



Original Article

Application of the SCHISM Unstructured Grid Model to Simulate Water Levels and Waves in the Coastal Area of Thanh Hoa - Nghe An During Typhoon Doksuri (2017)

Pham Van Tien*, Le Quoc Huy, Dang Minh Hoang, Nguyen Hong Hanh,
Nguyen Thi Lan, Dang Linh Chi, Nguyen Van Khanh

*Vietnam Institute of Meteorology, Hydrology and Climate change,
No. 23, Lane 62, Nguyen Chi Thanh, Lang, Hanoi, Vietnam*

Received 25th August 2025

Revised 15th October 2025; Accepted 30th October 2025

Abstract: This paper presents the initial results of applying the multi-scale unstructured grid model system SCHISM-WWM to simulate water levels and waves for the Thanh Hoa - Nghe An coastal area during the typhoon Doksuri (September 2017). The SCHISM model was chosen for its ability to seamlessly simulate physical processes across multiple spatial scales and the superior computational efficiency of its unstructured grid, making it a potential alternative to traditional structured grid systems like ROMS-SWAN. The comparison of computed results with observational data show that the model can effectively simulate the total water level, with a Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) index of 0.94 at Hon Dau and 0.88 at Hon Ngu, and corresponding root mean square errors (RMSE) of 0.17 m and 0.21 m. For waves, the maximum simulated significant wave height (7.15 m) is quite close to the observation from the SIO drifting buoy (7.8 m), with an NSE index of 0.96. These results confirm the potential of SCHISM for detailed forecasting of storm surge and waves, and provide a basis for further research to develop a highly reliable operational forecasting system.

Keywords: SCHISM, WWM, tide, waves, total water level.

* Corresponding author.

E-mail address: phamvantienbn@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5397>

Ứng dụng mô hình lưới phi cấu trúc SCHISM mô phỏng mực nước và sóng tại vùng ven biển Thanh Hóa - Nghệ An trong bão Doksuri (2017)

Phạm Văn Tiến*, Lê Quốc Huy, Đặng Minh Hoàng, Nguyễn Hồng Hạnh,
Nguyễn Thị Lan, Đặng Linh Chi, Nguyễn Văn Khánh

*Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu
Số 23, Ngõ 62, Nguyễn Chí Thanh, 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: Bài báo này trình bày kết quả bước đầu ứng dụng hệ thống mô hình lưới phi cấu trúc đa quy mô SCHISM-WWM mô phỏng mực nước và sóng cơn bão Doksuri (tháng 9/2017) cho vùng biển Thanh Hóa - Nghệ An. Mô hình SCHISM được lựa chọn nhờ khả năng mô phỏng liên mạch các quá trình vật lý trên nhiều quy mô không gian và hiệu quả tính toán vượt trội của lưới phi cấu trúc, một giải pháp thay thế tiềm năng cho các hệ thống lưới cấu trúc truyền thống như ROMS-SWAN. Kết quả so sánh với số liệu quan trắc cho thấy mô hình có khả năng mô phỏng tốt diễn biến mực nước tổng hợp với chỉ số hiệu quả Nash-Sutcliffe (NSE) đạt 0,94 tại Hòn Dấu và 0,88 tại Hòn Ngư, sai số bình phương trung bình (RMSE) tương ứng là 0,17 m và 0,21 m. Đối với sóng, độ cao sóng có nghĩa (Hs) lớn nhất mô phỏng (7,15 m) khá gần với quan trắc từ phao trôi SIO (7,8 m), với chỉ số NSE là 0,96. Các kết quả này khẳng định tiềm năng của SCHISM trong việc dự báo chi tiết nước dâng và sóng do bão, đồng thời là cơ sở cho các nghiên cứu cải tiến nhằm xây dựng một hệ thống dự báo nghiệp vụ có độ tin cậy cao.

Từ khóa: SCHISM, WWM, thủy triều, sóng, mực nước tổng hợp.

1. Mở đầu

Dự báo hải văn cung cấp các thông tin hữu ích cho các nhà quản lý, quy hoạch các vùng biển, các hoạt động kinh tế xã hội trên biển và đặc biệt là trong công tác cảnh báo thiên tai. Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của kinh tế xã hội, thông tin dự báo hải văn đang ngày càng được nhiều tổ chức, cá nhân quan tâm, sử dụng, đặc biệt là các dự báo chi tiết cho khu vực cụ thể. Hiện nay, các hệ thống dự báo nghiệp vụ tại Việt Nam như tại Trung tâm Dự báo Khí tượng Thủy

văn Quốc gia và Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu, chủ yếu dựa trên các mô hình lưới có cấu trúc như SuWAT, ROMS và SWAN, lưới tính có độ phân giải ngang từ 4 km đến 10 km [1, 2]. Mặc dù hiệu quả cho các bài toán quy mô khu vực, các mô hình này gặp hạn chế khi cần mô phỏng chi tiết các quá trình ở quy mô nhỏ như các cửa sông, vũng, vịnh ven biển. Việc tăng độ phân giải trên toàn miền tính hoặc sử dụng kỹ thuật lưới lồng để đạt được độ phân giải vài trăm mét ở vùng ven bờ sẽ làm tăng đột biến chi phí tính toán, gây áp lực lớn lên các hệ

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: phamvantienbn@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5397>

thống máy tính hiệu năng cao (HPC) và có thể không đáp ứng yêu cầu về thời gian trong dự báo tác nghiệp.

Để giải quyết thách thức này, các mô hình lưới phi cấu trúc đã nổi lên như một giải pháp thay thế hiệu quả [3]. Lưới phi cấu trúc cho phép tinh chỉnh độ phân giải một cách linh hoạt, tập trung các nút lưới có độ phân giải cao vào các khu vực quan tâm (như cửa sông, kênh hẹp) trong khi vẫn duy trì lưới thưa ở các vùng nước mở ngoài khơi. Cách tiếp cận này giúp tối ưu hóa tài nguyên tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác ở những nơi cần thiết.

Trong số các mô hình lưới phi cấu trúc, SCHISM (Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model) [4] là một công cụ mã nguồn mở, tiên tiến và đã được cộng đồng khoa học quốc tế công nhận. SCHISM đã được ứng dụng thành công trong nhiều nghiên cứu phức tạp trên toàn cầu, từ mô phỏng nước dâng do bão, sóng thần, đến các bài toán lũ lụt tổng hợp (compound flooding) kết hợp ảnh hưởng của nước dâng ven biển và lũ sông tại các khu vực như Vịnh Chesapeake, Vịnh San Francisco và Vịnh Delaware [5]. Khả năng mô phỏng liên mạch các quá trình từ lạch nhỏ ra đại dương mở, kết hợp với hệ thống ghép nối linh hoạt cho các quá trình vận chuyển trầm tích, sinh-địa-hóa và chất lượng nước, đã biến SCHISM thành một nền tảng mạnh mẽ cho việc xây dựng các hệ thống mô hình Trái Đất tích hợp.

