



Original Article

Simulation of the Hydrodynamic Field in Nhat Le Estuary, Quang Binh Province

Nguyen Xuan Loc*, Dang Dinh Duc, Tran Vinh Quang

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

Received 17 September 2019

Revised 29 August 2020; Accepted 31 August 2020

Abstract: Hydrodynamic field is the primary research problem of all studies on coastal estuarine areas. Over the years, there have been many studies on Nhat Le estuary's region (Quang Binh). Still, these studies have not focused on simulating the characteristics of the hydrodynamics of this area. This study presents the ability to apply a mathematical model to simulate hydrodynamic fields for the region of Nhat Le estuary and Quang Binh sea by constructing the MIKE 21 model set based on the actual measurement database by the Center for Environmental Fluid Dynamics implemented in 2018. Through the calculation scenarios under different conditions, the longshore current mainly consists of Southeast - Northwest (especially with NE waves, the current direction is Northwest - Southeast) with current speed mostly in the range of 0.1 - 0.4 m/s. In estuarine areas, river flows have complicated developments, including many component flows. In the dry season, the river flow is not strong and is dominated by changes in the tide phase, withdrawal in a day. There are days of high flood flow in the flood season, overwhelming the tidal currents; the maximum flow velocity at the door can reach more than 6 m/s. Waves in the southwest monsoon season are relatively small, about 0.25 - 0.6 m; while the waves in the Northeast monsoon season are quite large and very strong during the storm, but when the depth is about -3 to -4 m, the wave height decreases sharply, spreading to the door. In particular, when there are floods in the river, the waves that propagate through this depth will almost calm.

Keywords: Nhat Le estuary, hydrodynamics, simulation.

* Corresponding author.

E-mail address: nxloc@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuces.4460>

Mô phỏng trường thủy động lực khu vực cửa Nhật Lệ, Quảng Bình

Nguyễn Xuân Lộc*, Đặng Đình Đức, Trần Vinh Quang

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

Nhận ngày 17 tháng 9 năm 2019

Chỉnh sửa ngày 29 tháng 8 năm 2020; Chấp nhận đăng ngày 31 tháng 8 năm 2020

Tóm tắt: Trường thủy động lực là vấn đề nghiên cứu cơ bản của tất cả các nghiên cứu về các vùng cửa sông ven biển. Nhiều năm qua, đã có nhiều nghiên cứu về khu vực cửa Nhật Lệ (Quảng Bình) nhưng những nghiên cứu này chưa thực sự tập trung vào mô phỏng đặc điểm của trường thủy động lực của khu vực này. Nghiên cứu này sẽ trình bày khả năng ứng dụng mô hình toán để mô phỏng trường thủy động lực cho khu vực cửa Nhật Lệ, Quảng Bình thông qua xây dựng bộ mô hình MIKE 21 dựa trên cơ sở dữ liệu thực đo do Trung tâm Động lực học- Thủy khí- Môi trường thực hiện năm 2018. Thông qua các kịch bản tính toán trong các điều kiện khác nhau, dòng chảy dọc bờ chủ yếu có hướng Đông Nam – Tây Bắc (riêng với sóng Đông Bắc, hướng dòng chảy là Tây Bắc – Đông Nam) với vận tốc dòng chảy dao động chủ yếu trong khoảng 0,1 – 0,4 m/s. Ở khu vực cửa sông, dòng chảy sông có những diễn biến phức tạp, bao gồm nhiều dòng chảy thành phần. Vào mùa kiệt, dòng chảy sông không mạnh và bị chi phối biến đổi đều theo pha triều dâng, rút trong một ngày. Vào mùa lũ, có những ngày dòng chảy lũ lớn, lần át dòng triều, vận tốc dòng chảy lớn nhất tại cửa có thể lên tới hơn 6m/s. Sóng trong mùa gió Tây Nam khá nhỏ khoảng 0,25 – 0,6m; trong khi sóng trong mùa gió Đông Bắc khá lớn và rất mạnh trong lúc có bão, nhưng khi đến độ sâu khoảng -3m đến -4m thì độ cao sóng giảm mạnh, lan truyền đến sát cửa sông. Đặc biệt, khi có lũ trong sông ra, sóng khi lan truyền qua độ sâu này sẽ gần như lặn sóng.

Từ khóa: cửa Nhật Lệ, thủy động lực, mô phỏng.

1. Mở đầu

Dọc bờ biển miền Trung Việt Nam có nhiều cửa sông với nhiều đặc trưng thủy động lực khác nhau tương ứng. Các yếu tố thủy động lực này là các yếu tố cơ bản, tác động trực tiếp đến các quá trình vận chuyển trầm tích, sinh học, sinh thái,... và đồng thời cũng là những thông số quan trọng để thiết kế, thi công các công trình thủy tại mỗi khu vực cửa sông. Vì thế, việc nghiên cứu, mô phỏng làm rõ các yếu tố đặc trưng này giúp những nhà quản lý mỗi địa phương có thể đưa ra

những chính sách phát triển kinh tế phù hợp với địa phương mình.

Đã có nhiều nghiên cứu mô phỏng về thủy động lực khu vực biển Bắc Trung Bộ và Quảng Bình nói chung, khu vực cửa Nhật Lệ nói riêng được tiến hành trong nhiều năm qua. Điển hình như ứng dụng mô hình MIKE Flood tính toán ngập lụt hệ thống sông Nhật Lệ tỉnh Quảng Bình [1], đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đến ngập lụt lưu vực sông Nhật Lệ [2], nghiên cứu rủi ro về người do ngập lụt lưu vực sông Kiến

* Tác giả liên hệ:

Địa chỉ email: nxloc@hus.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.4460>

Giang và sông Long Đại ở Quảng Bình [3], nghiên cứu điều kiện sóng gần bờ khu vực cửa Nhật Lệ [4]. Các nghiên cứu công trình nghiên cứu công bố liên quan đã thu được những kết quả quan trọng, góp phần làm sáng tỏ đặc điểm trường thủy động lực khu vực. Tuy nhiên, các nghiên cứu này đều tập trung vào những mục tiêu nghiên cứu khác nhau về các vấn đề hoặc từng vấn đề riêng rẽ trong điều kiện thủy động lực tại khu vực như ngập lụt, vận chuyển trầm tích xói lở bờ,... chưa hoàn toàn tập trung vào trường thủy động lực khu vực cửa Nhật Lệ nhưng vẫn là nguồn tư liệu quý giá cho các nghiên cứu tiếp theo về trường thủy động lực khu vực Bắc Trung Bộ và Quảng Bình nói chung, cửa Nhật Lệ nói riêng, trong đó có nghiên cứu này. Nghiên cứu này sẽ trình bày khả năng ứng dụng mô hình toán để mô phỏng trường thủy động lực cho khu vực cửa Nhật Lệ, Quảng Bình.

Cửa Nhật Lệ cách trung tâm thành phố Đồng Hới khoảng 3 km về phía Đông Bắc. Đây là nơi tận cùng của con sông cùng tên bắt nguồn từ đỉnh Trường Sơn phía Tây Quảng Bình đổ ra biển. Hướng đường bờ khu vực cửa Nhật Lệ chạy theo hướng Tây Bắc – Đông Nam. Với hướng đường bờ này, khu vực cửa Nhật Lệ chịu ảnh hưởng mạnh bởi sóng Đông Bắc và Đông kết hợp với lũ thường tập trung vào các tháng X, XI, XII khiến trường thủy động lực tại khu vực này khá phức tạp. Ngoài ra Quảng Bình thường xuyên chịu ảnh hưởng của bão trong khoảng thời gian từ tháng VIII – X, gây nhiều thiệt hại nặng nề cho khu vực này. Tổng hòa những yếu tố này, việc mô phỏng được trường thủy động lực từ đó nắm bắt được đặc điểm trường thủy động lực sẽ có tác động lớn tới những kế hoạch phòng chống thiên tai và chính sách phát triển của địa phương.



Hình 1. Khu vực cửa Nhật Lệ.

2. Phương pháp và tài liệu

2.1. Phương pháp và cách tiếp cận

Có nhiều phương pháp khác nhau để đánh giá, phân tích trường thủy động lực của một khu vực, trong đó có hai phương pháp chính là phân tích bằng mô hình và phân tích bằng kinh nghiệm. Phương pháp phân tích bằng mô hình thể hiện được tính trực quan, theo dõi dễ dàng giúp cho việc đánh giá, nhận xét một cách khách quan hơn phương pháp phân tích bằng kinh nghiệm. Hiện nay, phương pháp phân tích bằng mô hình gồm hai phương pháp là mô hình vật lý và mô hình toán (mô hình giải tích và mô hình số). Nghiên cứu này sẽ sử dụng phương pháp phân tích bằng mô hình số bởi tính trực quan, sinh động, dễ theo dõi và đánh giá, cho phép mô tả các quá trình (theo thời gian) trên toàn miền nghiên cứu (theo không gian), thực hiện nhanh, các kết quả phân tích mang tính định tính và định lượng. Trên thế giới có nhiều mô hình toán có thể sử dụng như: MIKE, DELFT 3D, SMS,... trong đó, bộ mô hình MIKE đã được sử dụng ở nhiều nước trên thế giới và ở Việt Nam, đây là bộ mô hình có đủ các chức năng đáp ứng việc giải quyết bài toán thực tế, trong đó có bài toán mô phỏng trường thủy động lực. Mô đun liên hợp MIKE21 FM (HD và SW) trong bộ chương trình được sử dụng cho nghiên cứu này.

