BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ MT

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

VŨ ĐÌNH CƯƠNG

NGHIÊN CỨU XU THẾ DIỄN BIẾN HÌNH THÁI CỬA SÔNG NHẬT LỆ

Ngành: Kỹ thuật xây dựng công trình thủy
Mã số: 9 58 02 02

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - Năm 2025

Công trình được hoàn thành tại: **Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam**

Cán bộ hướng dẫn khoa học: PGS.TS Nguyễn Thanh Hùng
GS.TS Trần Đình Hòa

Phản biện 1: …….
Phản biện 2: …….
Phản biện 3: …….

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Viện họp tại: Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, số 171 phố Tây Sơn, phường Kim Liên, Tp. Hà Nội.
vào hồi … giờ ngày … tháng … năm 2025

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam.
- Thư viện Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài luận án

Việt Nam có bờ biển dài 3.254 km với hơn 114 cửa sông, trung bình 20 km có một cửa. Vùng cửa sông ven biển (CSVB) tập trung đông dân cư, là nơi phát triển cảng biển, đô thị, du lịch, nuôi trồng thủy sản và tránh trú bão, đóng vai trò quan trọng trong kinh tế - xã hội và an ninh quốc phòng. Tuy nhiên, khu vực này thường xuyên chịu thiên tai như lũ lụt, xói lở, bồi lắng, xâm nhập mặn và suy thoái môi trường, đặc biệt là bồi lấp cửa sông, cản trở thoát lũ và giao thông thủy, gây thiệt hại lớn.

Miền Trung có địa hình hẹp, sông ngắn, dốc, khí hậu khắc nghiệt, thường xuyên bão lũ và hạn hán. Phù sa từ thượng nguồn tích tụ tại cửa sông, kết hợp sóng gió mùa Đông Bắc mạnh gây bồi lấp nghiêm trọng. Trên dải bờ biển Thanh Hóa – Bình Thuận (1.800 km) có 52 cửa sông, trong đó 45 cửa thuộc loại cửa sông phẳng có doi cát chắn như mũi tên cát hoặc lưỡi cát càng cua. Đây là dạng phổ biến, đặc trưng bởi sóng chiếm ưu thế, thủy triều nhỏ, dòng chảy sông mạnh chủ yếu vào mùa lũ. Khi doi cát phát triển dài, cửa sông bị thu hẹp, bồi lấp, thậm chí đóng kín.

Nghiên cứu loại cửa sông này ứng dụng nhiều phương pháp như khảo sát, phân tích số liệu thủy - hải văn, GIS, ảnh viễn thám và mô hình toán. Trong đó, mô hình toán hiện đại cho kết quả chi tiết nhưng mô phỏng dài hạn diễn biến hình thái (DBHT) còn nhiều thách thức.

Từ yêu cầu thực tiễn, luận án nghiên cứu xu thế DBHT cửa sông phẳng có doi cát chắn ở miền Trung, điển hình là cửa Nhật Lệ (Quảng Bình), xác định các yếu tố động lực chi phối biến đổi, xây dựng mô hình mô phỏng dài hạn và đề xuất giải pháp ổn định hình thái, phục vụ phát triển bền vững và bảo vệ cộng đồng ven biển.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Nghiên cứu làm sáng tỏ được sự tác động, mức độ chi phối của từng yếu tố động lực đến quá trình DBHT cửa sông ven biển (CSVB).

- Nghiên cứu xây dựng mô hình toán mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông, kết hợp thống kê và mô hình hiện đại, khắc phục hạn chế thời gian tính toán kéo dài.

- Định hướng giải pháp công trình chỉnh trị CSVB trên cơ sở ứng dụng MH mô phỏng dài hạn DBHT để đánh giá, phân tích hiệu quả của giải pháp.

3. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

• *Cách tiếp cận nghiên cứu*: Nghiên cứu DBHT cửa sông được thực

hiện theo hướng tiếp cận từ nguyên nhân đến kết quả, từ lý thuyết đến thực tiễn, kế thừa và phát triển các nghiên cứu trước về DBHT và giải pháp ổn định CSVB. Luận án kết hợp phân tích số liệu thực đo, ảnh viễn thám, bình đồ khảo sát địa hình với mô hình toán Delft3D để mô phỏng thủy động lực, VCBC và DBHT cửa Nhật Lệ. Kết quả mô phỏng được đối chiếu với quan trắc để đánh giá độ tin cậy, phân tích tác động của các yếu tố động lực và đề xuất giải pháp ổn định cửa sông dựa trên mô hình mô phỏng dài hạn DBHT.