Nghiên cứu của Liu và cộng sự (2020) đã mô phỏng thành công nước dâng do bão trong cơn bão Sandy (2012) tại Bờ Đông Hoa Kỳ, với độ lớn đỉnh nước dâng mô phỏng là 2,9 m, sai số nhỏ hơn 0,08 m so với quan trắc [6]. Zhang và cộng sự (2020) đã triển khai thành công hệ thống ghép nối SCHISM với mô hình thủy văn (NWM), tạo ra một khuôn khổ thống nhất từ sông ra đại dương để dự báo tương tác giữa nước dâng do bão và dòng chảy từ sông tại vịnh Delaware [7]. Ngoài ra, khả năng ghép nối linh hoạt của SCHISM còn được khai thác hiệu quả trong nghiên cứu tương tác sóng - dòng chảy - trầm tích và các quá trình biến đổi hình thái. Bertin và cộng sự (2020) đã phát triển một hệ

thống cải tiến dựa trên SCHISM-WWMIII để tái hiện chính xác biến dạng bãi cát dưới tác động của sóng bão tại cửa Maumusson (Pháp) [8]. Trong một ứng dụng khác tại vùng cửa sông Châu Giang, Yang và cộng sự (2022) đã sử dụng mô hình 3D để làm rõ vai trò chi phối của tương tác sóng - dòng chảy đối với sự xói mòn và vận chuyển trầm tích lơ lửng trong bão Mangkhut (2018) [10]. Một nghiên cứu tại vịnh Chesapeake đã chỉ ra rằng việc sử dụng lưới phi cấu trúc với độ phân giải cao ở các nhánh sông nhỏ và các vùng ven bờ giúp cải thiện đáng kể việc mô phỏng các biến chất lượng nước so với các mô hình có độ phân giải thô hơn [11]. Lý do là các nguồn thải ô nhiễm (cả điểm và không điểm) và các quá trình sinh địa hóa quan trọng (như sự tiêu thụ dinh dưỡng của tảo, sự phân hủy chất hữu cơ) thường diễn ra ở quy mô không gian nhỏ. Việc mô tả chính xác sự lưu thông, thời gian lưu và quá trình hòa trộn ở các quy mô này là rất quan trọng để có được một bức tranh tổng thể chính xác về chất lượng nước của toàn bộ hệ thống. Khả năng tinh chỉnh lưới cục bộ của SCHISM chính là chìa khóa để nắm bắt các quá trình quy mô nhỏ này một cách hiệu quả. Các kết quả này chứng tỏ SCHISM có khả năng mô phỏng tốt các quá trình vật lý phức tạp và khả năng tích hợp toàn diện các thành phần điều khiển mực nước và lũ lụt ven biển, nền tảng trong xây dựng các hệ thống cảnh báo sớm.

Bên cạnh đó, việc nghiên cứu ứng dụng một mô hình mới về dự báo mực nước và sóng là điều cần thiết, để có thêm bộ công cụ dự báo mới hỗ trợ công tác dự báo nghiệp vụ, nâng cao năng lực cảnh báo, dự báo và đa dạng hóa sản phẩm dự báo. Ngoài ra, chúng tôi đang hướng tới mục tiêu xây dựng một hệ thống mô hình có khả năng đáp ứng được bài toán tổng hợp cho khu vực cửa sông ven biển, bao gồm thủy động lực, sóng, vận chuyển trầm tích, môi trường và sinh thái phục vụ phát triển bền vững, dựa trên nền tảng của mô hình SCHISM.

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày kết quả bước đầu ứng dụng mô hình SCHISM vào mô phỏng mực nước tổng hợp và sóng cho khu vực ven biển Thanh Hoá - Nghệ An trong cơn

bão Doksuri (2017), một trong những cơn bão mạnh ảnh hưởng đến khu vực này.

2. Mô hình SCHISM

2.1. Mô tả chung

Mô hình SCHISM là mô hình cộng đồng mã nguồn mở ba chiều cho nhiều quy mô không gian khác nhau từ lạch nhỏ - sông - cửa sông - thềm lục địa - đại dương [4]. SCHISM được phát triển từ mô hình SELFE [12], nhưng đã được nâng cấp và cải tiến đáng kể, khiến nó trở thành một hệ thống riêng biệt với nhiều tính năng vượt trội. SCHISM giải hệ phương trình Navier-Stokes bằng các phép gần đúng thủy tĩnh và Boussinesq. Ba kỹ thuật chính là nền tảng của mô hình SCHISM bao gồm lưới phi cấu trúc và phương pháp số lai, sơ đồ giải bán ẩn, hệ tọa độ thẳng đứng linh hoạt [4, 13]. Mô hình sử dụng lưới ngang phi cấu trúc linh hoạt bao gồm các phần tử tam giác và tứ giác trên mặt phẳng ngang, kết hợp với phương pháp số lai phần tử hữu hạn/thể tích hữu hạn. Thiết kế này không chỉ cho phép mô tả chính xác các đường bờ biển và địa hình phức tạp mà còn đảm bảo tính bảo toàn khối lượng một cách nghiêm ngặt, yếu tố quan trọng cho các mô phỏng vận chuyển chất. Sơ đồ giải bán ẩn giúp loại bỏ ràng buộc ổn định nghiêm ngặt của điều kiện Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), cho phép sử dụng bước thời gian lớn hơn đáng kể (lên tới hàng trăm lần) so với các mô hình tường minh, giúp tăng hiệu suất tính toán cho các mô phỏng dài hạn. SCHISM sử dụng hệ tọa độ dọc lai LSC² (Localized Sigma Coordinates), cho phép số lượng lớp thẳng đứng thay đổi theo không gian, giúp tối ưu hóa tính toán ở cả vùng nước sâu và nông.

SCHISM được thiết kế không chỉ là một mô hình thủy động lực đơn lẻ mà là một hệ thống mô hình hóa tích hợp toàn diện có thể được mở rộng để mô phỏng một loạt các quá trình vật lý, hóa học và sinh học thông qua một loạt các mô hình được ghép nối. Lõi thủy động lực học có thể được ghép nối linh hoạt với một loạt các mô hình chuyên biệt để mô phỏng các quá trình vật lý, hóa học và sinh học khác nhau trong môi trường

nước. Toàn bộ hệ thống SCHISM được thiết kế song song hóa hoàn toàn bằng cách sử dụng kỹ thuật phân chia miền và giao diện truyền tin MPI (Message Passing Interface). Điều này cho phép mô hình có thể chạy hiệu quả trên các cụm siêu máy tính (High-Performance Computing - HPC), phân chia bài toán thành nhiều phần nhỏ để xử lý đồng thời trên hàng chục, hàng trăm, hoặc thậm chí hàng ngàn bộ xử lý. Nhờ đó, các mô phỏng quy mô lớn với hàng triệu nút lưới có thể được thực hiện trong một khoảng thời gian hợp lý [14].

2.2. Hệ phương trình cơ bản

Phương trình động lượng:

$$\frac{Du}{dt} = \mathbf{f} - g\nabla\eta + \mathbf{m}_z - \alpha|\mathbf{u}|\mathbf{u}L(x, y, z) \quad (1)$$

$$\text{Với, } \mathbf{f} = f(v, -u) - \frac{g}{\rho_o} \int_z^\eta \nabla \rho dz - \frac{\nabla p_A}{\rho_o} + \alpha g \nabla \psi + \mathbf{F}_m$$

Phương trình liên tục 2D và 3D:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot \int_{-h}^\eta \mathbf{u} dz = 0 \quad (3)$$

Phương trình vận chuyển:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}C) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial C}{\partial z} \right) + F_h \quad (4)$$

Phương trình trạng thái:

$$\rho = \rho(S, T, p) \quad (5)$$

Trong đó: $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$; D/Dt là đạo hàm theo thời gian; (x,y) là tọa độ Descartes ngang; z là tọa độ thẳng đứng, hướng lên; t là thời gian; $\eta(x,y,t)$ là độ cao mặt thoáng (m); $h(x,y)$ là độ sâu địa hình (m); $u(x,y,z,t)$ là vận tốc theo phương ngang (m/s); $w(x,y,z,t)$ là vận tốc thẳng đứng (m/s); p là áp suất thủy tĩnh (Pa); p_A là áp suất khí quyển tại mực nước biển trung bình (Pa); ρ , ρ_o là mật độ nước, mật độ nước tham chiếu (kg/m^3); f là các thành phần cường lực Coriolis (gradient áp suất đối lưu, độ nhớt ngang, lực Coriolis, thế năng thủy triều, áp suất khí quyển, ứng suất bức xạ); g là gia tốc trọng trường (m/s^2); C là nồng độ chất (ví dụ: độ muối, nhiệt độ, trầm tích,...); v là độ nhớt rối thẳng

đứng (m^2/s); κ là độ khuếch tán thẳng đứng, cho chất đánh dấu (m^2/s); F_m là độ nhớt theo phương ngang (m^2/s); F_h là nguồn (m^2/s).