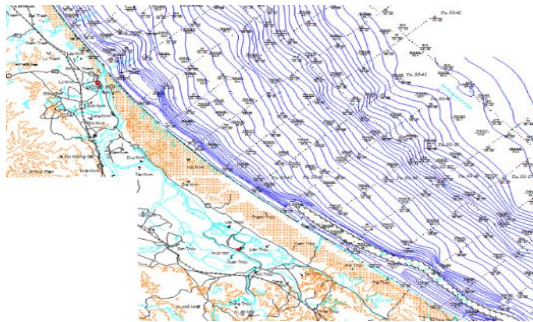
2.2. Khảo sát thực địa và thu thập số liệu

Nghiên cứu đã tiến hành thu thập số liệu từ nhiều nguồn khác nhau như nguồn số liệu sóng tái phân tích của Trung tâm dự báo khí tượng hạn vừa Châu Âu (ECMWF) và nguồn số liệu sóng ven bờ, chế độ dòng chảy, mực nước, địa hình, khu vực cửa Nhật Lệ từ số liệu khảo sát thực địa do Trung tâm Động lực học Thủy khí Môi trường (CEFD), Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQGHN đo đạc tháng 4 và tháng 6/2018 (đợt 1: 23 – 26/4/2018; đợt 2: 25/5 – 08/06/2018) cho hiệu chỉnh kiểm định mô hình mô phỏng trường thủy động lực khu vực cửa Nhật Lệ.

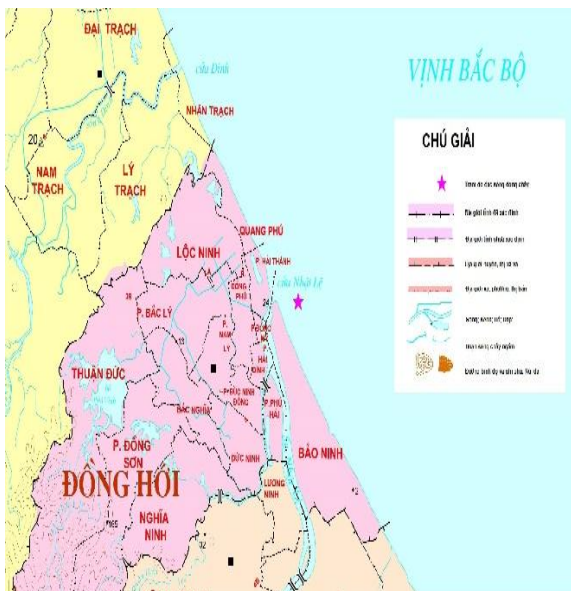
Tần suất xuất hiện sóng theo độ cao từ nguồn số liệu từ ECMWF được thống kê từ 1979 đến 2018 cho thấy, độ cao sóng chủ yếu nằm trong

khoảng từ 0,5 đến 1,0 chiếm 50,47%. Hướng sóng khu vực ngoài khơi cửa Nhật Lệ gồm các hướng chính là hướng Đông Bắc, Đông và Đông Nam chiếm tần suất lần lượt là 25,59%, 32,05% và 21,52%.

Với khu vực khảo sát địa hình được đo vẽ theo tỷ lệ 1:5000, thực hiện khảo sát với khoảng cách các điểm trên một tuyến mặt cắt khoảng 5 - 10m, khoảng cách giữa các mặt cắt khoảng 50 - 100m (phần ngoài biển) và từ 30 - 50m (phần trong sông). Khu vực phía ngoài khơi, không đủ số liệu khảo sát sẽ được bổ sung bằng số liệu hải đồ được thu thập từ báo cáo “Điều tra địa chất và tìm kiếm khoáng sản rắn biển ven bờ (0 đến 30 mét nước) Việt Nam tỷ lệ 1:500.000” bao gồm mảnh số 14 và mảnh số 15 (Hình 2).



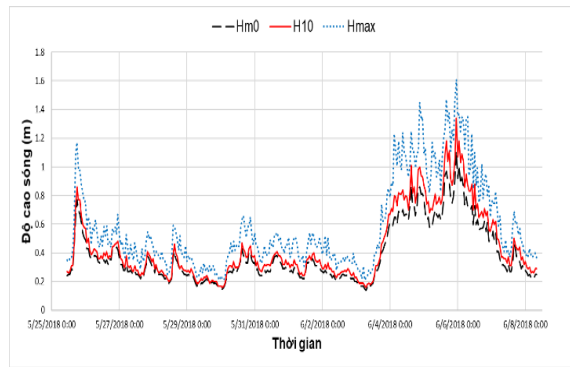
Hình 2. Hải đồ khu vực nghiên cứu.



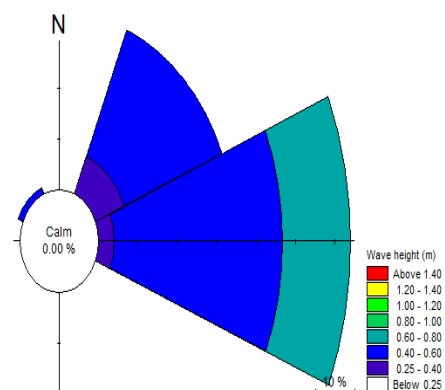
Hình 3. Vị trí trạm đo đặc sóng, dòng chảy.

Số liệu đo đạc trong hai đợt khảo sát thực địa bao gồm địa hình khu vực nghiên cứu, các số liệu khảo sát thủy hải văn khu vực cửa Nhật Lệ bao gồm các yếu tố sóng, dòng chảy, mực nước khu vực cửa Nhật Lệ sẽ được sử dụng trong nghiên cứu. Sơ đồ trạm đo được thể hiện trên Hình 3.

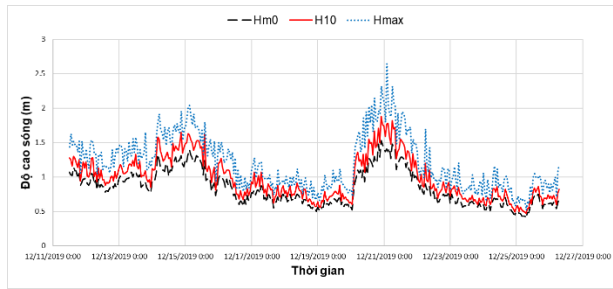
Kết quả đo đạc cho thấy, trong đợt khảo sát thứ nhất, độ cao sóng trung bình khoảng 0,51m (Hình 4), hướng sóng chủ đạo là hướng Đông và Đông Bắc (Hình 5). Vận tốc dòng chảy trung bình tại vị trạm đo sóng - dòng chảy là 0,143m/s (Hình 8). Trong đợt khảo sát thứ hai, độ cao sóng trung bình là 0,39m (Hình 6), hướng sóng chủ đạo là Đông và Đông Bắc (Hình 7); vận tốc dòng chảy trung bình tại trạm đo sóng - dòng chảy là 0,151 m/s (Hình 9).



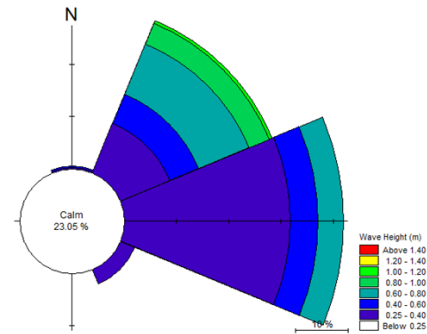
Hình 4. Độ cao sóng trong đợt khảo sát thứ nhất (25/5 – 8/6/2018).



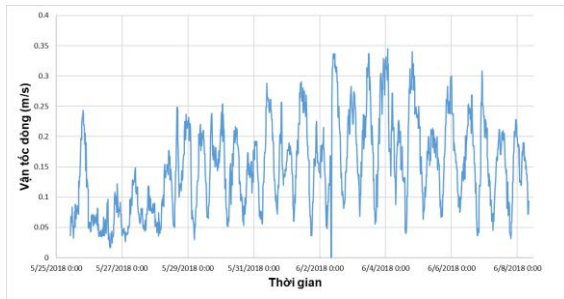
Hình 5. Hoa sóng trong đợt khảo sát thứ nhất (25/5 – 8/6/2018).



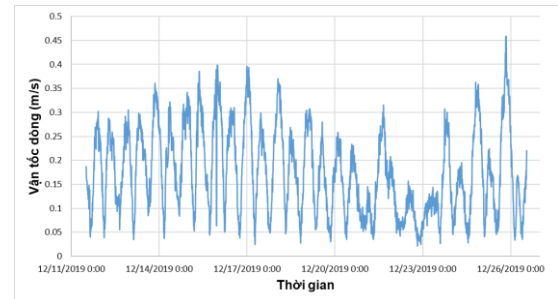
Hình 6. Độ cao sóng trong đợt khảo sát thứ hai (25/5 – 8/6/2018).



Hình 7. Hoa sóng trong đợt khảo sát thứ hai (11 – 26/12/2019).



Hình 8. Vận tốc dòng chảy tại cửa đầm trong đợt khảo sát thứ nhất (25/5 – 8/6/2018).



Hình 9. Vận tốc dòng chảy trong đợt khảo sát thứ hai (11 – 26/12/2019).

