi ảnh hưởng của bão. Trên Hình 11a-c thể hiện phân bố theo không gian nước dâng lớn nhất trong bão Kajiki do bởi ứng suất gió (Hình 11a), khí áp (Hình 11b) và sóng (Hình 11c). Kết quả cho thấy, nước dâng do ứng suất gió chiếm ưu thế và chủ yếu tập trung ở ven bờ, phía bên phải vị trí tâm bão, càng vào gần bờ nước dâng do ứng suất gió càng tăng, nguyên nhân chính là do hiệu ứng dồn nước vào đường bờ. Trong khi đó, phạm vi nước dâng do độ giảm khí áp lớn tập trung chủ yếu hai bên đường đi của bão. Với các cơn bão đổ bộ vào ven biển Việt Nam thường thấy khí áp giảm nhanh khi bão vào sát bờ dẫn tới nước dâng do khí áp cũng giảm nhanh [15], tuy nhiên với bão số Kajiki mức độ giảm không nhiều, chính vì vậy nước dâng do khí áp tại vùng sát bờ vẫn rất cao, lớn nhất khoảng 0,7 m (Hình 11b). Tương tự như nước dâng do ứng suất gió, nước dâng do ứng suất sóng tập trung chủ yếu vùng ven bờ và tại những khu vực có độ cao sóng lớn, độ cao nước dâng gây bởi sóng lớn nhất khoảng 1,0 m (Hình 11c). Nguyên nhân nước dâng do ứng suất sóng lớn tại khu vực sát bờ do bởi độ sâu biển đã giảm làm phát sinh sóng vỡ, gây hiệu ứng nước dâng do sóng.

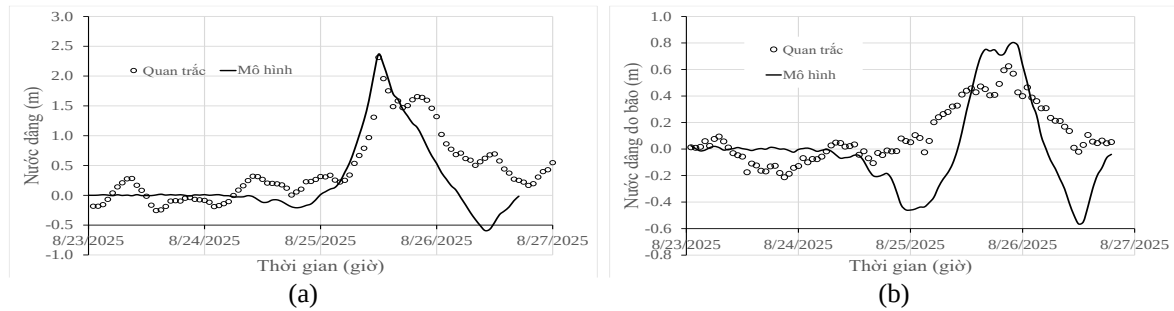


(a)

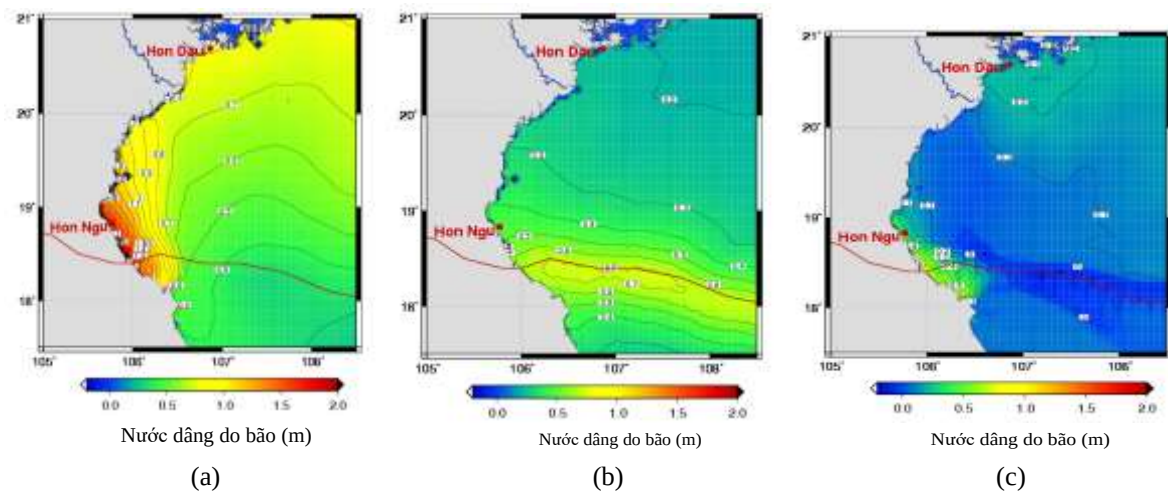


(b)

Hình 9. Phân bố nước dâng lớn (a) và độ cao sóng lớn nhất (b) trong bão Kajiki (8/2025).