Tác động của thảm thực vật đã được tính đến trong phương trình động lượng. Thông số thảm thực vật $\alpha(x,y) = DvNvCDv/2$ là biến số mật độ liên quan đến thực vật ($1/\text{m}$), trong đó Dv là đường kính thân, Nv là mật độ thực vật (số cây trên m^2) và CDv là hệ số kéo được xác nhận dựa trên các giá trị nghiên cứu thực nghiệm.

2.3. Mô hình sóng

Mô hình sóng gió (Wind Wave Model - WWM) là một mô hình sóng thế hệ thứ ba, được thiết kế để mô phỏng sự phát sinh, lan truyền và tiêu tán của sóng do gió. Mô hình giải phương trình cân bằng tác động sóng trên lưới không có cấu trúc, một yêu cầu cơ bản để có thể kết nối với SCHISM. WWM bao gồm nhiều công thức tham số hóa khác nhau cho các nguồn, chẳng hạn như năng lượng đầu vào từ gió, tương tác sóng - sóng phi tuyến và tiêu tán do ma sát đáy và hiện tượng sóng đổ. Nền tảng lý thuyết và các phương pháp số chi tiết của WWM được trình bày trong luận án tiến sĩ của Aron Roland và công bố khoa học quan trọng của Roland và cộng sự (2012) [15, 16].

Phương trình tác động sóng được sử dụng trong WWM tương tự như trong mô hình SWAN. Ở đây, thành phần đầu tiên biểu diễn sự thay đổi của tác động sóng theo thời gian, thành phần thứ hai trong không gian, thành phần thứ ba biểu diễn sự khúc xạ do dòng chảy và độ sâu, và thành phần cuối cùng biểu diễn sự dịch chuyển tần số do sự thay đổi độ sâu và tương tác với dòng chảy.

Phương trình tác động sóng:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_x(\dot{x} \cdot N) + \frac{\partial \sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial \sigma N}{\partial \theta} = S_{tot} \quad (6)$$

Trong đó, phổ mật độ tác động sóng (N) được định nghĩa như sau:

$$N_{(x,t,\sigma,\theta)} = \frac{E_{(x,t,\sigma,\theta)}}{\sigma} \quad (7)$$

Với E (m^2/Hz) là mật độ năng lượng sóng, σ là tần số sóng tương đối.

S_{tot} là thành phần nguồn chi phối sự diễn tiến cục bộ của phổ sóng, bao gồm năng lượng đầu vào do gió/khí áp (S_{atm}), tương tác phi tuyến tính trong vùng nước sâu và nước nông (S_{nl4} và S_{nl3}), tiêu tán năng lượng trong vùng nước sâu và nước nông do sóng bạc đầu và sóng đổ (S_{ds} và S_{br}), tiêu tán năng lượng do ma sát đáy (S_{bf}) và tương tác phi tuyến tính giữa sóng và đáy biển (S_{bg}), do độ sâu (S_{db}).

$$S_{tot} = S_{atm} + S_{ds} + S_{nl4} + S_{nl3} + S_{br} + S_{bf} + S_{bg} + S_{db} \quad (8)$$

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Khu vực nghiên cứu

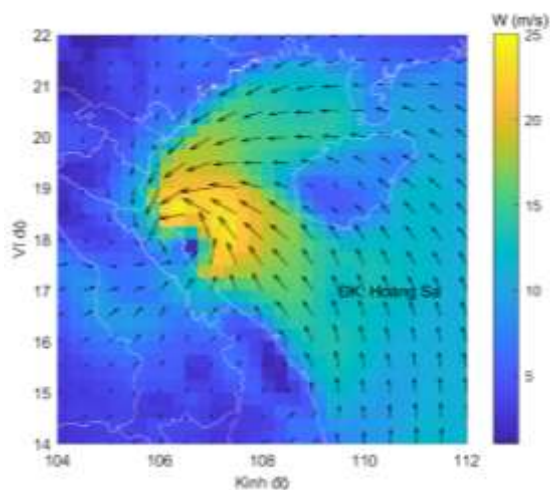
Nghiên cứu lựa chọn vùng cửa sông ven biển Thanh Hóa - Nghệ An để xác thực kết quả mô phỏng mực nước và sóng của mô hình. Đây là khu vực ven biển có hoạt động kinh tế xã hội năng động như khu du lịch biển Hải Tiến, Sầm Sơn, Cửa Lò và khu kinh tế trọng điểm Nghi Sơn và cảng tổng hợp quốc tế Sông Lam. Vùng ven biển Thanh Hóa - Nghệ An cũng là khu vực bị ảnh hưởng của bão nhiều nhất tại Việt Nam. Trong khu vực và khu vực xung quanh có đủ các trạm quan trắc hải văn như Hòn Dấu, Sầm Sơn, Hòn Ngư và thủy văn cửa sông như Hoàng Tân và Cửa Hội (Hình 1). Các trạm này nằm trong hệ thống trạm quan trắc khí tượng thủy văn quốc gia nên số liệu đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy để xác thực mô hình SCHISM.

Để đánh giá mô hình cho các mô phỏng mực nước và sóng biển khu vực Thanh Hóa - Nghệ An, cơn bão Doksuru (9/2017) được lựa chọn. Do bão Doksuru có ảnh hưởng mạnh đến vùng ven biển từ Hà Tĩnh đến Hải Phòng, dù nhiều khu vực không nằm trong vùng bão đổ bộ trực tiếp, nhưng xảy ra nước dâng lớn (gần 1m tại Hòn Dấu), kết hợp với thủy triều cao và sóng lớn gây ngập lụt tại một số khu vực ven biển. Bão Doksuru được hình thành trên biển phía tây của Thái Bình Dương từ ngày 11/9/2017, khi vào Biển Đông bão tăng cấp liên tục đến khi đổ bộ vào ven biển Hà Tĩnh - Quảng Trị ngày 15/9/2017 (Hình 2). Áp suất thấp nhất tại tâm

bão là 955 mb, vận tốc gió lớn nhất là 80 kt. Bán kính vùng gió mạnh 50 kt khoảng 140 km, bán kính vùng gió mạnh 30 kt hơn 360 km.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu và vị trí các trạm trích xuất và đánh giá kết quả mô hình: Hòn Dấu, Sầm Sơn, Hòn Ngư, Hoàng Tân và Cửa Hới.