2.3. Thiết lập mô hình toán

Trường thủy động lực khu vực cửa Nhật Lệ được mô phỏng bởi mô hình MIKE 21/3 do Viện Thủy lực Đan Mạch xây dựng. Mô hình này được xây dựng dựa trên lưới phần tử hữu hạn, nên địa hình được thể hiện tối ưu nhất với các bước lưới phi cấu trúc hình tam giác. Ưu điểm của mô hình này là mô phỏng chính xác các đặc tính của địa hình khu vực nghiên cứu, với nhiều tỷ lệ mắt lưới khác nhau trên cùng một địa hình. hai mô đun quan trọng là MIKE21 HD và MIKE21 SW. Việc liên kết động các mô đun cho phép tính toán sự tác động qua lại, lẫn nhau giữa các quá trình như tương tác sóng - dòng chảy, ảnh hưởng của các quá trình khác nhau. Đây cũng là hai mô đun được sử dụng để mô phỏng và kết quả mô phỏng của mô hình được hiệu chỉnh kiểm định qua số liệu thực đo thông qua hai đợt khảo sát do CEFD thực hiện.

Xây dựng lưới tính và thiết lập mô hình tính toán trên cơ sở cân đối về thời gian tính toán,

phạm vi tính toán, độ chi tiết địa hình, độ phân giải lưới tính và xu thế phù hợp bản chất vật lý của các quá trình thủy động lực vùng ven bờ. Căn cứ trên mục tiêu nghiên cứu và bộ dữ liệu đã thu thập, khảo sát miền tính toán được xác định trung tâm là cửa Nhật Lệ và bờ biển hai bên. Miền tính được mở rộng về cả hai phía Bắc và Nam của khu vực dự án nhằm mục đích giảm ảnh hưởng của các biên và xét được các nguồn phát sinh vật chất có thể ảnh hưởng đến khu vực cửa sông, đồng thời có thể tính toán được các đặc điểm bờ biển hai bên bờ của cửa Nhật Lệ.

+ Biên ngoài biển: biên phía Bắc cách khu vực cửa sông khoảng 7km và biên phía Nam cách cửa sông khoảng 9km và biên phía Đông cách cửa sông khoảng 4,5km.

+ Biên trong sông: kéo dài sâu vào tới cầu Quán Hàu.

+ Độ phân giải: lưới tính của miền lớn được xây dựng với số lượng 15817 phần tử, độ phân giải ô lưới được tùy biến từ cao đến thấp tùy theo mức độ quan tâm đối với khu vực với kích thước

ô nhỏ khoảng 20 - 30m, ô lớn khoảng 400 - 500m (ở khu vực biển nước sâu). Lưới tính được thiết lập từ bản đồ địa hình do CEFD thực hiện và dữ liệu độ sâu toàn cầu GEBCO_2019 (Hình 10 và Hình 11).

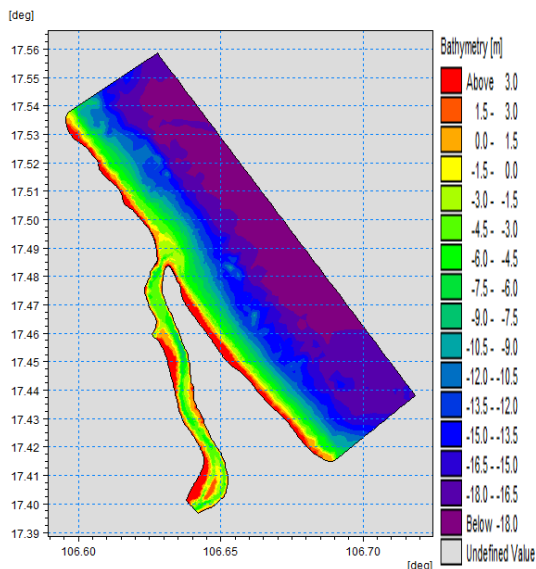
Các điều kiện của mô hình:

- Số liệu sóng ngoài khơi nhận được từ điểm có số liệu sóng tái phân tích toàn cầu (từ nguồn ECMWF) gần khu vực nghiên cứu nhất được sử dụng để làm biên đầu vào cho biên phía Biển Đông.

- Số liệu mực nước thủy triều (thiên văn) dự tính từ bộ công cụ MIKE 21 Toolbox được sử dụng làm điều kiện biên mực nước cho mô hình.



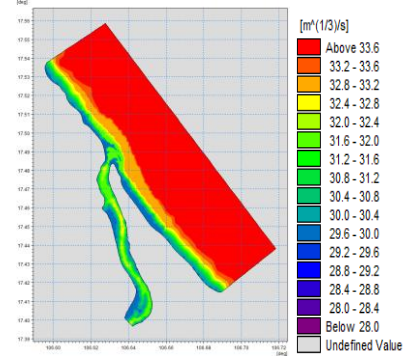
Hình 10. Lưới tính toán của khu vực nghiên cứu.



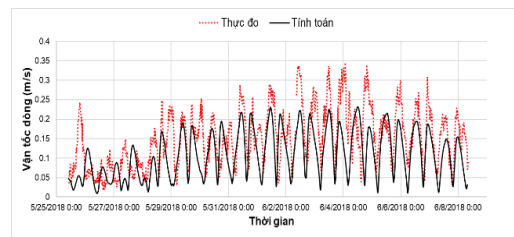
Hình 11. Địa hình khu vực nghiên cứu.

- Số liệu mực nước và dòng chảy cho biên sông tại cầu Quán Hâu được tính toán từ bộ mô hình thủy lực 1 chiều (MIKE 11) được xây dựng trong khuôn khổ Dự án: “Nghiên cứu thủy tai do biến đổi khí hậu và xây dựng hệ thống thông tin nhiều bên tham gia nhằm giảm thiểu tính dễ bị tổn thương ở Bắc Trung Bộ Việt Nam (CPIS)” thuộc Chương trình thí điểm hợp tác nghiên cứu Việt Nam – Đan Mạch 2012 - 2015 do trường Đại học Khoa học Tự nhiên chủ trì thực hiện năm 2014.

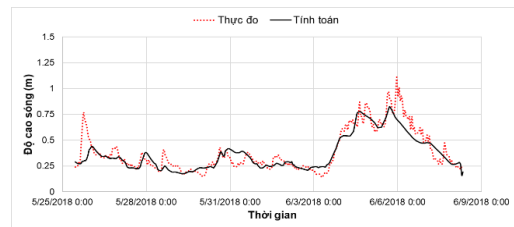
- Số liệu dòng chảy ngoài khơi biên ngoài khơi được thu thập từ nguồn số liệu dòng chảy từ mô hình đại dương hỗn hợp (HYCOM) của Trung tâm Nghiên cứu và Dự báo Khí tượng – Hải dương Mỹ (COAPS).



Hình 12. Thông số nhám Manning được xây dựng biến đổi trên toàn miền tính.



Hình 13. Hiệu chỉnh vận tốc dòng chảy.

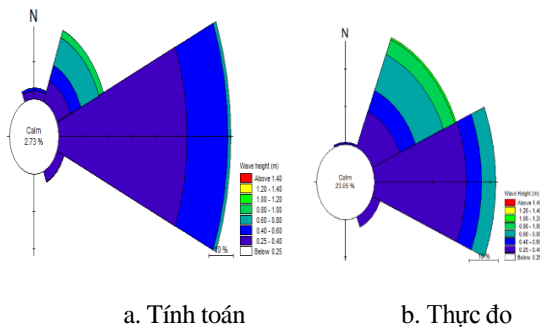


Hình 14. Hiệu chỉnh độ cao sóng.

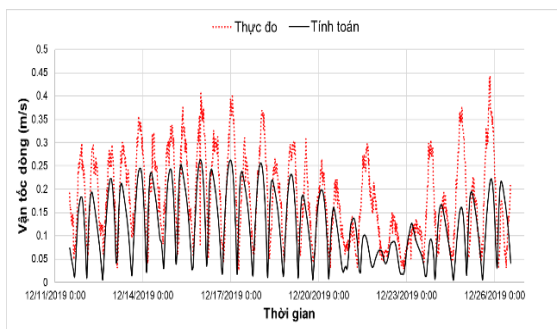
Để kết quả từ mô hình đã xây dựng đưa ra là chính xác, nghiên cứu đã tiến hành hiệu chỉnh – kiểm định mô hình theo chuỗi số liệu đo đạc thực đo. Số liệu sóng và dòng chảy trong thời kỳ khảo sát từ ngày 25/5 – 8/6/2018 được sử dụng để hiệu chỉnh mô hình và số liệu trong thời gian từ 11 – 26/12/2019 được sử dụng để kiểm định mô hình. Các thông số được hiệu chỉnh bao gồm thông số nhám đáy, ma sát gió. Trong đó thông số nhám đáy cho mô đun thủy lực HD sử dụng số Manning biến đổi toàn miền tính (Hình 12), hệ số ma sát gió biến đổi theo vận tốc gió từ 0,001255 – 0,002425. Kết quả hiệu chỉnh mô hình trong thời đoạn này được thể hiện từ Hình 13 đến Hình 15 và kết quả kiểm định mô hình được thể hiện trên Hình 16 đến hình 18. Các kết quả hiệu chỉnh kiểm định được đánh giá sai số thông qua chỉ số RMSE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t^{obs} - x_t^{sim})^2}$$

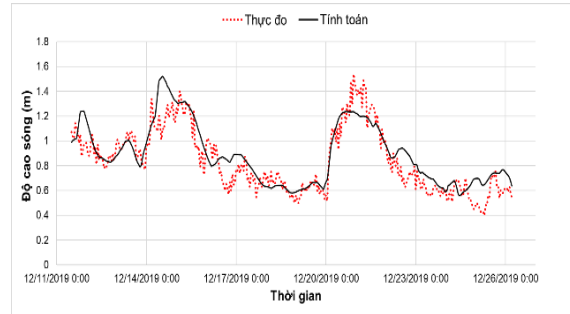
Trong đó: x_t^{obs} là giá trị quan trắc tại thời điểm t, x_t^{sim} là giá trị tính toán tại thời điểm t.