• *Phương pháp nghiên cứu*: (1) P.P điều tra, khảo sát và đo đạc hiện trường; (2) P.P phân tích thống kê; (3) P.P phân tích ảnh viễn thám và hệ thông tin địa lý (GIS); (4) P.P mô hình toán; (5) P.P phân tích tổng hợp.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

• *Ý nghĩa khoa học*: Luận án tìm được phương pháp phân tích dữ liệu và gia tăng tốc độ tính toán cho mô hình mô phỏng, góp phần nâng cao khả năng mô phỏng vận chuyển bùn cát, DBHT trong thời kỳ dài hạn để dự đoán xu thế diễn biến cửa sông; Xác định được tỷ trọng đóng góp của các yếu tố động lực quyết định đến DBHT, giúp công tác chỉnh trị cửa sông ven biển được hợp lý nhằm phục vụ đa mục tiêu phát triển KTXH.

• *Ý nghĩa thực tiễn*: Nghiên cứu dài hạn DBHT cửa sông ven biển giúp nhận diện xu thế xói lở, bồi tụ, cung cấp dữ liệu và hiểu biết sâu sắc hơn phục vụ quy hoạch, bảo vệ hạ tầng ven bờ. Luận án nghiên cứu hướng tiếp cận xây dựng mô hình mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông Nhật Lệ, có thể áp dụng cho các cửa sông miền Trung có điều kiện tương tự. Kết quả góp phần hỗ trợ quản lý, phát triển bền vững và bảo vệ cộng đồng ven biển.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN HÌNH THÁI VÀ GIẢI PHÁP ỔN ĐỊNH CỬA SÔNG VEN BIỂN

1.1 Giới thiệu chung về cửa sông ven biển

1.1.1 Khái niệm và phân loại cửa sông ven biển

• *Khái niệm về cửa sông ven biển*:

- Cửa sông ven biển (cửa sông) là vùng địa lý tự nhiên phức tạp, nơi dòng chảy sông hòa vào biển và chịu tác động đồng thời của nhiều yếu tố tự nhiên - nhân sinh. Tại đây, các quá trình động lực diễn ra đa chiều, đa pha với sự tương tác liên tục giữa sông, biển và kiến tạo. Vì vậy, các vấn đề thủy lực học ở cửa sông luôn biến động mạnh, vừa có tính chu kỳ vừa bất ổn định.

- Cửa sông có doi cát chắn là khái niệm dùng để chỉ một cửa sông có dải cát nhô cao hình thành nhờ quá trình tích tụ trầm tích của các dòng chảy

dọc bờ, sóng biển… và chắn ngang một phần hoặc toàn bộ cửa sông.

• *Phân loại cửa sông*:

- Trên thế giới: Cửa sông trên thế giới được phân loại theo nhiều tiêu chí: thủy triều (mạnh, trung bình, yếu), hình thái (delta, estuary), hàm lượng trầm tích và mức độ xáo trộn mặn - ngọt. Một số nghiên cứu còn dựa trên tỷ lệ động lực sông, sóng, triều hoặc sự tương tác giữa chúng. Nhìn chung, việc phân loại cần kết hợp nhiều yếu tố để phục vụ nghiên cứu và quản lý bền vững cửa sông ven biển.

- Ở Việt Nam: Phân loại cửa sông ở Việt Nam chủ yếu dựa vào hình thái mặt bằng cửa sông và yếu tố trội của động lực sông hay biển. Trên dải ven biển Miền Trung loại hình cửa sông phẳng có doi cát chắn (chiếm tỷ lệ lớn nhất 45/52 cửa). Loại hình cửa sông này cũng có sự biến động lớn và phức tạp nhất cần được quan tâm nghiên cứu.

1.1.2 Đặc điểm cửa sông phẳng có doi cát chắn

• *Đặc điểm thủy động lực*: Cửa sông phẳng có doi cát chắn là nơi hội tụ và tranh chấp phức tạp giữa động lực biển và động lực sông. Sự thay đổi cường độ và tương quan giữa các yếu tố theo mùa, năm và dưới tác động của con người đã tạo nên tính biến động cao, khó dự báo và rất nhạy cảm.

• *Đặc điểm hình thái*: Hình thái của cửa sông phẳng có doi cát chắn thường không ổn định, có tính chu kỳ và dễ bị chi phối bởi các quá trình xói - bồi tự nhiên. Quá trình hình thành và dịch chuyển cửa thường diễn ra theo các giai đoạn: hình thành doi - chắn cửa - tạo cửa mới - cửa cũ bị bịt kín - tái cấu trúc hình thái.