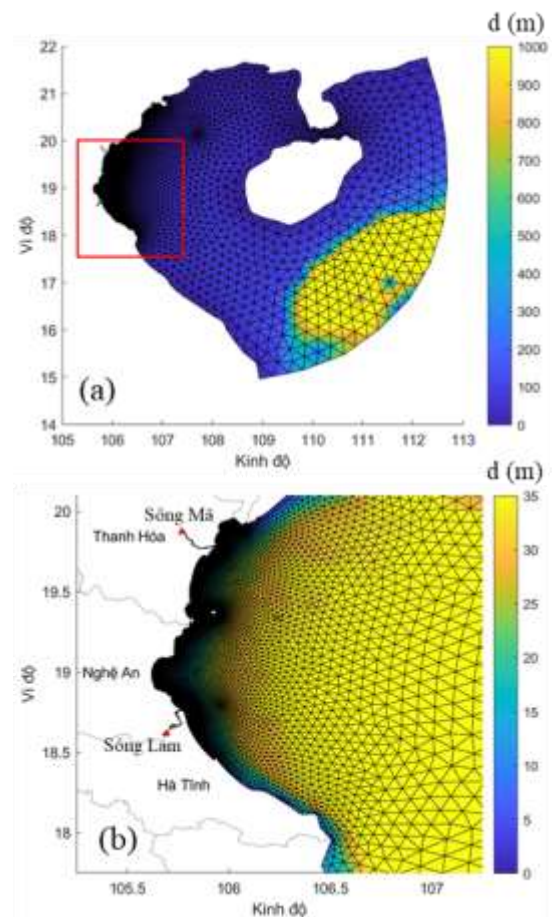
Hình 2. Trường gió trong Doksuri (2017), thời điểm 6 giờ ngày 15/9/2017.

3.2. Thiết lập mô hình

i) Lưới tính

Lưới tính toán bao gồm 15.513 nút và 28.895 phần tử, bao phủ toàn bộ vịnh Bắc Bộ và một phần Tây Bắc Biển Đông (Hình 3a). Độ phân giải lưới thay đổi từ 30 km ở biên mở ngoài khơi đến khoảng 100 m ở trong sông và vùng cửa sông của sông Mã và sông Lam (Hình 3b). Dữ liệu độ sâu được kết hợp giữa số liệu trích từ các bản đồ địa hình tỉ lệ 1/50.000 ở khu vực ven biển với số liệu GEBCO 30 giây ở khu vực ngoài khơi, sau khi được điều chỉnh về cùng hệ cao độ.

Mô hình được thiết lập để mô phỏng sóng, mực nước trong 20 ngày từ ngày 1/9/2017 đến ngày 20/9/2017, bước thời gian mô phỏng là 120 giây.

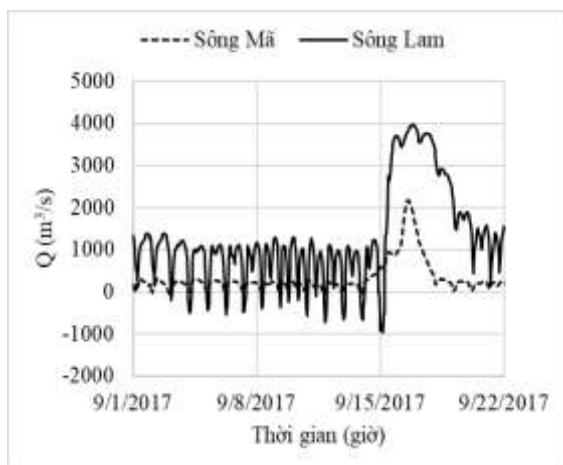


Hình 3. Lưới và địa hình (m): (a) toàn bộ miền tính, (b) vùng biển Thanh Hóa - Hà Tĩnh.

ii) Điều kiện biên

Thủy triều được áp đặt trên biên mở ngoài khơi với 23 thành phần thủy triều thiên văn từ mô hình toàn cầu FES2014 [17], gồm T2, SSA, SA, S2, S1, R2, Q1, P1, O1, NU2, N2, MU2, MSF, MM, MF, M3, M2, L2, K2, K1, J1, EPS2 và 2N2.

Lưu lượng được áp đặt tại các biên sông Mã và sông Lam. Số liệu lưu lượng được mô phỏng bằng mô hình MIKE 11, kế thừa từ kết quả nghiên cứu của Dự án cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường “Phân vùng rủi ro thiên tai và lập bản đồ cảnh báo lũ ngập lụt” [18]. Hình 4 trình bày biến trình lưu lượng tại hai biên sông cho thấy, lưu lượng đỉnh tại biên sông Mã là $2.160 \text{ m}^3/\text{s}$ và sông Lam là $3.960 \text{ m}^3/\text{s}$. Ở cả hai biên, lưu lượng đạt đỉnh sau khi bão đổ bộ.



Hình 4. Lưu lượng tại các biên sông của mô hình:
(a) sông Mã, (b) sông Lam.

iii) Điều kiện gió, áp

Nghiên cứu sử dụng số liệu gió, áp suất đầu vào là số liệu tái phân tích GFS [19] của Trung tâm Dự báo Môi trường Quốc gia, Mỹ (NCEP), trong thời gian bão Doksuri (9/2017) hoạt động. Độ phân giải không gian là 0,25 độ kinh vĩ và thời gian là 6 giờ.

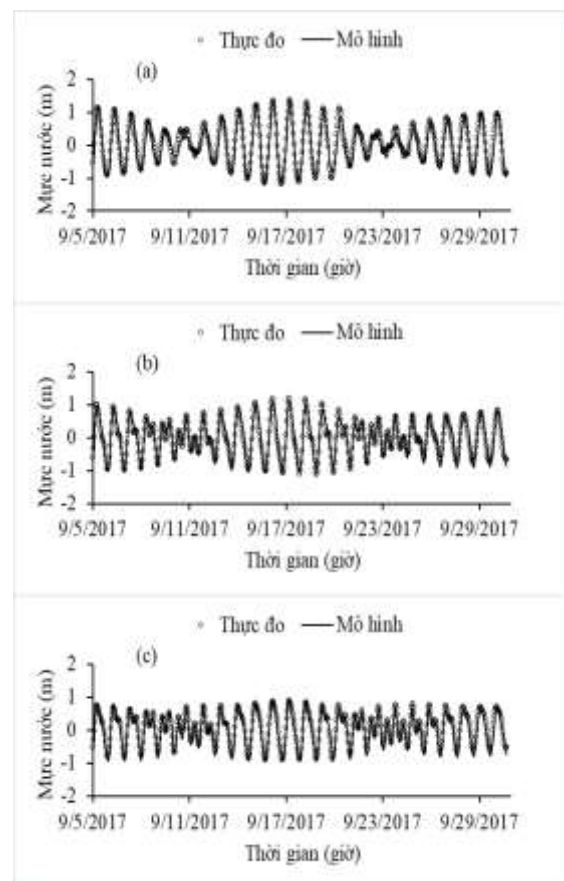
3.3. Kết quả mô phỏng thủy triều, sóng và mực nước tổng cộng

Kết quả mô phỏng của mô hình được đánh giá dựa trên việc so sánh trực quan và ba chỉ số

NSE (Nash–Sutcliffe Efficiency), sai số trung bình (ME) và sai số bình phương trung bình (RMSE) giữa kết quả mô phỏng và số liệu thực đo.

i) Với thủy triều

Kết quả mô phỏng thủy triều được so sánh tại ba trạm Hòn Dấu, Sầm Sơn và Hòn Ngự. Hình 5 so sánh giữa thủy triều mô phỏng và thực đo, cho thấy có sự trùng khớp tương đối tốt giữa các kết quả mô phỏng và thực đo cả về biên độ và pha. Bảng 2 liệt kê các hệ số NSE cho 3 trạm tương ứng là 0,96 (Hòn Dấu), 0,94 (Sầm Sơn) và 0,94 (Hòn Ngự) và RMSE tương ứng là 0,12m (Hòn Dấu), 0,13m (Sầm Sơn) và 0,13m (Hòn Ngự), sai số trung bình ME tại ba trạm đều âm cho thấy mô hình thiên thấp so với quan trắc. Các kết quả này chứng minh mô hình hiệu quả trong mô phỏng thủy triều.