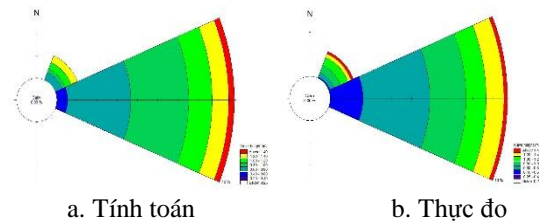
Hình 15. Hiệu chỉnh hướng sóng.



Hình 16. Kiểm định vận tốc dòng chảy.



Hình 17. Kiểm định độ cao sóng.



Hình 18. Kiểm định hướng sóng.

Bảng 1. Bảng đánh giá sai số theo chỉ số RMSE

Yếu tố / Giai đoạn	Độ cao sóng		Vận tốc dòng chảy	
	Hiệu chỉnh	Kiểm định	Hiệu chỉnh	Kiểm định
Độ cao sóng	0,09	0,13	0,08	0,09
Vận tốc dòng chảy	0,09	0,09	0,08	0,09

Theo đó, các kết quả đánh giá sai số thu được là tương đối tốt (tiến gần tới sai số bằng 0) đối với cả sóng và dòng chảy. So sánh với một kết quả một số nghiên cứu sử dụng RMSE để đánh giá sai số [6 - 11], kết quả sai số thu được từ nghiên cứu này là khá tốt, RMSE nằm trong khoảng 0,08 – 0,09 cho dòng chảy so với một số nghiên cứu như nghiên cứu mô phỏng trường thủy động lực tại vùng ven bờ Rio de la Plata và Montevideo [6] cho RMSE của dòng chảy trong khoảng 0,112 – 0,321, RMSE = 0,18 – 0,97 trong nghiên cứu mô phỏng thủy động lực khu vực đầm Shongkhla tại Thái Lan [8]. Ngoài ra RMSE cho độ cao sóng thu được từ hiệu chỉnh kiểm định, nằm trong khoảng 0,09 – 0,13, kết quả này là tốt khi so với một số nghiên cứu như RMSE cho độ cao sóng nằm trong khoảng 0,3 – 0,38 [10], 0,17 – 0,43 cho độ cao sóng gió và sóng

lùng trong nghiên cứu của Qingxiang Liu và các cộng sự [11]. Từ các kết quả này có thể thấy, bộ thông số mô hình đã xây dựng có tính ổn định và khá chính xác trong việc mô phỏng các quá trình thủy động lực tại khu vực nghiên cứu và có đủ tin cậy để mô phỏng các kịch bản tính toán sau.

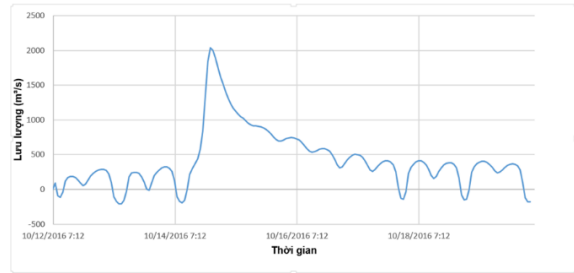
2.4. Xây dựng kịch bản tính toán

Các kịch bản tính toán được đưa ra nhằm mô phỏng mọi điều kiện thủy động lực có thể xảy ra tại khu vực cửa Nhật Lệ, để từ đó có thể đánh giá và nêu ra được những đặc điểm của trường thủy động lực của khu vực nghiên cứu. Nghiên cứu tiến hành xây dựng các kịch bản mô phỏng cho khu vực nghiên cứu bao gồm mô phỏng trường thủy động lực điều kiện bình thường và các kịch bản tính toán theo các đặc trưng thủy hải văn với các điều kiện sóng trong Bảng 2.

Ba hướng sóng này đặc trưng cho hai hướng gió thịnh hành tại khu vực nghiên cứu là hướng gió Đông Bắc và Tây Nam, trong đó sóng hướng Đông là sóng hướng chủ đạo. Các điều kiện sóng tính toán trong các kịch bản này dựa theo thống kê số liệu sóng tái phân tích (từ nguồn số liệu của ECMWF) từ năm 1979 – 2018, theo đó: đối với sóng hướng Đông Bắc và Đông, tần suất độ cao sóng từ 0 – 2m lần lượt chiếm 82% và 99% tần suất độ cao sóng của mỗi hướng; đối với sóng hướng Tây Nam, tần suất độ cao sóng từ 0 – 1,5m chiếm 99% tần suất độ cao sóng hướng Tây Nam. Có thể thấy, đây là thông số độ cao sóng phù hợp, đủ để mô tả đặc trưng đặc điểm trường của khu vực và là điều kiện đầu vào cho nhóm các kịch bản mô phỏng đặc trưng sóng kết hợp lũ (lũ tần suất 10%) và kiệt trong sông Nhật Lệ.

Bảng 2. Các kịch bản tính toán

Trong sông \ Sóng	Kiệt	Lũ
Đông Bắc (H=2m, T=7s)	KB1	KB4
Đông (H=2m, T=6s)	KB2	KB5
Đông Nam (H=1,5m, T=5s)	KB3	KB6



Hình 19. Đường quá trình lũ 10% tại Quán Hàu (sông Nhật Lệ).



Hình 20. Đường đi của cơn bão Doksuri (9/2017).

Đối với kịch bản điều kiện hiện trạng – mô phỏng trong hai mùa gió Đông Bắc và Tây Nam (các điều kiện thủy động lực tại hiện trạng thời điểm mô phỏng), do trong trong khu vực nghiên cứu không có các tài liệu quan trắc dài hạn nên nghiên cứu sẽ sử dụng số liệu sóng ngoài khơi tại biên ngoài của miền tính trích xuất từ cơ sở dữ liệu sóng tái phân tích toàn cầu (từ nguồn số liệu của ECMWF) để tính toán.

Ngoài ra, với đặc điểm của Quảng Bình là thường xuyên chịu tác động của những cơn bão, nghiên cứu cũng mô phỏng thêm trường hợp bão đi vào khu vực nghiên cứu (KB7), ở đây là cơn bão Doksuri (cơn bão số 10) đổ bộ vào khu vực 9/2017.

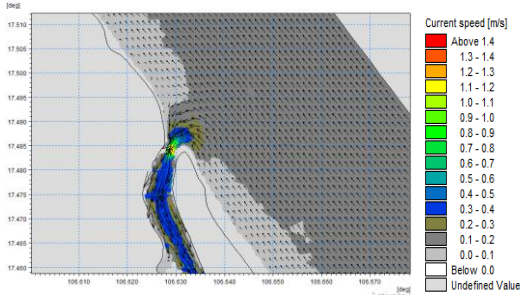
3. Kết quả mô phỏng

3.1. Kịch bản trong điều kiện bình thường

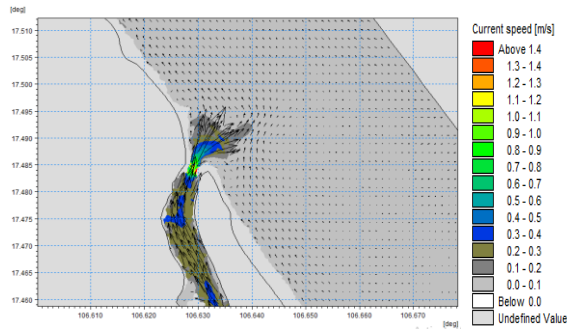
i) Mùa gió Tây Nam

Với các điều kiện thủy động lực bình thường, trong mùa gió Tây Nam (Hình 21), vận tốc dòng

chảy vào mùa này không quá lớn, vận tốc dòng chảy khu vực ngoài biển chỉ khoảng 0,1 – 0,2 m/s và thường có dòng chảy dọc bờ hướng Đông Nam - Tây Bắc, trong sông khoảng 0,2 – 0,4 m/s.