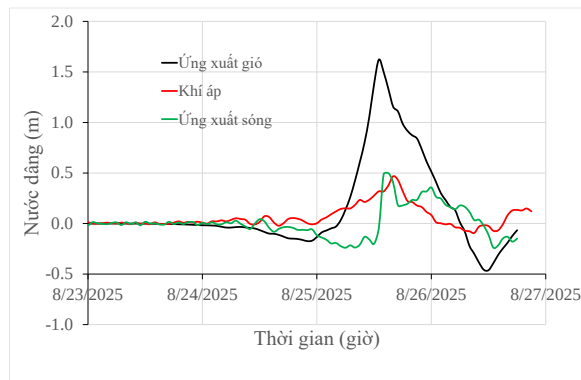
Hình 10. So sánh nước dâng do bão giữa tính toán và quan trắc tại Hòn Ngự (a) và Hòn Dấu (b) trong bão Kajiki.



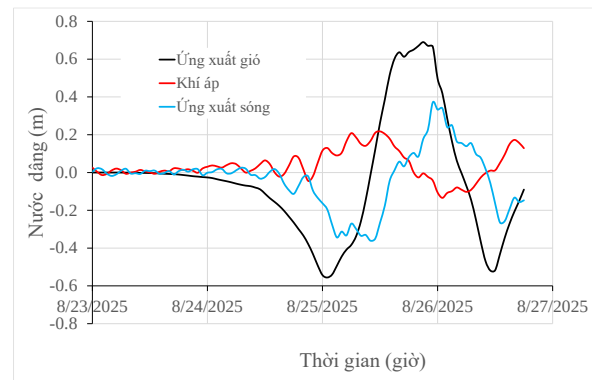
Hình 11. Phân bố nước dâng lớn nhất do: (a) ứng suất gió, (b) độ giảm khí áp và (c) ứng xuất sóng trong bão Kajiki.

Trên Hình 12 thể hiện dao động theo thời gian của các thành phần nước dâng gây bởi ứng suất gió, khí áp và sóng trong bão bão Kajiki tại Hòn Ngự và Hòn Dấu. Tại Hòn Ngự, nước dâng do ứng suất gió lớn nhất khoảng 1,6 m, chiếm khoảng 66,7% nước dâng tổng cộng. Khoảng thời gian xuất hiện nước dâng do ứng suất gió lớn nhất trùng với thời gian có tốc độ gió lớn tại trạm, tương tự như kết quả phân tích số liệu quan trắc trên Hình 6a. Nước dâng do ứng suất sóng lớn nhất khoảng 0,48 m, chiếm khoảng 20,5% nước dâng tổng cộng. Thời điểm xuất hiện nước dâng do sóng và ứng suất gió lớn nhất trùng nhau, trong khi đó nước dâng do khí áp xuất hiện muộn hơn khoảng 3 - 4 giờ, nguyên nhân do bởi thời điểm ghi nhận khí áp thấp nhất tại Hòn Ngự trong bão Kajiki muộn hơn so với khoảng thời

gian có tốc độ gió lớn nhất như đã phân tích trên Hình 6b. Nước dâng do khí áp tại thời điểm nước dâng tổng cộng lớn nhất 0,31 m, chiếm 13%. Kết quả phân tích này có sự khác biệt so với trường hợp bão Xangsane (9/2006) tại trạm Sơn Trà, trong đó, nước dâng do ứng suất gió và khí áp cao nhất xuất hiện tại cùng thời điểm. Tại Hòn Dấu, nước dâng lớn nhất do ứng suất gió khoảng 0,69 m, chiếm khoảng 86,1% và xuất hiện cùng với thời điểm nước dâng tổng cộng lớn nhất. Nước dâng do khí áp lớn nhất khoảng 0,22 m, trùng với khoảng thời gian tại Hòn Dấu ghi nhận khí áp thấp (Hình 7b) và sớm hơn so với nước dâng gây bởi ứng suất gió. Trong khi đó, nước dâng lớn nhất do ứng suất sóng khoảng 0,37 m, xuất hiện muộn hơn khoảng 2 giờ.