Hình 5. So sánh mực nước thủy triều mô phỏng và phân tích điều hòa: (a) trạm Hòn Dấu, (b) trạm Sầm Sơn và (c) trạm Hòn Ngự.

Phân tích điều hòa chuỗi mực nước quan trắc và mô phỏng 1 năm 2017 thu được biên độ và pha bốn sóng triều chính M2, S2, K1 và O1 trình bày trong Bảng 1. Kết quả cho thấy biên độ các sóng mô phỏng đều thấp hơn so với quan trắc,

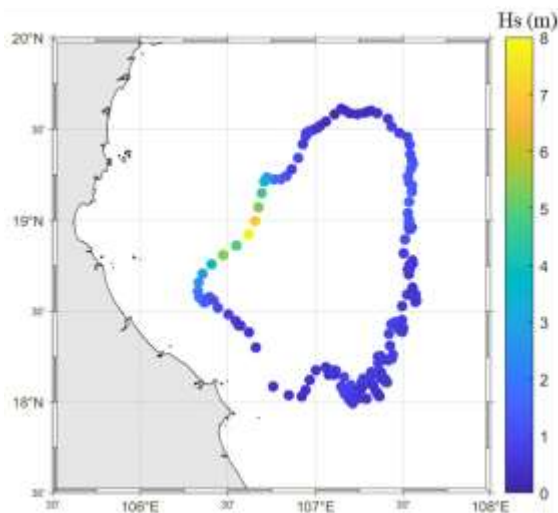
ngoại trừ sóng M2 tại trạm Hòn Dấu. Tương tự, pha mô phỏng có xu hướng chung là thấp hơn quan trắc, ngoài trừ hai sóng bán nhật M2, S2 tại trạm Hòn Dấu có pha mô phỏng lớn hơn quan trắc.

Bảng 1. So sánh các sóng điều hòa thủy triều phân tích từ kết quả mô phỏng và số liệu quan trắc trong 1 năm

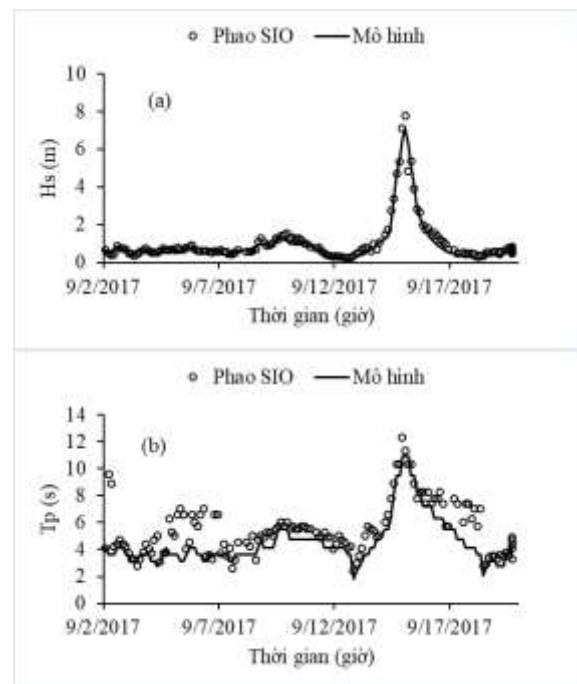
Sóng/Trạm		Hòn Dấu			Hòn Ngur		
		Mô hình	Quan trắc	Chênh lệch	Mô hình	Quan trắc	Chênh lệch
M2	Biên độ (cm)	6,9	5,9	1,0	23,6	29,5	-5,9
	Pha (độ)	222,8	199,3	23,5	123,9	142,9	-19,0
S2	Biên độ (cm)	3,9	4,2	-0,3	8,1	9,7	-1,6
	Pha (độ)	238,4	219,8	18,5	186,3	205,0	-18,7
K1	Biên độ (cm)	70,0	72,4	-2,4	47,9	50,0	-2,1
	Pha (độ)	316,8	330,7	-13,8	331,3	345,7	-14,4
O1	Biên độ (cm)	77,6	81,2	-3,6	54,9	59,3	-4,4
	Pha (độ)	263,9	276,4	-12,5	267,5	289,5	-22,0

ii) Với sóng biển

Để đánh giá kết quả mô phỏng sóng của mô hình sóng WWM, chúng tôi sử dụng số liệu độ cao sóng có nghĩa (H_s) và chu kỳ đỉnh phổ (T_p) quan trắc bằng phao trôi SIO từ ngày 2/9/2017 đến ngày 20/9/2017 của Trung tâm nghiên cứu và phát triển quan trắc ven biển (CORDC), Viện Hải dương học Scripps, Đại học California. Quỹ đạo phao được thể hiện trong Hình 6, trong đó mỗi vị trí của phao cách nhau 3 giờ;



Hình 6. Quỹ đạo của phao SIO từ ngày 2/9/2017 - 20/9/2017.

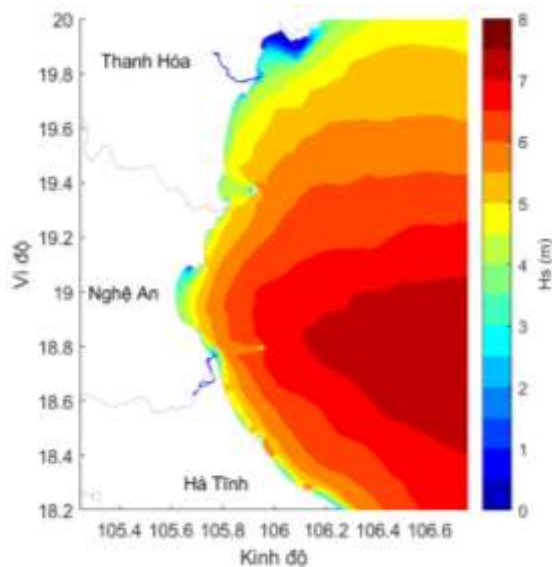


Hình 7. So sánh giữa mô hình và quan trắc bằng phao SIO: (a) H_s , (b) T_p .

So sánh giữa H_s và T_p giữa kết quả mô hình (trong kịch bản W) được thể hiện trong Hình 7 và các chỉ số thống kê trong Bảng 2 cho thấy mô hình WWM có khả năng mô phỏng sóng khá tốt. Đối với độ cao sóng có nghĩa lớn nhất mô phỏng

thấp hơn quan trắc 0,65 m (quan trắc là 7,8 m, mô phỏng là 7,15 m, Hình 7a). Đối với chu kỳ đỉnh phổ lớn nhất mô phỏng thấp hơn quan trắc 1,4 m (quan trắc là 12,3 m, mô phỏng là 10,9 m, Hình 7b). Nhìn chung, kết quả mô hình thiên thấp so với thực đo. Điều này có thể liên quan đến độ phân giải của trường gió đầu vào là 0,25 độ và bước thời gian là 6 giờ nên không phản ánh đúng trường gió trong thực tế;

Phân bố theo không gian của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất thể hiện trong Hình 7, cho thấy sự phù hợp với diễn biến thực tế. Độ cao sóng lớn nhất ở vùng biển Nghệ An - Hà Tĩnh, giảm dần về phía bắc. Độ cao sóng có nghĩa lớn nhất ở Hòn Ngư khoảng 4,8 m, ở Sầm Sơn khoảng 3,7 m;