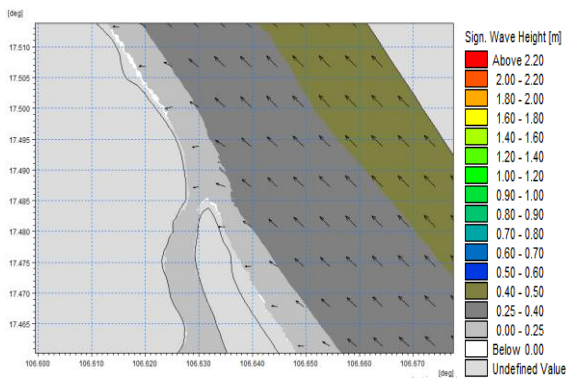


a. Trường dòng chảy tại cửa Nhật Lệ mùa gió Tây Nam trong pha triều lên



b. Trường dòng chảy tại cửa Nhật Lệ mùa gió Tây Nam trong pha triều xuống

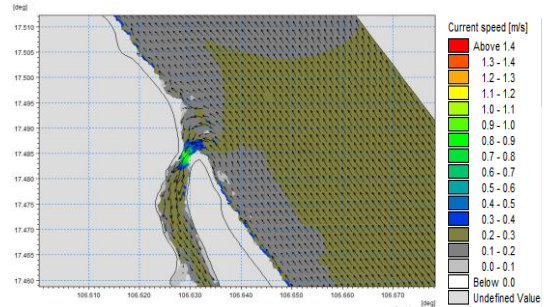
Hình 21. Trường dòng chảy khu vực cửa Nhật Lệ trong điều kiện bình thường mùa gió Tây Nam.



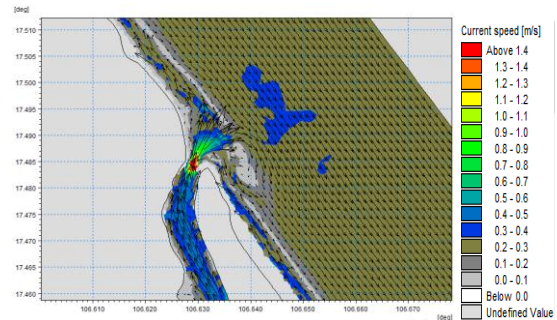
Hình 22. Trường sóng tại cửa Nhật Lệ trong điều kiện bình thường của mùa gió Tây Nam.

Do đặc điểm hình thái cửa sông bó hẹp ở cửa, dù lượng nước từ trên thượng nguồn xuống không quá nhiều vào mùa này nhưng vận tốc dòng ở đây có thể lên đến 1,2 m/s.

Trong khi đó, đối với sóng, độ cao sóng trong mùa này khá nhỏ (Hình 22), sóng ngay tại cửa chỉ khoảng 0,25m, khu vực ngoài khơi cửa Nhật Lệ khoảng 0,25 đến 0,6m.

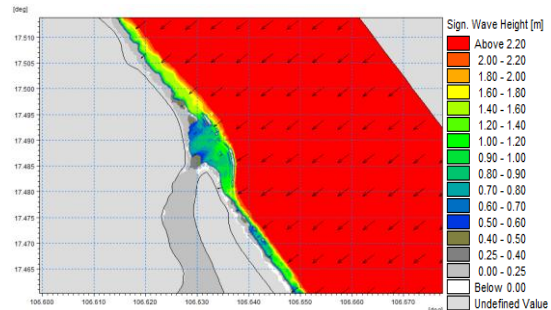


a. Trường dòng chảy tại cửa Nhật Lệ mùa gió Đông Bắc trong pha triều lên



b. Trường dòng chảy tại cửa Nhật Lệ mùa gió Đông Bắc trong pha triều xuống

Hình 23. Trường dòng chảy khu vực cửa Nhật Lệ trong điều kiện bình thường mùa gió Đông Bắc.



Hình 24. Trường sóng tại cửa Nhật Lệ trong điều kiện bình thường của mùa gió Đông Bắc.

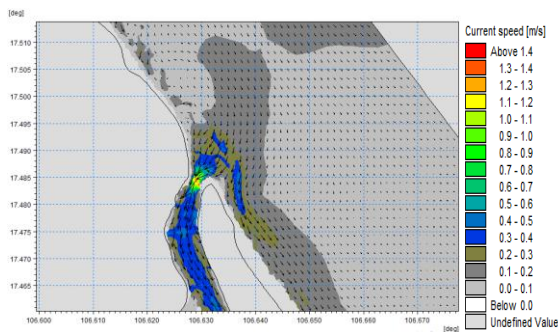
ii) Mùa gió Đông Bắc

Trong mùa gió Đông Bắc (Hình 23), vận tốc dòng chảy vào mùa này lớn hơn so với mùa gió Tây Nam. Dòng chảy dọc bờ hướng Đông Nam - Tây Bắc, một số thời điểm khác có hướng ngược lại vận tốc dòng chảy khoảng 0,2 – 0,4 m/s. Phía trong sông, vận tốc dòng chảy không có lũ khoảng 0,3 – 0,6 m/s. Tại vị trí hẹp nhất tại cửa, vận tốc dòng lên đến hơn 1,4 m/s. Ngoài ra, sóng trong mùa này khá lớn, hơn 2m ở ngoài khơi ngay phía ngoài cửa (Hình 24). Tại độ sâu khoảng -3 đến -4m, sóng lớn từ ngoài khơi đi vào và bắt đầu đổ, đến vị trí bó hẹp tại cửa, độ cao sóng vẫn còn lên đến 0,4 – 0,5m. Tuy nhiên sóng không đi sâu được vào hơn bên trong nhưng cũng lan truyền đến khu vực bó hẹp tại cửa Nhật Lệ.

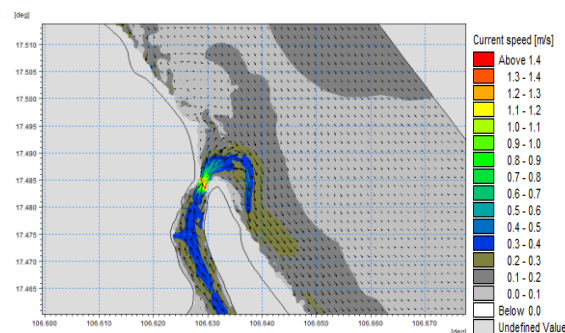
3.2. Các kịch bản tính toán theo đặc trưng thủy hải văn

Kịch bản 1 – KB1 (sóng Đông Bắc, mùa kiệt)

Trong KB1, với điều kiện là vào mùa kiệt nên vận tốc dòng chảy trong sông không quá lớn, vận tốc dao động trong khoảng 0,2 – 0,4 m/s.

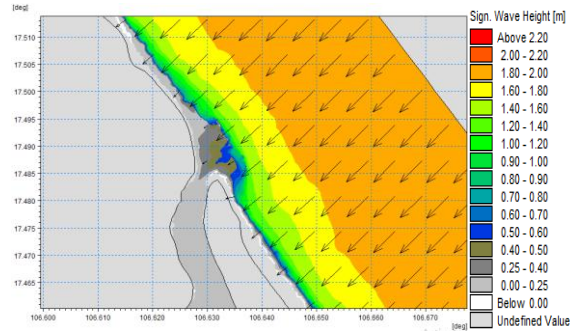


a. Trường dòng chảy tại thời điểm triều lên



b. Trường dòng chảy tại thời điểm triều xuống

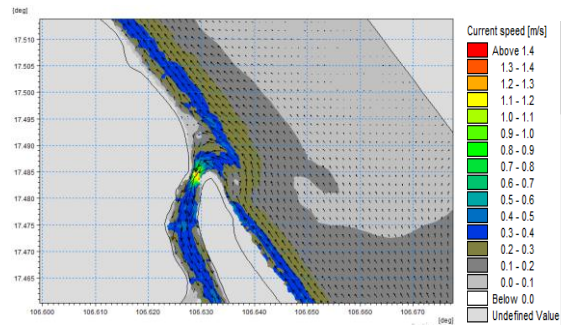
Hình 25. Trường dòng chảy cửa Nhật Lệ trong KB1.



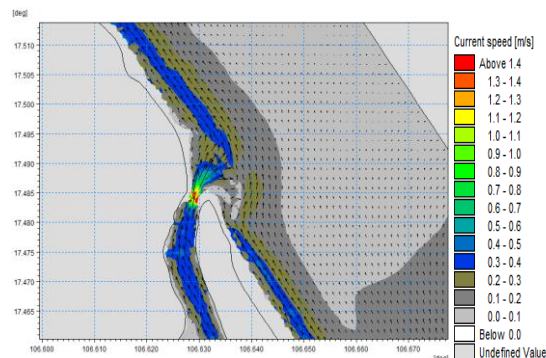
Hình 26. Trường sóng tại cửa Nhật Lệ trong KB1.

Hình 25 cho thấy dòng chảy dọc bờ ở bờ bắc của cửa Nhật Lệ không rõ ràng như ở bờ Nam, dòng có hướng Tây Bắc – Đông Nam với vận tốc dòng khoảng 0,1 – 0,3 m/s.

Sóng trong kịch bản này có biên độ vào là 2m, phía bên ngoài cửa, khoảng độ sâu -2 đến -3m, độ cao sóng chỉ còn khoảng 0,3 – 0,4m, đi đến sát điểm nút chai thì sóng không lan truyền được vào được nữa dù với hướng sóng Đông Bắc, sóng gần như đi vuông góc với bờ (hình 26).



a. Trường dòng chảy tại thời điểm triều lên



b. Trường dòng chảy tại thời điểm triều xuống

Hình 27. Trường dòng chảy cửa Nhật Lệ trong KB2.