1.2 Tổng quan nghiên cứu về cửa sông ven biển

1.2.1 Nghiên cứu về thuỷ động lực và DBHT cửa sông

• *Trên thế giới*: Các nghiên cứu chỉ ra rằng, các doi cát hình thành tại cửa sông phẳng chủ yếu do quá trình VCBC dọc bờ trong chế độ thủy động lực của yếu tố sóng chi phối, với vai trò của dòng chảy ven bờ và nguồn bùn cát từ thượng lưu là yếu tố quyết định đến quy mô và hướng phát triển của doi cát. Những tương tác này không chỉ định hình cho hình thái ban đầu, mà còn điều khiển quá trình biến đổi của doi cát theo thời gian.

• *Ở Việt Nam*: Các nghiên cứu hầu hết tập trung cho loại hình cửa sông phẳng có doi cát chắn ở ven biển Miền Trung. Trong đó đã phân tích cơ chế động lực và quy luật hình thái, đóng góp quan trọng vào việc hiểu rõ quá trình phát triển và biến đổi tự nhiên của cửa sông.

1.2.2 Nghiên cứu về các giải pháp công trình chỉnh trị cửa sông

• *Trên thế giới*: Một số nước phát triển đã nghiên cứu chỉnh trị cửa sông trên mô hình vật lý từ giữa thế kỷ XIX, đến đầu thế kỷ XX. Các quốc gia

có nền khoa học kỹ thuật biển tiên tiến (Mỹ, Anh, Pháp, Nga, Trung Quốc, Hà Lan, Nhật Bản) đã nghiên cứu ứng dụng các mô hình mô phỏng vận chuyển bùn cát, công nghệ viễn thám và GIS để dự báo diễn biến luồng lạch và phục vụ hiệu quả cho công tác chỉnh trị cửa sông lâu dài.

• *Ở Việt Nam*: Các nghiên cứu trong nước đã thu được nhiều kết quả có giá trị về mặt khoa học và thực tiễn, góp phần không nhỏ vào việc xây dựng cơ sở khoa học và công cụ hỗ trợ cho việc đề xuất các phương án chỉnh trị chống bồi lấp, xói lở cửa sông và bờ biển. Loại hình cửa sông này thường xuyên chịu ảnh hưởng của sóng, dòng chảy ven bờ và lũ sông nên các công trình chỉnh trị phổ biến là dạng đê NCGS và hướng dòng, nhằm mục đích ổn định tuyến luồng, duy trì giao thông thủy và bảo vệ bờ.

1.3 Nghiên cứu mô phỏng trên mô hình toán

• *Mô phỏng thủy động lực và VCBC*: Trên thế giới đã được thực hiện từ cuối thế kỷ XIX, phát triển mạnh từ những năm 1930 - 1960 ở các nước châu Âu và Mỹ; ở Việt Nam cũng được phát triển từ những năm 1960 và phát triển mạnh từ những năm 2000. Gần đây, lĩnh vực nghiên cứu này ngày càng được hoàn thiện về phương pháp, cách tiếp cận tổng hợp, độ chính xác tính toán được nâng cao và trở thành công cụ rất hữu hiệu.

• *Mô phỏng ngắn hạn DBHT cửa sông*: Hiện nay trên thế giới và ở Việt Nam đã ứng dụng rộng rãi và khá thành công các mô hình số trị thuỷ động (MIKE, DELFT 3D, Hydro-GIS, MECCA, TELEMAC…) để mô phỏng chi tiết, có độ tin cậy cao về DBHT cửa sông trong thời kỳ ngắn hạn, giúp cung cấp thông tin quan trọng nhằm củng cố luận cứ khoa học trong nghiên cứu đề xuất được giải pháp chỉnh trị phù hợp, hiệu quả.

• *Mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông*: Hiện nay còn gặp thách thức lớn do thời gian tính toán mô phỏng quá dài; lĩnh vực này chưa có nhiều nghiên cứu ở Việt Nam. Một số nghiên cứu khắc phục theo hướng đơn giản hóa mô hình xuống 1D, hoặc lược bớt thành phần phương trình, hoặc tăng tốc phần cứng máy tính nhưng sẽ làm giảm độ chính xác mô phỏng. Một số theo hướng kết hợp MHT hiện đại (có hệ số tăng tốc hình thái) với phân tích thống kê tổ hợp điều kiện biên, đã chứng tỏ được tiềm năng cải thiện về mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông.