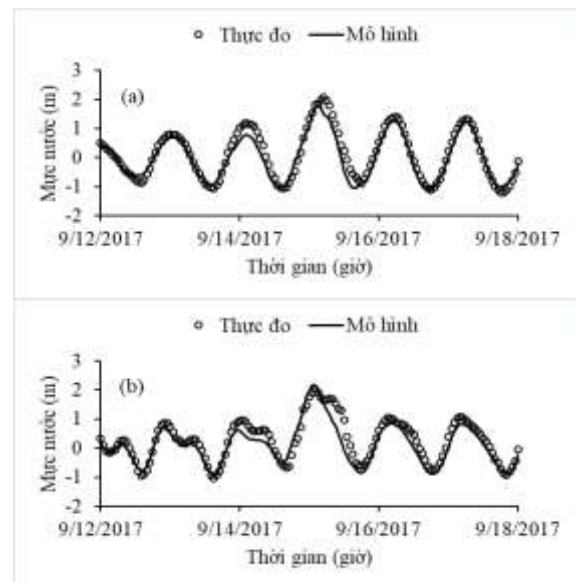
Hình 7. Phân bố độ cao sóng có nghĩa lớn nhất trong bão Doksurì.

iii) Với mực nước tổng hợp

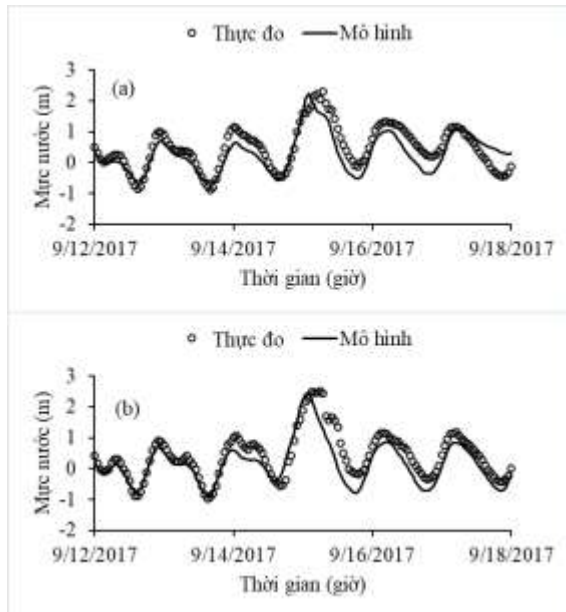
Mực nước tổng hợp được mô phỏng bằng mô hình SCHISM kết nối với mô hình sóng WMM. Ở đây áp dụng kết nối động hai chiều đầy đủ giữa hai mô hình sau mỗi 5 bước thời gian tính toán (600 giây). Đối với mô hình sóng, mực nước và dòng chảy từ mô hình SCHISM sẽ được cập nhật. Với mô hình SCHISM, ảnh hưởng của sóng đến thủy động lực thông qua ba thành phần, ứng suất gió bề mặt, ứng suất bức xạ và tăng cường ma sát đáy. Trong đó, ứng suất gió bề mặt được

điều chỉnh không chỉ phụ thuộc vào tốc độ gió, mà còn phụ thuộc vào trạng thái bề mặt biển, tức là sóng.

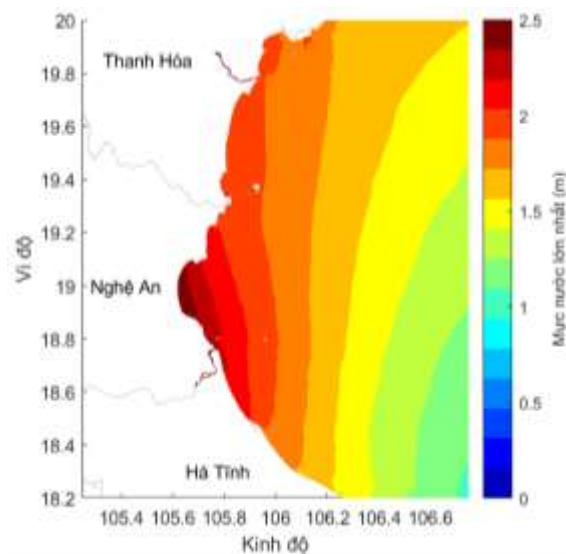
Kết quả mô phỏng mực nước tổng hợp được so sánh với dữ liệu thực đo tại hai trạm hải văn Hòn Dấu, Hòn Ngư và hai trạm thủy văn cửa sông Hoàng Tân (sông Mã), Cửa Hội (sông Lam). Hình 9 và 10 so sánh giữa mô phỏng và thực đo, cho thấy kết quả mô phỏng thiên thấp so với thực đo, nhất là tại các thời điểm triều cao. Điều này cũng được thể hiện qua sai số trung bình ME tại các trạm trình bày trong Bảng 2. Chỉ số NSE khá tốt đều trên 0,79, sai số RMSE từ 0,17 m đến 0,28 m, sai số trung bình ME âm ở tất cả các trạm cho thấy mô hình thiên thấp so với thực đo. Nguyên nhân, có thể là do trường gió như đã phân tích ở trên. Ngoài ra, mực nước tại hai trạm thủy văn cửa sông Hoàng Tân và Cửa Hội còn bị chi phối bởi sự tương tác phức tạp giữa sông và biển (nước dâng sóng). Trong nghiên cứu này, điều kiện biên sông được áp đặt bằng lưu lượng theo thời gian, đây là tác động một chiều của sông đến các yếu tố động lực biển. Điều này đã bỏ qua sự phản hồi từ nước dâng, sóng đến dòng chảy sông. Để khắc phục nhược điểm này cần kết nối hai chiều với mô hình thủy văn khu vực (Zhang và cộng sự, 2020).



Hình 9. So sánh mực nước tổng hợp mô phỏng và thực đo: (a) trạm Hòn Dấu, (b) trạm Hòn Ngư.



Hình 10. So sánh mực nước tổng hợp mô phỏng và thực đo: (a) trạm Hoàng Tân, (b) trạm Cửa Hội.



Hình 11. Phân bố không gian của mực nước tổng hợp lớn nhất trong bão Doksuri.

Hình 11 cho thấy mực nước tổng hợp lớn nhất ở khu vực Diễn Châu và cửa sông Lam, giảm dần về hai phía bắc và nam. Độ cao mực nước tổng hợp lớn nhất tại trạm Hòn Ngự là 2,19 m, tại Diễn Châu 2,43 m, tại Sầm Sơn là 1,92 m. Tại các cửa sông, mực nước lớn hơn khu

vực ven biển, tại trạm thủy văn Cửa Hội là 2,45 m và tại trạm Hoàng Tân là 2,23 m.

Nhìn chung, các kết quả xác thực với số liệu thực đo cho thấy mô hình SCHISM có khả năng mô phỏng tốt mực nước và sóng trong điều kiện bão. Các kết quả này là cơ sở để tiến hành nghiên cứu chuyên sâu và mở rộng ứng dụng mô hình sang các lĩnh vực khác như vận chuyển trầm tích, môi trường và sinh thái vùng cửa sông ven biển.