Kịch bản 2 – KB2 (sóng Đông, mùa kiệt)

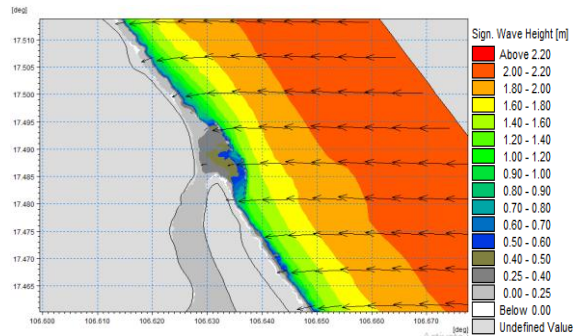
Với kịch bản sóng hướng Đông trong mùa kiệt, kết quả tính toán cho thấy xuất hiện dòng chảy dọc bờ trong cả pha triều lên cũng như trong pha triều xuống có hướng Đông Nam – Tây Bắc với vận tốc dòng đạt cỡ khoảng 0,2 – 0,4 m/s, trong đó vận tốc dòng chảy này ở phía bờ nam cửa Nhật Lệ lớn hơn phía bờ bắc và trong pha triều lên lớn hơn trong pha triều xuống.

Vận tốc dòng dọc bờ phía bờ nam có độ lớn khoảng 0,3 – 0,4 m/s, còn phía bờ bắc khoảng 0,2 – 0,3 m/s. Vận tốc dòng chảy vị trí hẹp nhất tại cửa khoảng 1,1 – 1,3 m/s trong pha triều lên, vào pha triều xuống có sự kết hợp với nước từ trong sông đi ra nên vận tốc dòng khoảng 1,2 đến trên 1,4 m/s.

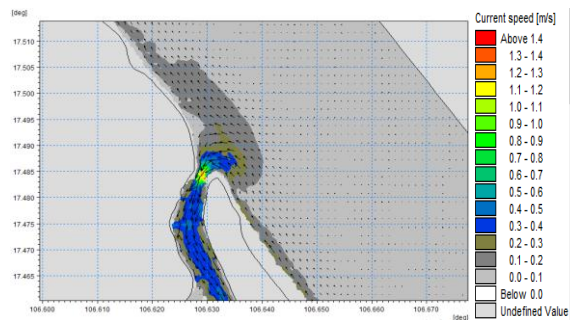
Sóng trong kịch bản 2 khi đến độ sâu khoảng -3m thì giảm mạnh, từ độ cao sóng khoảng 1 – 1,2m xuống còn khoảng 0,4m. Sóng lúc này không chịu ảnh hưởng mạnh bởi dòng chảy từ sông ra nên vẫn có thể lan truyền tiếp đến sát cửa Nhật Lệ (Hình 28).

Kịch bản 3 – KB3 (sóng Đông Nam, mùa kiệt)

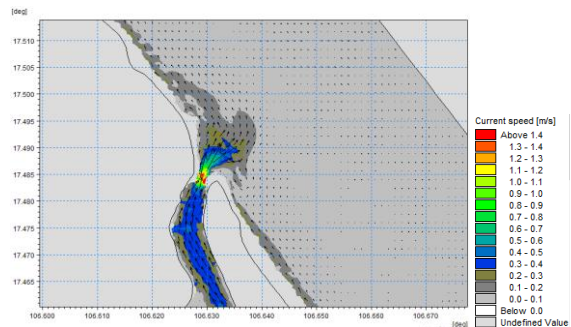
Trong kịch bản sóng hướng Đông trong mùa kiệt, kết quả mô phỏng cho thấy vẫn xuất hiện dòng chảy dọc bờ trong cả pha triều lên cũng như trong pha triều xuống có hướng Đông Nam – Tây Bắc nhưng vận tốc dòng khá nhỏ, vận tốc dòng đạt khoảng 0,1 – 0,2 m/s, vận tốc dòng dọc bờ ở bờ nam một vài thời điểm lên hơn 0,2 m/s vào pha triều lên. Và tương tự như KB2, dòng dọc bờ trong pha triều lên có vận tốc dòng trong pha triều lên lớn hơn trong pha triều xuống. Vận tốc dòng chảy vị trí hẹp nhất tại cửa khoảng 1,1 – 1,2 m/s trong pha triều lên, vào pha triều xuống có sự kết hợp với nước từ trong sông đi ra nên vận tốc dòng khoảng 1,2 - 1,4 m/s (Hình 29 a, b). Trong khi đó đối với sóng, trong kịch bản 3, khi đến độ sâu khoảng -3m thì độ cao sóng giảm từ khoảng 0,5 – 0,6m xuống còn khoảng 0,25 – 0,4m (Hình 30). Sóng trong trường hợp này cũng không đi sâu vào trong cửa những vẫn có thể lan truyền tới gần sát khu vực cửa Nhật Lệ.



Hình 28. Trường sóng tại cửa Nhật Lệ trong KB2

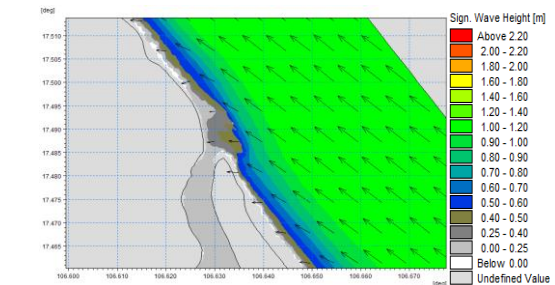


a. Trường dòng chảy tại thời điểm triều lên



b. Trường dòng chảy tại thời điểm triều xuống

Hình 29. Trường dòng chảy cửa Nhật Lệ trong KB3.

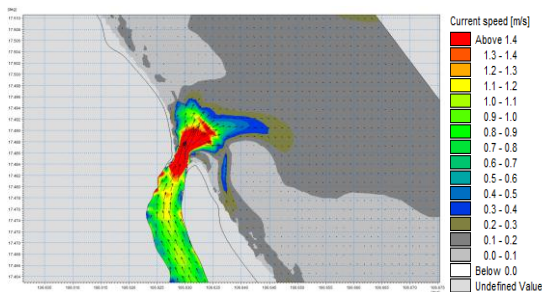


Hình 30. Trường sóng tại cửa Nhật Lệ trong KB3.

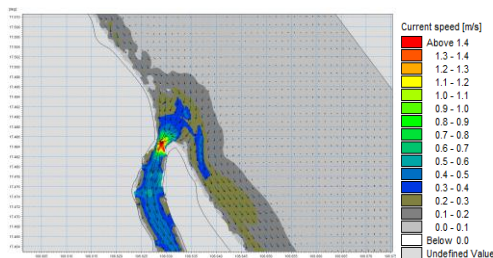
Kịch bản 4 – KB4 (sóng Đông Bắc, mùa lũ)

Kết quả mô phỏng của kịch bản sóng hướng Đông Bắc trong mùa lũ thể hiện trên Hình 31 cho thấy vẫn xuất hiện dòng chảy dọc bờ trong cả pha triều lên cũng như trong pha triều xuống có hướng Tây Bắc – Đông Nam, ngược chiều lại so với trường hợp sóng hướng Đông và Đông Nam nhưng vận tốc dòng khá nhỏ, vận tốc dòng dọc bờ ở bờ bắc khoảng 0,1 – 0,2 m/s, còn ở bờ nam khoảng 0,2 – 0,3 m/s. Tuy nhiên khi có lũ, dòng dọc bờ này yếu đi hẳn. Dòng chảy trong sông thời điểm lũ lên đến 0,9 – hơn 1,1 m/s. Và đến khu vực cửa sông hẹp nhất, vận tốc dòng chảy lên tới hơn 4 m/s. Dòng lũ tiếp tục đẩy mạnh ra ngoài tới độ sâu -4m thì yếu dần do tác động của sóng. Do đặc điểm hình thái cửa Nhật Lệ hẹp, dẫn đến khả năng thoát lũ tương đối khó khăn. Dòng dọc bờ hai bên bị ảnh hưởng một phần bởi dòng lũ này.

Tại thời điểm lũ, dòng dọc bờ ở bờ bắc khá nhỏ, vận tốc dòng nhỏ hơn 0,1 m/s, còn phía nam dòng dọc bờ khoảng 0,1 – 0,3 m/s. Do tác động của dòng lũ, sóng trong kịch bản này khi đến độ sâu khoảng -3m thì gần như đã lặng sóng, độ cao sóng nhỏ hơn 0,25m dù sóng lan truyền từ ngoài khơi vào là 2m.

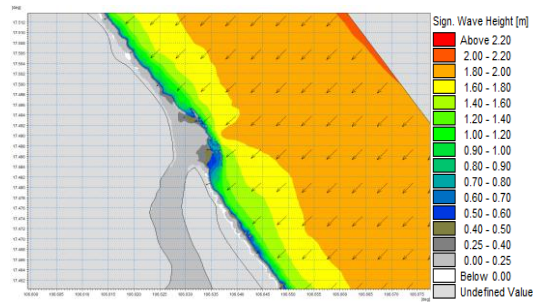


a. Trường dòng chảy tại thời điểm lũ

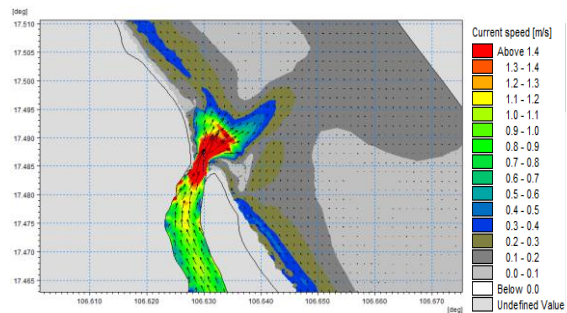


b. Trường dòng chảy tại thời điểm triều lên

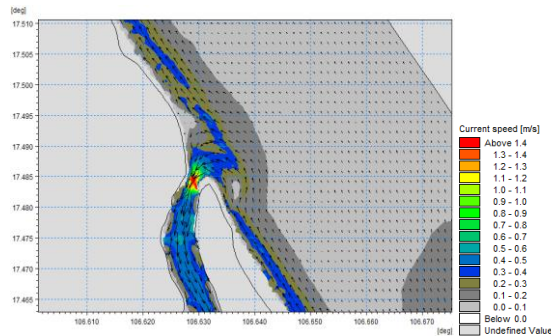
Hình 31. Trường dòng chảy cửa Nhật Lệ trong KB4.