1.4 Nhận xét những kết quả đã đạt được, tồn tại và định hướng nghiên cứu của luận án

• *Những kết quả đã đạt được và một số tồn tại*:

- Những kết quả đã đạt được: Nghiên cứu hình thái CSVB ngày càng được hoàn thiện, với phương pháp tiếp cận tổng hợp và độ chính xác ngày càng cao hơn. Các kết quả nghiên cứu mô phỏng ngắn hạn đã giúp nhận

diện quy luật biến động, nguyên nhân xói lở - bồi tụ và đề xuất giải pháp chỉnh trị hiệu quả. Một số tác giả đã nghiên cứu diễn biến cửa sông trong thời gian dài hạn theo hướng tiếp cận kết hợp giữa các phương pháp và đã đạt được những kết quả đáng khích lệ.

- Mộ số tồn tại: Mô hình mô phỏng dài hạn DBHT còn gặp thách thức lớn do yêu cầu thời gian tính toán rất dài khi sử dụng các mô hình chi tiết 2D hoặc 3D. Các nghiên cứu thủy động lực, DBHT dài hạn cửa sông chủ yếu tập trung vào đánh giá tác động của 2 yếu tố thủy triều và sóng; chưa đưa vào đánh giá tác động của các yếu tố lưu lượng sông và nước dâng có tác động lớn đối với các cửa sông ven biển Miền Trung.

• *Định hướng các vấn đề nghiên cứu của luận án*:

- NC đánh giá làm sáng tỏ được tác động và mức độ chi phối của từng yếu tố động lực đến DBHT cửa sông: Bằng phương pháp mô phỏng MHT, luận án tính toán với các điều kiện biên khác nhau để tách riêng các yếu tố động lực, từ kết quả biến động bồi-xói để đánh giá mức độ đóng góp theo tỷ lệ tương đối của từng yếu tố động lực đến DBHT cửa sông Nhật Lệ.

- Nghiên cứu hướng tiếp cận xây dựng MH mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông: Với sự kết hợp của phần mềm MHT (hệ số tăng tốc hình thái - Mf) và phương pháp phân tích (thống kê, điều hoà) tổ hợp các điều kiện biên cho MHT để rút ngắn thời gian mô phỏng.

- Nghiên cứu định hướng giải pháp công trình ổn định tổng thể cho khu vực cửa sông Nhật Lệ: Nghiên cứu bố trí không gian của công trình ổn định cửa sông (tập trung vào đánh giá tác động của tham số về chiều dài của công trình đê NCGS đến khả năng thoát lũ của cửa sông) và giải pháp công trình tổng thể được tính toán đánh giá tác động, hiệu quả bằng MH mô phỏng dài hạn DBHT.

1.5 Giới thiệu cửa sông Nhật Lệ

Cửa sông Nhật Lệ thuộc địa phận phường Đồng Hới, tỉnh Quảng Trị. Cửa sông đổ ra Biển Đông theo hướng Đông Bắc, còn đường bờ biển có hướng Tây Bắc - Đông Nam nên bờ biển khu vực này thường xuyên bị xói lở nặng nề do sóng lớn trong mùa gió Đông Bắc có hướng gần vuông góc; trong khi cửa sông lại bị bồi lấp và biến động luồng lạch rất phức tạp.

1.6 Kết luận Chương 1

Chương 1 tổng quan các nghiên cứu cho thấy: Trên thế giới, mô hình toán thủy động lực và hình thái cửa sông được phát triển sớm; nghiên cứu dài hạn DBHT còn hạn chế, chủ yếu mới xét đến thủy triều và sóng. Ở Việt Nam, phần lớn là các nghiên cứu ngắn hạn DBHT hoặc dài hạn nhưng với giả định đơn giản, làm giảm độ chính xác. Hạn chế chung là thiếu dữ liệu

thực đo, giả định đơn giản và ít nghiên cứu dài hạn do hạn chế tính toán. Vì vậy, nghiên cứu hướng tiếp cận xây dựng MH mô phỏng dài hạn và đề xuất giải pháp ổn định cửa sông Nhật Lệ thể hiện đóng góp mới của luận án.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1 Điều kiện khí tượng, thuỷ - hải văn khu vực nghiên cứu

Lưu vực sông Nhật Lệ (Quảng Bình) thuộc vùng khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa, có hai mùa rõ rệt: mùa mưa (IX-III) và mùa khô (IV-VIII).