Bảng 2. Các chỉ số đánh giá mô hình

Trạm	Yếu tố	NSE	ME (m)	RMSE (m)
Mô hình SCHISM mô phỏng thủy triều				
Hòn Dấu	Mức nước thủy triều	0,96	-0,06	0,12
Sầm Sơn		0,94	-0,01	0,13
Hòn Ngự		0,92	-0,08	0,13
Mô hình SCHISM-WWM mô phỏng mực nước tổng cộng				
Hòn Dấu	Mức nước tổng cộng	0,94	-0,05	0,17
Hòn Ngự		0,88	-0,11	0,21
Hoàng Tân		0,79	-0,12	0,28
Cửa Hội		0,83	-0,13	0,26
Mô hình SCHISM-WWM mô phỏng sóng				
Trạm	Yếu tố	NSE	ME (m)	RMSE (m)
Phao SIO	Hs	0,96	-0,09	0,23
	Tp	0,53	-0,94	1,52

3.4. Thảo luận

Hiệu suất của mô hình SCHISM trong nghiên cứu này, được định lượng qua các chỉ số thống kê cao (Bảng 2), cho thấy kết quả này phù hợp với các nghiên cứu khác bằng mô hình MIKE 21 coupled và SuWAT của Phạm Văn Tiến và cộng sự (2022, 2025) [19, 20], ROMS-SWAN của Nguyễn Lê Tuấn và cộng sự (2022) [21]. Điều này khẳng định SCHISM không chỉ là một lựa chọn thay thế mà còn là một công cụ hiện đại, có độ tin cậy cao, phù hợp với điều kiện địa hình ven biển phức tạp của Việt Nam. Việc lựa chọn mô hình lưới phi cấu trúc SCHISM mang lại một lợi thế chiến lược về phương pháp luận. Khu vực nghiên cứu bao gồm cả vùng vịnh rộng lớn và các cửa sông Mã, sông Lam hẹp và phức tạp. Lưới phi cấu trúc được thiết kế đặc biệt

để giải quyết các bài toán đa quy mô như vậy, cho phép tăng độ phân giải cục bộ tại các khu vực cửa sông mà không làm tăng chi phí tính toán một cách không cần thiết ở ngoài khơi. Ngược lại, các mô hình lưới có cấu trúc như SuWAT, ROMS phải đối mặt với một sự đánh đổi, hoặc sử dụng lưới thô không thể mô tả chính xác động lực học cửa sông, hoặc sử dụng lưới mịn đồng nhất trên toàn miền tính hoặc sử dụng lưới lồng nhiều cấp, cả hai đều dẫn đến chi phí tính toán lớn. Do đó, việc áp dụng SCHISM cho vùng ven biển Thanh Hóa - Nghệ An là một lựa chọn kỹ thuật tối ưu, phù hợp với đặc điểm địa lý và mục tiêu của bài toán dự báo chi tiết.

Hiện tượng mô hình đánh giá thấp hơn so với quan trắc là một vấn đề phổ biến trong mô hình hóa nước dâng do bão. Việc phân tích các nguyên nhân tiềm tàng là rất quan trọng để định hướng các cải tiến trong tương lai. Nguyên nhân chính và trực tiếp nhất có thể là do chất lượng của dữ liệu khí tượng đầu vào. Dữ liệu tái phân tích GFS với độ phân giải 0,25 độ (khoảng 28 km) và bước thời gian 6 giờ là tương đối thô để có thể nắm bắt được các gradient áp suất và tốc độ gió cực đoan trong vùng mắt bão và thành mắt bão. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc tăng độ phân giải của mô hình khí tượng có thể cải thiện đáng kể việc mô tả các đỉnh gió, từ đó làm tăng ứng suất gió bề mặt và dẫn đến kết quả mô phỏng nước dâng và sóng chính xác hơn [22]. Tại các trạm cửa sông như Hoàng Tân và Cửa Hội, việc mô hình đánh giá thấp mực nước còn bị chi phối bởi một yếu tố vật lý quan trọng bị bỏ qua là hiệu ứng nước dâng ngược (backwater effect). Trong thiết lập hiện tại, biên sông được áp đặt bằng một chuỗi lưu lượng một chiều, mô tả dòng chảy từ sông ra biển. Cách tiếp cận này đã không tính đến sự tương tác ngược lại khi nước dâng do bão từ biển tràn vào, làm chậm, chặn, hoặc thậm chí đảo ngược dòng chảy từ sông ra. Điều này khiến cho nước từ sông không thoát ra được, gây ra mực nước cao hơn tại vùng cửa sông. Hiện tượng này được gọi là lũ lụt tổng hợp và là một lĩnh vực nghiên cứu trọng điểm trên toàn cầu hiện nay. Các nghiên cứu tiên tiến đã chỉ ra rằng để mô phỏng chính xác hiện tượng này, cần phải có sự ghép nối hai chiều giữa mô hình thủy động lực

ven biển và mô hình thủy văn/thủy lực sông. Một nghiên cứu đột phá đã thực hiện ghép nối hai chiều giữa SCHISM và mô hình nước (NWM) của Hoa Kỳ. Kết quả cho thấy chỉ có hệ thống ghép nối hai chiều mới có thể nắm bắt được các hiện tượng đảo ngược dòng chảy và mực nước dâng đột biến tại vùng cửa sông trong các sự kiện bão, những yếu tố mà mô hình một chiều hoàn toàn bỏ qua [23, 24].

4. Kết luận

Bài báo trình bày kết quả bước đầu ứng dụng hệ thống mô hình lưới phi cấu trúc SCHISM-WWM để mô phỏng mực nước và sóng tại vùng ven biển Thanh Hóa - Nghệ An trong cơn bão Doksuri (2017). Các kết quả chính cho thấy:

Mô hình SCHISM, với các ưu điểm của lưới phi cấu trúc và bộ giải hiệu quả, đã chứng tỏ là một công cụ mạnh mẽ và phù hợp cho việc mô phỏng các quá trình thủy động lực phức tạp ở vùng ven biển Thanh Hóa - Nghệ An. Mô hình tái tạo tốt diễn biến thủy triều, sóng và mực nước tổng hợp, với các chỉ số thống kê đạt mức tin cậy cao.

Kết quả mô phỏng cho thấy xu hướng chung là đánh giá thấp hơn so với số liệu quan trắc, đặc biệt là tại các giá trị đỉnh của mực nước và sóng. Phân tích sâu hơn chỉ ra các nguyên nhân tiềm tàng bao gồm: i) Độ phân giải tương đối thấp của dữ liệu khí tượng đầu vào (số liệu GFS với độ phân giải không gian 0,25° và thời gian 6 giờ), chưa đủ để nắm bắt các đỉnh gió cực đoan của bão; và ii) Việc bỏ qua tương tác hai chiều giữa nước dâng ven biển và dòng chảy sông.

Các nghiên cứu trong tương lai nhằm xây dựng một hệ thống dự báo nghiệp vụ có độ tin cậy cao cần sử dụng các nguồn dữ liệu khí tượng có độ phân giải cao hơn, ví dụ như kết quả từ các mô hình khí tượng khu vực (như WRF), hoặc kết hợp với các mô hình gió tham số để tái tạo trường gió bão chính xác hơn. Phát triển hệ thống ghép nối hai chiều giữa mô hình thủy động lực ven biển (SCHISM) và các mô hình thủy văn/thủy lực sông để mô phỏng chính xác hơn hiện tượng lũ lụt tổng hợp tại vùng cửa sông. Tiến hành các nghiên cứu hiệu chỉnh và đánh giá độ nhạy của

các tham số vật lý quan trọng (ma sát đáy, hệ số cản gió) để tối ưu hóa hiệu năng của mô hình cho điều kiện đặc thù của vùng biển Việt Nam.