Hình 32. Trường sóng tại cửa Nhật Lệ trong KB4.



a. Trường dòng chảy tại thời điểm lũ



b. Trường dòng chảy tại thời điểm triều lên

Hình 33. Trường dòng chảy cửa Nhật Lệ trong KB5

Kịch bản 5 - KB5 (sóng Đông, mùa lũ)

Hình 33 thể hiện kết quả mô phỏng với sóng hướng Đông trong mùa lũ cho thấy vẫn xuất hiện dòng chảy dọc bờ trong cả pha triều lên cũng như trong pha triều xuống có hướng Đông Bắc – Tây Nam, như trong mùa kiệt và ngược chiều so với hướng sóng Đông Bắc.

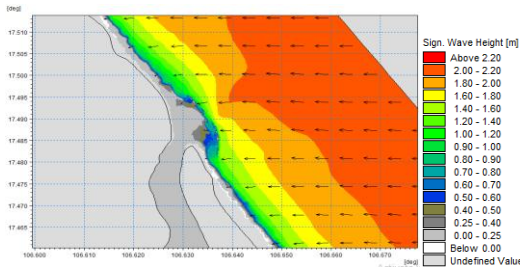
Dòng dọc bờ trong kịch bản này có vận tốc dòng lớn hơn so với KB4 và vẫn xuất hiện với cường độ lớn cả tại thời điểm lũ. Vận tốc dòng dọc bờ ở cả bờ bắc và bờ nam đều đạt khoảng 0,2 – 0,4 m/s, ở bờ nam dòng dọc bờ đôi khi đạt

khoảng 0,4 – 0,5 m/s vào thời điểm triều lên và không có lũ trong sông. Dòng chảy lũ trong kịch bản này tương tự như trong KB4, đến khu vực cửa sông hẹp nhất, vận tốc dòng chảy lên tới hơn 4 m/s. Dòng lũ tiếp tục đẩy mạnh ra ngoài tới độ sâu -4m thì yếu dần do tác động của sóng.

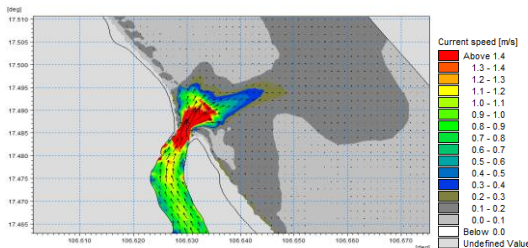
Sóng trong kịch bản này do tác động của dòng lũ và với độ lớn tương đương nên tương tự KB4, khi đến độ sâu khoảng -3m thì gần như đã lặn sóng, độ cao sóng nhỏ hơn 0,25m (Hình 34).

Kịch bản 6 - KB6 (sóng Đông Nam, mùa lũ)

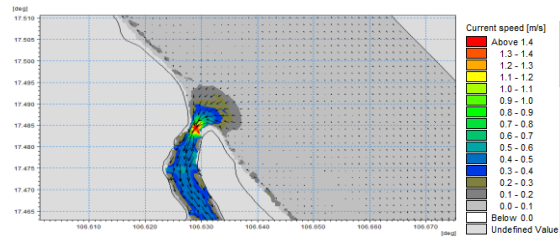
Kết quả mô phỏng với sóng hướng Đông Nam trong mùa lũ cho thấy dòng chảy dọc bờ trong cả pha triều lên cũng như trong pha triều xuống khá nhỏ, không rõ ràng như trong mùa kiệt. Dòng dọc bờ có hướng Đông Nam – Tây Bắc. Tại thời điểm lũ, vẫn xuất hiện dòng dọc bờ ở hai bên bờ của cửa Nhật Lệ với vận tốc khoảng 0,1 – 0,2 m/s, không có sự chênh lệch rõ rệt giữa hai bên bờ. Thời điểm không có lũ, dòng dọc bờ này tương đối yếu, vận tốc dòng nhỏ hơn 0,1 m/s, một vài thời điểm lên trên 0,1 m/s. Dòng chảy lũ trong kịch bản này tương tự như trong các kịch bản mùa lũ, vận tốc dòng chảy lớn nhất ở khu vực hẹp nhất của Nhật Lệ. Dòng lũ tiếp tục đi thẳng ra ngoài tới độ sâu -4m thì yếu dần do tác động của sóng.



Hình 34. Trường sóng tại cửa Nhật Lệ trong KB5.



a. Trường dòng chảy tại thời điểm lũ.



b. Trường dòng chảy tại cửa Nhật Lệ trong KB6 tại thời điểm triều lên

Hình 35. Trường dòng chảy cửa Nhật Lệ trong KB6.

Do tác động của dòng lũ, sóng trong kịch bản này tương tự KB4 và KB5, khi đến độ sâu khoảng -3m thì gần như đã lặn sóng, độ cao sóng nhỏ hơn 0,25m (Hình 36). Trong thực tế, kịch bản ít xảy ra do lũ thường xuất hiện vào mùa gió Đông Bắc. Tuy nhiên vẫn có thể xảy ra khi khu vực chịu ảnh hưởng của bão vào mùa gió Tây Nam, khi xuất hiện lũ sau bão như xảy ra trong KB7.

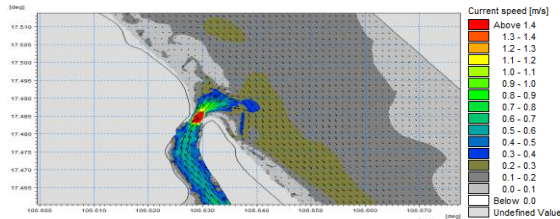
Kịch bản 7 - KB7 (trường hợp bão đổ bộ)

Bão là một kiểu thời tiết cực đoan tác động mạnh tới trường thủy động lực khu vực mà bão đi qua. Thời điểm bão đổ bộ, trường dòng chảy không có biến đổi mạnh (Hình 37a). Dòng dọc bờ tại thời điểm này gần như không xuất hiện ở bờ bắc, trong khi ở bờ nam, dòng chảy này cũng không xuất hiện rõ rệt.

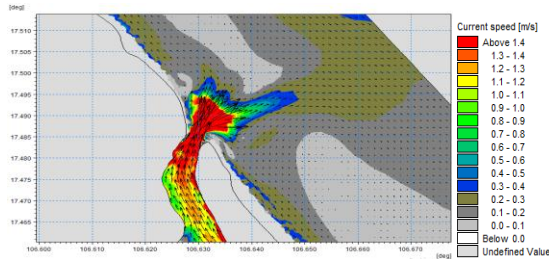
Dòng chảy trong sông thời điểm bão đổ bộ chảy không mạnh nhưng vẫn lớn khi so với dòng chảy trong mùa kiệt, vận tốc dòng khoảng 0,4 – 0,7 m/s. Thời điểm sau bão đổ bộ, với lượng mưa lớn trong thời gian ngắn, trên sông xuất hiện lũ với dòng chảy mạnh với vận tốc khoảng 1,1 – 1,3 m/s, khu vực gần cửa, đặc biệt tại điểm hẹp nhất tại cửa, vận tốc dòng lên tới 6 m/s (Hình 37b). Cũng vào thời điểm này, dòng dọc bờ xuất hiện ở cả bờ nam và bờ bắc có hướng Đông Nam - Tây Bắc với vận tốc dòng khoảng 0,2 – 0,4 m/s.

Trường sóng thời điểm bão đổ bộ rất mạnh, độ cao sóng ngoài khơi lên đến hơn 5m (Hình 38). Tuy nhiên khi đến sát bờ và cửa sông, độ cao sóng giảm còn khoảng 2 - 4m khi đến sát bờ. So sánh với sóng thực đo tại trạm Cồn Cỏ, kết quả tính toán có sự tương đồng về độ cao sóng trong thời điểm bão đổ bộ (độ cao sóng tại trạm Cồn Cỏ (sóng nước sâu) biến động từ 3 – 6m so

với kết quả tính toán biến động từ 4 đến hơn 6m tại khu vực nước sâu trong miền tính). Dù vậy, với chu kỳ sóng nhỏ trong bão, những con sóng đến liên tục và có thể gây xói bờ biển và các công trình ven bờ.