Dòng chảy sông Nhật Lệ: tập trung chủ yếu trong mùa lũ (IX-XII), chiếm 75-77% tổng lượng năm. Dòng chảy mùa kiệt rất nhỏ, trung bình 15-20 l/s.km^2. Lũ xảy ra nhanh, mạnh với các giai đoạn: lũ tiểu mãn (V-VI), lũ sớm (VII-VIII), lũ chính vụ (IX-XI) và lũ muộn (XII-I). Trạm Kiến Giang và Tám Lu đã ghi nhận các trận lũ lớn như năm 1979 tại Kiến Giang (2640 m^3/s, tần suất 0,2%) và năm 1971 tại Tám Lu (tần suất 3%).

Thủy triều: Khu vực chịu ảnh hưởng bán nhật triều không đều, độ lớn thủy triều dao động từ 0,5-0,6 m (triều kém) đến 1,2-1,6 m (triều cường).

Sóng: Chịu chi phối bởi gió mùa, có hai mùa sóng chính. Mùa Đông Bắc (X-III) sóng lớn, trung bình 0,8-1,2 m, cực đại 4,0-4,5 m; mùa Tây Nam (V-VIII) sóng nhỏ, trung bình 0,6-0,7 m. Trong bão, sóng có thể đạt 5-8 m. Sóng khu vực đặc thù bởi hai hướng chính BĐB và ĐĐB.

Nước dâng - hạ: Gồm nước dâng do bão cao 2,5-3 m, kéo dài 3-24 giờ. Mực nước dâng - hạ theo mùa dao động 30-40 cm, tồn tại nhiều ngày, kết hợp sóng lớn gây xói lở mạnh trong mùa gió Đông Bắc.

2.2 Cơ sở khoa học nghiên cứu DBHT dài hạn cửa sông ven biển

2.2.1 Biến động theo mùa của các yếu tố mực nước, sóng, lưu lượng cửa sông

Trong mùa gió Đông Bắc (IX-IV), cửa Nhật Lệ chịu tác động thủy động lực mạnh nhất với sóng lớn, chu kỳ dài, mực nước dâng cao. Từ IX-XII, lưu lượng sông lớn trùng với sóng mạnh, gây biến động hình thái mạnh. Từ I-IV, dù lưu lượng giảm nhưng sóng vẫn lớn, tiếp tục gây thay đổi đáng kể. Ngược lại, mùa gió Tây Nam (V-VIII) có thủy động lực yếu, sóng nhỏ, mực nước thấp, lưu lượng sông kiệt nên hình thái cửa sông ít biến động, quá trình bồi tụ và xói lở diễn ra chậm và ổn định hơn.

2.2.2 Cơ sở khoa học về phương trình toán học của mô hình Delft3D

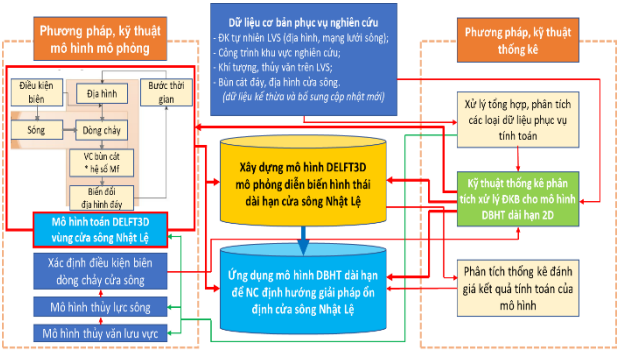
Luận án sử dụng mô hình Delft3D (Deltares, Hà Lan) mô phỏng 2 chiều (2DH) để nghiên cứu thủy động lực, VCBC và DBHT cửa sông Nhật Lệ. Delft3D gồm ba mô-đun chính: Flow (thủy động lực), Wave (sóng, dựa trên mô hình SWAN) và Sed (vận chuyển trầm tích). Các mô-đun kết hợp

trực tuyến, mô phỏng tương tác sóng - dòng chảy - trầm tích. Vận chuyển trầm tích được tính cho cả bùn cát lơ lửng và đáy, dựa trên phương pháp cân bằng truyền dẫn - khuếch tán và công thức Van Rijn (1993), giúp cập nhật biến đổi cao độ đáy. Trong Delft3D, hệ số gia tốc hình thái (MorFac hay M_f) được dùng để rút ngắn thời gian mô phỏng dài hạn. Với giả thiết biến đổi hình thái diễn ra chậm hơn nhiều so với thủy động lực, MorFac nhân tốc độ VCBC giúp mô phỏng nhanh hơn mà vẫn giữ nguyên bước thời gian thủy động lực. Ví dụ, MorFac = 10 cho phép mô phỏng biến đổi hình thái 140 ngày chỉ với 14 ngày tính toán, trong khi MorFac = 26 có thể mô phỏng 1 năm chỉ với 1 chu kỳ triều.