(a)



(b)

Hình 12. Diễn biến nước dâng do ứng xuất gió, độ giảm khí áp và ứng xuất sóng tại Hòn Ngu (a) và Hòn Dấu (b) trong bão Kajiki.

#### 4. Kết luận

Bão Kajiki (8/2025) với cường độ cấp 11-12 khi cập bờ tại hai tỉnh Nghệ An và Hà Tĩnh đã gây nước dâng do bão 2,31 m, mực nước quan trắc ghi nhận tại trạm hải văn Hòn Ngu 3,99 m, cao nhất trong 30 năm trở lại đây. Thời gian nước dâng do bão cao hơn 0,5 m kéo dài 18 giờ, từ 8 giờ ngày 25/8 tới 14 giờ ngày 26/8. Nguyên nhân nước dâng do bão cao và kéo dài do bởi bão Kajiki có cường độ rất mạnh và di chuyển chậm khi vào sát bờ. Thời điểm trạm Hòn Ngu ghi nhận nước dâng do bão lớn nhất khi tâm bão còn cách trạm khoảng 80 km và sau khi di chuyển vào bờ khoảng 50 km trạm Hòn Dấu mới ghi nhận nước dâng do bão lớn nhất. Tại trạm hải văn Hòn Dấu, mặc dù ở xa tâm bão và tốc độ gió yếu nhưng cũng ghi nhận nước dâng do bão tới 0,63 m, nguyên nhân do quá trình lan truyền của nước dâng từ cửa Vịnh lên phía Bắc. Kết quả mô phỏng nước dâng bằng mô hình số trị cho thấy, nước dâng do ứng suất gió chiếm chủ đạo, chiếm tới 66,7% và 86,1%, tương ứng tại Hòn Ngu và Hòn Dấu. Nước dâng do độ giảm khí áp và ứng xuất sóng cao khoảng 0,5 m tại Hòn Ngu.

Các kết quả phân tích ở trên có ý nghĩa trong công tác theo dõi, giám sát, dự báo và cảnh báo nước dâng do bão trong dự báo nghiệp vụ đối với những cơn bão có quỹ đạo và diễn biến tương tự như bão Kajiki. Thông tin cập nhật về nước dâng do bão Kajiki sẽ phục vụ cho quy hoạch vùng ven biển đã chịu tác động của bão Kajiki. Trong

nguyên cứu này, mặc dù đã mô phỏng được khoảng thời gian xuất hiện nước dâng lớn nhất, nhưng sai số còn lớn, nhất là ở những khoảng thời gian trước và sau nước dâng đạt đỉnh. Ngoài ra, bão Kajiki đã gây nước biển dâng kết hợp với sóng tràn làm ngập nhiều khu vực ven biển từ Thanh Hoá tới Hà Tĩnh, do vậy nghiên cứu tiếp theo sẽ sử dụng lưới tính có độ phân giải chi tiết hơn, nhỏ nhất khoảng 50 m để có thể mô phỏng đầy đủ nước dâng do sóng và ngập lụt ven biển tại khu vực.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Khoa học và Công nghệ trong đề tài mã số ĐTĐL-CN-46/22 và Bộ Nông nghiệp và Môi trường trong đề tài mã số TNMT.2024.06.03. Tập thể các tác giả xin chân thành cảm ơn.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] [https://www.nps.gov/guis/learn/historyculture/hurricane-.katrina.htm#:~:text=Winds%20of%20up%20to%20120,%2D%2030%20feet\)%20in%20height](https://www.nps.gov/guis/learn/historyculture/hurricane-.katrina.htm#:~:text=Winds%20of%20up%20to%20120,%2D%2030%20feet)%20in%20height) (accessed on: July 10<sup>th</sup>, 2025).
- [2] P. V. Tien, N. B. Thuy, S. Kim, N. K. Cuong, P. K. Ngoc, M. V. Khiem, L. H. Hole, Impact of the Interaction of Surge, Wave, and Tide on the Surge and Wave on the Northern Coast of Vietnam for A Marine Storm Surge and Wave Forecast System, Reg. Stud. Mar. Sci., Vol. 87, 2025, pp. 104234.