Các kết quả nghiên cứu ban đầu đối với mực nước và sóng vùng cửa sông ven biển Thanh Hóa - Nghệ An cho thấy tiềm năng to lớn của mô hình SCHISM. Đây cũng là cơ sở quan trọng để tiến tới mục tiêu xây dựng một hệ thống mô hình tổng hợp cho khu vực cửa sông ven biển, bao gồm thủy động lực, sóng, vận chuyển trầm tích, môi trường và sinh thái phục vụ phát triển bền vững.

Lời cảm ơn

Bài báo được hỗ trợ bởi đề tài cấp Bộ Nông nghiệp và Môi trường, mã số: TNMT.2024.06.03. Các tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ này.

Tài liệu tham khảo

- [1] P. K. Ngoc, N. B. Thuy, Some Initial Results on The Application of Satellite Data to Assess Forecast Wave Heights, *Journal of Meteorology and Hydrology* Vol. 727, 2021, pp. 13-23 (in Vietnamese).
- [2] L. Q. Huy, P. V. Tien, N. H. Hanh, N. T. Lan, D. L. Chi, Evaluation of the Effectiveness of Wave Forecasting in 2023 in the East Sea Area. International Scientific Conference: Science and Technology - The Key To Disaster Risk Reduction, Climate Change Response, Environmental Protection and Sustainable Development, Institute of Meteorology, Hydrology and Climate Change, 2024, pp. 149-163 (in Vietnamese).
- [3] S. Danilov, T. Ringler, Q. Wang, Large-scale Ocean Modeling on Unstructured Meshes, https://epic.awi.de/id/eprint/35926/1/clivar_unstructured.pdf (accessed on: September 12nd, 2025).
- [4] J. Z. Yinglong, Y. Fei, E. V. Stanev, S. Grashorn, Seamless Cross-scale Modeling with SCHISM, *Ocean Modelling*, Vol. 102, 2016, pp. 64-81.
- [5] On-demand Automated Storm Surge Modeling Including Inland Hydrology Effects, <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/47926> (accessed on: August 12th, 2025).
- [6] Z. Liu, H. Wang, Y. J. Zhang, L. Magnusson, J. D. Loftis, D. Forrest, Cross-scale Modeling of Storm Surge, Tide, and Inundation in Mid-atlantic Bight and New York City During Hurricane Sandy, 2012, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 233, No. 5, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106544>.
- [7] Y. J. Zhang, F. Ye, H. Yu et al., Simulating Compound Flooding Events in a Hurricane, *Ocean Dynamics*, Vol. 70, 2020, pp. 621-640, <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01351-x>.
- [8] X. Bertin, B. Mengual, A. De Bakker, T. Guérin, K. Martins, M. Pezerat, L. Lavaud, Recent Advances In Tidal Inlet Morphodynamics Modelling, *Journal of Coastal Research*, Vol. 95, 2020, pp. 1016-1020, <https://doi.org/10.2112/SI95-198.1>.
- [9] Y. Yang, W. Guan, E. Deleersnijder, Z. He, Hydrodynamic and Sediment Transport Modelling in the Pearl River Estuary And Adjacent Chinese Coastal Zone During Typhoon Mangkhut, *Continental Shelf Research*, Vol. 233, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104645>.
- [10] X. Cai, Y. J. Zhang, J. Shen, H. Wang, Z. Wang, Q. Qin, F. Ye, A Numerical Study of Hypoxia in Chesapeake Bay Using an Unstructured Grid Model: Validation And Sensitivity to Bathymetry Representation, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 58, No. 6, 2022, pp. 898-921, <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12887>.
- [11] Y. Zhang, A. M. Baptista, SELFE: A Semi-Implicit Eulerian-Lagrangian Finite-Element Model for Cross-Scale Ocean Circulation, *Ocean Modelling*, Vol. 21, No. 3-4, 2008, pp. 71-96, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2007.11.005>.
- [12] Y. Zhang, E. Ateljevich, H. S. Yu, C. H. Wu, J. Yu, A New Vertical Coordinate System for A 3D Unstructured-Grid Model, *Ocean Modelling*, Vol. 85, 2015, pp. 16-31, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2014.10.003>.
- [13] F. Ye, W. Huang, Y. J. Zhang, S. Moghimi, E. Myers, S. Pe'eri, H. C. Yu, A Cross-Scale Study for Compound Flooding Processes During Hurricane Florence, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 21, 2021, pp. 1703-1719, <https://doi.org/10.5194/nhess-21-1703-2021>.
- [14] A. Roland, Development of WWM II: Spectral Wave Modelling On Unstructured Meshes, Ph. D. Thesis, Technische Universität Darmstadt, Institute of Hydraulic and Water Resources Engineering, 2009.
- [15] A. Roland, Y. J. Zhang, H. V. Wang, Y. Meng, Y. C. Teng, V. Maderich, I. Brovchenko, M. D. Sikiric, U. Zanke, A Fully Coupled 3D Wave-Current Interaction Model on Unstructured Grids, *Journal of Geophysical Research: Oceans*,

- Vol. 117, No. C11, 2012,
<https://doi.org/10.1029/2012JC007952>
- [16] F. H. Lyard, D. J. Allain, M. Cancet, L. Carrère, N. Picot, FES2014 Global Ocean Tide Atlas: Design and Performance, *Ocean Sci*, Vol. 17, 2021, pp. 615-649,
<https://doi.org/10.5194/os-17-615-2021>.
- [17] L. H. Dung, Zoning of Natural Disaster Risks and Mapping of Flood and Inundation Warnings, Project Summary Report at the Ministry of Natural Resources and Environment Level, Institute of Meteorology, Hydrology and Climate Change, 2023 (in Vietnamese).
- [18] P. V. Tien, N. B. Thuy, N. K. Cuong, Simulation of Surge and Wave in Doksuri Storm 2017 Using Couple Model, Proceedings of the East Sea International Conference 9/2022, Nha Trang Institute of Oceanography, pp. 756-762 (in Vietnamese).
- [19] P. V. Tien, N. B. Thuy, S. Kim, N. K. Cuong, P. K. Ngoc, M. V. Khiem, R. H. Lars, 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, *Regional Studies in Marine Science*, Vol. 87, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104234>.
- [20] N. L. Tuan, N. T. Khang, L. D. Dung, N. H. Anh, Application of ROMS-SWAN Coupled Model to Simulate Hydrodynamic Field in Hai Phong, *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, 2022, pp. 123-132, <https://doi.org/10.15625/1859-3097/16127>.
- [21] J. Yang, L. Li, K. Zhao, P. Wang, D. Wang, I. M. Sou et al., A comparative Study of Typhoon Hato (2017) and Typhoon Mangkhut (2018) - Their Impacts on Coastal Inundation in Macau, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 124, 2019, pp. 9590-9619, <https://doi.org/10.1029/2019JC015249>.
- [22] D. Feng, Z. Tan, D. Engwirda, C. Liao, D. Xu, G. Bisht, T. Zhou, H. Y. Li, L. R. Leung, Investigating Coastal Backwater Effects and Flooding in the Coastal Zone Using A Global River Transport Model on an Unstructured Mesh, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 26, 2022, pp. 5473-5491, <https://doi.org/10.5194/hess-26-5473-2022>.
- [23] H. Zhang, D. Shen, S. Bao, P. Len, Two-Way Coupling of the National Water Model (NWM) and Semi-Implicit Cross-Scale Hydrosience Integrated System Model (SCHISM) for Enhanced Coastal Discharge Predictions, *Hydrology*, Vol. 11, No. 9, 2024, pp. 1-16, <https://doi.org/10.3390/hydrology11090145>.