2.2.3 Hướng tiếp cận kết hợp giữa kỹ thuật thống kê và MH mô phỏng

Trong mô phỏng hình thái dài hạn, không thể sử dụng toàn bộ chuỗi dữ liệu quan trắc nhiều năm do khối lượng lớn và tính toán tốn kém tài nguyên. Do đó, cần rút gọn điều kiện biên (sóng, mực nước, lưu lượng, bùn cát) thành đại diện đặc trưng bằng phương pháp thống kê. Trong đó: Điều kiện biên sóng được phân tích từ chuỗi Hsig, Tp, MWD ngoài khơi, chia thành các lớp sóng và chọn sóng đại diện theo mùa, hướng và tần suất xuất hiện. Mực nước được tái tạo từ dữ liệu quan trắc và mô hình TPXO7.2, xác định các sóng triều chính và dao động mùa. Lưu lượng sông (tính bằng Mike Flood) và bùn cát sông (tính từ mô hình SWAT) được phân tích thống kê để chọn giá trị điển hình biến đổi theo mùa lũ, mùa kiệt.

Luận án ứng dụng mô hình 2DH kết hợp hệ số MorFac và phân tích thống kê điều kiện biên để mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông Nhật Lệ. MorFac là tham số nhân vào độ thay đổi đáy trong mỗi bước tính thủy động lực, giúp rút ngắn thời gian mô phỏng mà vẫn đảm bảo độ tin cậy (Lesser et al., 2004; Roelvink, 2006).



Hình 2.5: Sơ đồ kết hợp phương pháp, kỹ thuật thống kê và MH mô phỏng

Phương pháp này giả định biến đổi hình thái diễn ra chậm hơn thủy

động lực, cho phép giảm thời gian mô phỏng theo hệ số Mf. Trong mô hình, dòng chảy, VCBC và cập nhật địa hình đáy được tính đồng thời, phản ánh tương tác hai chiều. Tuy nhiên, Mf quá lớn có thể gây sai lệch kết quả, đặc biệt trong điều kiện cực trị. Luận án sử dụng MorFac cố định và chuỗi điều kiện biên đại diện 01 năm, đảm bảo cân bằng giữa độ chính xác và hiệu quả khi mô phỏng DBHT trong 5-10 năm.

2.3 Phương pháp nghiên cứu DBHT dài hạn cửa sông ven biển

2.3.1 Phân tích ảnh viễn thám và GIS

- Phân tích biến động đường bờ: Thu thập ảnh, tăng cường chất lượng, nắn chỉnh hình học, tính chỉ số NDWI để tách đất - nước, chiết tách đường bờ. Kết quả được hiệu chỉnh, biên tập bằng ArcGIS và phân tích biến động bằng DSAS với hai chỉ số SCE và LRR.

- Sử dụng ảnh Sentinel-2 kết hợp số liệu đo sâu để giải đoán địa hình đáy cửa Nhật Lệ: Xử lý ảnh, loại bỏ địa hình trên cạn, hiệu chỉnh ánh sáng phản chiếu, tính chỉ số độ sâu, xây dựng phương trình tương quan (R^2 = 0,767), từ đó giải đoán độ sâu các thời điểm 2015-2024.

2.3.2 Mô hình hóa thủy văn, thủy lực và VCBC khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu DBHT dài hạn cửa Nhật Lệ yêu cầu bộ dữ liệu đầu vào liên tục, tối thiểu 20 năm để bao quát chu kỳ thủy văn 11 năm và hải văn 19 năm. Do thiếu dữ liệu thực đo, luận án tạo chuỗi số liệu bằng mô hình (SWAT tính toán dòng chảy và bùn cát từ mưa, Mike Flood xác định lưu lượng ra cửa sông, Litpack mô phỏng VCBC dọc bờ). Delft3D (2DH) là mô hình trung tâm, mô phỏng thủy động lực, bùn cát và hình thái cửa sông.