- [3] Meteorological and Hydrological Characteristics in 2024, National Center for Hydro-meteorological Forecasting, 2025 (in Vietnamese).
- [4] Meteorological and Hydrological Characteristics in 2020, National Center for Hydro-meteorological Forecasting, 2021 (in Vietnamese).
- [5] P. T. Thuc, Study on the Characteristics of Storm Surge and Monsoon-Induced Water Level Rise in the Coastal Waters of the Gulf of Tonkin. Phd Dissertation, University of Science, Vietnam National University, Hanoi, 2021 (in Vietnamese).
- [6] N. B. Thuy, S. Kim, T. N. Anh, N. K. Cuong, P. T. Thuc, L. H. Hole, The Influence Moving Speeds, Wind Speeds, and Sea Level Pressures on After-Runner Storm Surges in the Gulf of Tonkin, Vietnam, *Ocean Eng.*, Vol. 212, 2020, pp. 107613.
- [7] Y. Funakoshi, S. C. Hagen, P. Bacopoulos, Coupling of Hydrodynamic and Wave Models: Case Study for Hurricane Floyd (1999) Hindcast, *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.*, Vol. 134, 2008, pp. 321-335.
- [8] S. Y. Kim, T. Yasuda, H. Mase, Storm Surge Simulations Occurred in Tosa Bay by Using Surge-wave-tide Coupled Model, *Annual Journal of Coastal Engineering, JSCE*, Vol. 55, 2008, pp. 321-325.
- [9] S. Y. Kim, T. Yasuda, H. Mase, Wave Set-up in the Storm Surge Along Open Coasts During Typhoon Anita, *Coast. Eng., ASCE*, Vol. 57, 2010, pp. 631-642.
- [10] Q. Chen, L. Wang, H. Zhao, An Integrated Surge and Wave Modeling System for Northern Gulf of Mexico: Simulations for Hurricanes Katrina and Ivan. *Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Conference on Coastal Engineering (Hamburg, Germany)*, Vol. 2, 2008, pp. 1072-1084.
- [11] N. B. Thuy, H. D. Cuong, D. D. Tien, D. D. Chien, S. Kim, Assessment of Storm Surge Evolution Caused by Typhoon and Related Forecasting Issues, *Journal of Hydro-Meteorology*, Vol. 647, No. 3, 2014 (in Vietnamese).
- [12] N. N. Thuy, Study on the Mechanism of Post-Landfall Storm Surge Along the Northern Vietnam Coast, *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 17, No. 4B, 2017, pp. 208-216.
- [13] N. B. Thuy, S. Kim, V. H. Dang, H. D. Cuong, C. Wettre, L. R. Hole, Assessment of Storm Surge Along the Coast of Central Vietnam. *J. Coastal Res.*, Vol. 33, 2017, pp. 518-530.
- [14] D. D. Chien, N. B. Thuy, N. T. Sao, T. H. Thai, S. Kim, Study on the Interaction Between Waves and Storm Surge Using a Numerical Model, *Journal of Hydro-Meteorology*, Vol. 647, 2014 (in Vietnamese).
- [15] V. H. Dang, N. B. Thuy, D. D. Chien, S. Kim, Study on the Quantitative Assessment of Storm Surge Components Using A Numerical Model, *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, 2017, pp. 132-138 (in Vietnamese).
- [16] P. K. Ngoc, N. T. Luan, N. B. Thuy, S. Kim, V. H. Dang, The Impact of Wave on Coastal Inundation. *Proc., of the 8<sup>th</sup> Asia-Pacific Workshop on Marine Hydrodynamics in Nava Architecture, Ocean Technology and Contractions*, 2016, pp. 168-173.
- [17] Report on the Development of Typhoon No. 5 (Kajiki), Heavy Rainfall, Floods, Flash Floods, Landslides, and Forecasting Activities, National Center for Hydro-Meteorological Forecasting, September 2025 (in Vietnamese).
- [18] <https://baonghean.vn/hinh-anh-cua-lo-chieu-25-8-bien-dong-du-doi-nhieu-tuyen-duong-ven-bien-ngap-do-bao-so-5-10305203.html> (accessed on: July 10<sup>th</sup>, 2025).
- [19] [https://www.vietnamplus.vn/thanh-hoa-anh-huong-bao-so-5-bien-sam-son-song-lon-thuy-trieu-tran-qua-de-post1057839.vnp#google\\_vignette](https://www.vietnamplus.vn/thanh-hoa-anh-huong-bao-so-5-bien-sam-son-song-lon-thuy-trieu-tran-qua-de-post1057839.vnp#google_vignette) (accessed on: July 10<sup>th</sup>, 2025)
- [20] Report on the Results of Coastal Flooding Survey After Typhoon No. 5, National Center for Hydro-Meteorological Forecasting, August 2025 (in Vietnamese).
- [21] P. A. E. M. Janssen, Quasi-Linear Theory of Wind-wave Generation Applied to Wave Forecasting, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 21, 1991, pp. 1631-164.