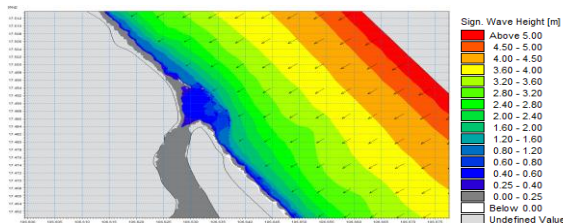


a. Trường dòng chảy tại thời điểm bão đổ bộ



b. Trường dòng chảy tại cửa Nhật Lệ trong KB7 tại thời điểm xuất hiện lũ sau bão

Hình 36. Trường dòng chảy cửa Nhật Lệ trong KB7.



Hình 37. Trường sóng tại cửa Nhật Lệ trong KB7 tại thời điểm bão đổ bộ.

4. Kết luận

Dòng chảy với điều kiện thủy động lực bình thường, trong mùa gió Tây Nam, trường dòng chảy có vận tốc nhỏ, dòng dọc bờ có hướng Đông Nam – Tây Bắc với vận tốc khoảng 0,2 – 0,4 m/s cùng với độ cao sóng trong mùa này tại vị trí gần cửa khoảng 0,25m. Trong mùa gió Đông Bắc, dòng chảy dọc bờ hướng Đông Nam – Tây Bắc, một số thời điểm khác hướng ngược

lại, vận tốc dòng chảy khoảng 0,2 – 0,4 m/s. Phía trong sông, vận tốc dòng chảy không có lũ khoảng 0,3 – 0,6 m/s. Các kịch bản hướng sóng khác nhau trong hai mùa lũ và kiệt đã đưa ra một số đặc điểm của trường dòng chảy tại khu vực. Dòng dọc bờ tại hai bên bờ thường có sự chênh lệch về độ lớn vận tốc dòng chảy và dòng chảy trong pha triều lên thường lớn hơn trong pha triều xuống. Với ba hướng sóng chính là Đông Bắc, Đông và Đông Nam, dòng chảy dọc bờ chủ yếu có hướng Đông Nam – Tây Bắc (riêng với sóng Đông Bắc, hướng dòng chảy là Tây Bắc – Đông Nam) với vận tốc dòng chảy dao động chủ yếu trong khoảng 0,1 – 0,4 m/s. Với hướng dòng chảy Đông Nam – Tây Bắc, dòng dọc bờ này có thể giải thích lí do mũi nhô phía Nam tại cửa Nhật Lệ có xu hướng tiến lên phía Bắc do quá trình vận chuyển trầm tích dọc bờ từ Nam lên Bắc diễn ra liên tục, điều này góp phần gây khó thoát lũ và giao thông khó khăn tại cửa Nhật Lệ. Dòng chảy sông trong mùa kiệt vận tốc dòng chảy chủ yếu dao động từ 0,3 – 0,4 m/s, trong mùa lũ lên tới 0,9 - 1,1 m/s. Đặc biệt, với đặc điểm hình thái cửa sông bó hẹp tại cửa đặc thù, gây khó khăn cho việc thoát lũ, vận tốc dòng tại vị trí này vào mùa kiệt khoảng 1,1 – 1,3 m/s, vào mùa lũ lên tới 4 m/s và có thể lên tới 6 m/s trong trường hợp lũ lớn (KB7).

Sóng trong điều kiện thường mùa gió Tây Nam khá nhỏ, chỉ khoảng 0,25 – 0,6m, còn trong mùa gió Đông Bắc, độ cao sóng khoảng hơn 2m ở phía bên ngoài cửa, tới độ sâu khoảng -3 đến -4m, sóng bắt đầu đổ và đến cửa Nhật Lệ độ cao sóng khoảng 0,4 – 0,5m. Các kịch bản hướng sóng khác nhau trong hai mùa lũ và kiệt đã đưa ra một số đặc điểm của trường thủy động lực khu vực. Trường sóng với ba hướng Đông Bắc, Đông và Đông Nam với chu kỳ và độ cao khác nhau, tuy nhiên nhìn chung, độ cao sóng khi đến khoảng độ sâu -3m tại khu vực cửa sông sẽ giảm mạnh. Đặc biệt, vào mùa lũ, dòng nước mạnh chảy từ sông ra khiến sóng gần như lặng sau khi đi qua độ sâu này. Trong kịch bản bão, trường sóng rất lớn, khi đến gần bờ dù suy giảm sóng khá nhiều so với sóng ngoài khơi, nhưng sóng vẫn còn mạnh kết hợp với chu kỳ sóng ngắn có thể gây xói mạnh cho hai bên bờ và khu vực cửa

Nhật Lệ. Dù vậy, vai trò rất lớn của sóng là tạo nên những dòng chảy dọc bờ - nhân tố tác động rất lớn tới quá trình vận chuyển trầm tích tại khu vực, mà vấn đề lớn nhất hiện nay tại khu vực là vấn đề bồi lấp tại cửa Nhật Lệ.

Nghiên cứu đã đưa ra những đặc điểm của trường thủy động lực khu vực cửa Nhật Lệ trong các điều kiện khác nhau thông qua mô phỏng các kịch bản có thể xảy ra tại khu vực cửa Nhật Lệ. Những đặc điểm về trường dòng chảy cũng sóng tại khu vực cửa Nhật Lệ được đưa ra, góp phần tạo nên bức tranh thủy động lực tại khu vực biên tỉnh Quảng Bình. Đây có thể là những thông tin có thể giúp những nhà quản lý hoạch định những chính sách phù hợp với địa phương mình. Tuy nhiên, nghiên cứu này mới chỉ đề cập đến vấn đề thủy động lực, trong khi hệ quả tác động của trường thủy động lực này như vận chuyển trầm tích, bồi xói hai bên bờ khu vực cửa Nhật Lệ,... chưa được tính đến. Đây là những vấn đề phức tạp và gây bức xúc, cần tiếp tục có những nghiên cứu sâu hơn để có thể đưa ra những quy hoạch chỉnh trị, tạo điều kiện phát triển kinh tế cho khu vực.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện tại Trung tâm Động lực học Thủy khí Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQGHN với sự tài trợ về kinh phí và các số liệu khảo sát. Nhóm thực hiện xin trân trọng cảm ơn sự hỗ trợ quý báu này.

Tài liệu tham khảo

- [1] H.T. Binh, T.N. Anh, D.D. Kha, Simulation of flood inundation using MIKE FLOOD model in Nhat Le river system – Quang Binh province VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology 26(3S) (2010) 285 – 294 (in Vietnamese).
- [2] N.X. Hau, P.V. Tan, Assessment of climate impact on flood in the Nhatle river basin, Vietnam VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology 31(3S) (2015) 125 – 138 (in Vietnamese). https://www.researchgate.net/publication/282605261_Danh_gia_tac_dong_cua_bien_doi_khi_hau_d_en_ngap_lut_luu_vuc_song_Nhat_Le_Viet_Nam_Assessment_of_climate_change_impact_on_flood_in_the_Nhatle_river_basin_Vietnam
- [3] T.V. Bon, V.V. Ngoc, P.T. Han, V.P. Quynh, Results of research on human risk due to flooding in Kien Giang and Long Dai river basins, Quang Binh province, Journal of Irrigation Science and Technology 28 (2015) 1 – 8 (in Vietnamese). http://www.vawr.org.vn/images/file/PGS_TS_%20Truong%20Van%20Bon.pdf
- [4] C.D. Minh, M.N. Quang, S.N. Thai, C.N. Van, Research on nearshore wave conditions at Nhat Le coastal area (Quang Binh province) by using MIKE21-SW, Journal of Marine Science and Technology 18(3) (2018) 241 - 249. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/18/3/13240>
- [5] L. Rijkenberg, A first calibration of the one-dimensional model of the Nhat Le River basin, Student thesis, Civil Engineering and Geosciences, TU Delft, Delft, Netherland, 2013. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:bb744c36-ffda-468a-837b-245ef650774c>
- [6] M. Fossati, P.Cueva, A 3D hydrodynamic numerical model of Rio de la Plata and Montevideo's coastal zone, Applied Mathematical Modelling, 37(3) (2013) 1310 – 1332. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.04.010>
- [7] P. Matte, Y. Secretan, J. Morin, Hydrodynamic Modelling of the St.Lawrence Fluvial Estuary. I: Model Setup, Calibration, and Validation, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 143(5) (2017) 1 - 15. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000397](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000397).
- [8] J. Ganasut, S. Weesakul, Suphat Vongvisessomjal, Hydrodynamic Modelling of Songkhla Lagoon, Thailand, Thammasat International Journal of Science and Technology 10(1) (2005) 32 - 46. <http://www.thaiscience.info/Journals/Article/TSTJ/10480767.pdf>.
- [9] M. Garcia, I. Ramirez, M.Verlaan, J.Castillo, Application of a three-dimensional hydrodynamic model for San Quintin Bay, B.C., Mexico. Validation and calibration using OpenDA, Journal of Computational and Applied Mathematics, 273 (2015) 428-437. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2014.05.003>.
- [10] Q. Liu, A. Babanin, C. Guan, S. Zieger, J. Sun, Y. Jia, Calibration and Validation of HY-2 Altimeter Wave Height, Journal of Atmosphere and Oceanic Technology 33(5) (2016) 919 - 936. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0219.1>
- [11] Q. Liu, E. Rogers, A. Babanin, I. Young, L. Romero, S. Zieger, F. Qiao, C. Guan, Observation-Based Source Terms in the Third-Generation Wave Model WAVEWATCH III: Updates and Verification, Journal of Physical Oceanography, 49(2) (2019) 489 - 517. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-18-0137.1>