2.3.3 Thiết lập mô hình Delft3D cho khu vực nghiên cứu

• *Phạm vi và điều kiện biên*: Miền lưới tính mở rộng 12km vào sông, 40km ra biển và 40km dọc bờ mỗi phía. Độ phân giải lưới từ 10-30m tại cửa sông, thưa dần ra biển 50-1.000m, đảm bảo mô phỏng chính xác thủy động lực và vận chuyển bùn cát. MH sử dụng biên lưu lượng sông, mực nước thủy triều, sóng, gió và bùn cát. Lưu lượng sông lấy từ khảo sát hoặc mô hình Mike Flood; mực nước từ TPXO7.2 kết hợp số liệu trạm Đồng Hới; sóng, gió từ Wave Watch III; bùn cát từ mô hình SWAT. Biên bùn cát ngoài biển bằng 0 và điều kiện Neuman cho ven bờ.

Hình 2.10: Phạm vi mô hình thiết lập cho cửa Nhật Lệ

• *Hiệu chỉnh, kiểm định mô hình*: Với bộ dữ liệu khảo sát kế thừa từ đề tài KC08.16/16-20, gồm 2 đợt tháng 4/2018 và 10/2018. Hiệu chỉnh thủy động lực dựa trên số liệu mực nước, sóng, dòng chảy. Đánh giá bằng NSE trong khoảng 0,6-0,89 và RMSE trong khoảng 0,06-0,21 cho thấy mô hình mô phỏng sát với thực đo. Hiệu chỉnh VCBC và bồi - xói dựa trên bình đồ địa hình chập của hai đợt đo, so sánh phạm vi, khối lượng bồi - xói theo 4 phân vùng đặc trưng ở cửa Nhật Lệ. Kết quả phù hợp với chập bình đồ khảo sát (bờ Bắc và trong cửa xói lở, bờ Nam và ngoài cửa bồi tụ). Mô hình đạt độ tin cậy, sẵn sàng tính toán các kịch bản phục vụ nghiên cứu.

2.4 Kết luận Chương 2

Trong chương 2, luận án đã phân tích điều kiện khí tượng, thủy - hải văn, đặc biệt sự biến động theo mùa của sóng, mực nước và lưu lượng cửa sông. Trình bày cơ sở lý thuyết mô hình Delft3D, hệ số gia tốc hình thái (MorFac hay M_f) và phương pháp kết hợp MHT với thống kê để xây dựng điều kiện biên đặc trưng, rút ngắn thời gian tính toán nhưng vẫn đảm bảo độ tin cậy. Ảnh viễn thám và GIS được dùng để phân tích biến động đường bờ, địa hình đáy và làm đầu vào mô hình. Mô hình Delft3D mô phỏng thủy động lực, VCBC và hướng tiếp cận mô phỏng dài hạn DBHT.

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN HÌNH THÁI CỬA NHẬT LỆ

3.1 Lựa chọn thời kỳ phân tích diễn biến hình thái cửa Nhật Lệ

Luận án lựa chọn 2 giai đoạn phân tích DBHT cửa sông Nhật Lệ (1999-2009 và 2009-2019) dựa trên một số cơ sở của khoa học và thực tiễn, gồm: (1) Chu kỳ thủy văn - hải văn (11-19 năm), phản ánh biến động dòng chảy và thủy triều, sóng; (2) Nguồn dữ liệu quan trắc đầy đủ gồm bình đồ địa hình và ảnh viễn thám (Landsat, Sentinel); (3) Tác động của con người, đặc biệt là xây dựng kè Mỹ Cảnh (2009) và nạo vét tuyến luồng tàu (2020).

3.2 Diễn biến hình thái cửa Nhật Lệ qua dữ liệu quan trắc

3.2.1 Biến động đường bờ khu vực cửa Nhật Lệ

• *Biến động theo mùa của đường bờ*:

Dựa trên đặc điểm phân mùa thủy - hải văn, nghiên cứu chọn ảnh Landsat và Sentinel-2 để giải đoán đường bờ theo hai mùa: Đông (I-IV, IX-XII) và Hè (V-VIII). Giai đoạn 1999-2009, doi cát phát triển mạnh, đặc biệt doi cát Nam kéo dài, thu hẹp cửa sông. Giai đoạn 2009-2019, doi cát nhỏ dần, cửa sông mở rộng. Giai đoạn 2020-2024, doi cát Bắc biến mất,

doi cát Nam thu hẹp, dịch chuyển vào trong cửa.

• *Biến động mũi tên cát phía Nam cửa Nhật Lệ:*

Thống kê các đặc trưng: lưu lượng sông lớn nhất năm (Qmax), chiều rộng cửa sông (B), chiều dài (L) và góc xoay (φ) của mũi tên cát phía Nam từ ảnh VT cuối mỗi mùa. Kết quả cho thấy giai đoạn 2009-2019 so với 1999-2009: Qmax tăng (1.941 lên 2.145 m^3/s), B giảm (258 còn 199 m), L giảm (218-269 còn 132-160 m), φ giảm, mũi tên cát xoay dần ra biển.

• *Tốc độ biến động đường bờ biển:*

Nghiên cứu sử dụng 180 vị trí mặt cắt giả định (cách nhau 100 m) để phân tích biến động đường bờ cửa Nhật Lệ qua hai giai đoạn: 1999-2009 và 2009-2019, dựa trên chỉ số SCE và LRR. Kết quả cho thấy khu vực gần cửa sông biến động mạnh, đặc biệt ở đoạn bờ phía Bắc 4 km và phía Nam 2,5 km. Giai đoạn 2009-2019, mức độ xói lở gia tăng, rõ nhất ở phường Hải Thành, Quang Phú và xã Bảo Ninh, với tốc độ trung bình 2-4 m/năm.

• *Biến động xói lở - bồi tụ bờ biển:*

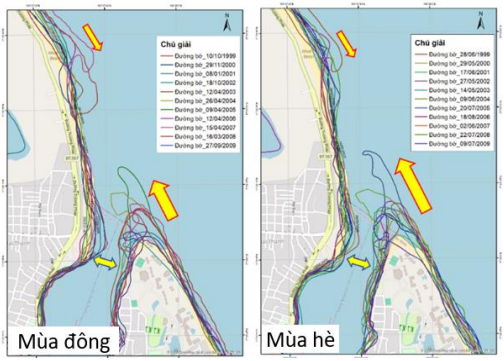
Dùng ảnh viễn thám và GIS phân tích biến động bờ biển Nhật Lệ: Giai đoạn 1999-2009 bồi tụ chiếm ưu thế, diện tích bồi lớn nhất ở bờ Bắc 10,76 ha, bờ Nam 2,52 ha. Tốc độ bồi tối đa, bờ Bắc 10,12 m/năm, bờ Nam 28,44 m/năm. Xói lở chủ yếu bờ Nam, diện tích 1,68 ha. Giai đoạn 2009-2019 xói lở tăng mạnh, diện tích xói bờ Bắc 4,31 ha, bờ Nam 6,59 ha. Bờ biển bị xói nhưng trong cửa sông vẫn bồi tụ, gây thu hẹp cửa sông (trên mặt bằng).

3.2.2 Diễn biến đường lạch sâu qua cửa Nhật Lệ

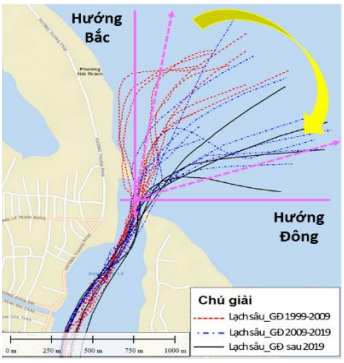
Sự hình thành và biến đổi không ổn định của mũi cát nhô phía Bắc và mũi tên cát phía Nam khiến lạch sâu qua cửa Nhật Lệ luôn dao động mạnh, quét góc khoảng 60° từ BĐB đến ĐĐB. Giai đoạn 1999-2009, lạch sâu hướng Bắc-BĐB; 2009-2019 chuyển sang BĐB-ĐĐB; 2020-2024 dịch dần ĐĐB-Đông. Xu thế chung: lạch sâu chuyển dịch dần về hướng Đông.

3.2.3 Diễn biến xói lở - bồi tụ lòng dẫn khu vực cửa Nhật Lệ

Từ dữ liệu bình đồ đo đạc, nghiên cứu so sánh chập bình đồ các giai đoạn 2005-2007, 2009-2015, 2015-2019 và 2009-2019 để đánh giá biến động bồi - xói cửa Nhật Lệ. Kết quả cho thấy: phân vùng cửa sông có xu thế bồi tụ mạnh (khối lượng bồi 812.000 m^3 giai đoạn 2009-2015), trong khi phân vùng bờ Bắc và bờ Nam chủ yếu xói lở. Xét tổng thể 2005-2019, khu vực cửa sông bồi tụ, còn bờ biển bị xói mạnh.



Hình 3.1-a: Biến động đường bờ khu vực cửa Nhật Lệ giai đoạn 1999-2009



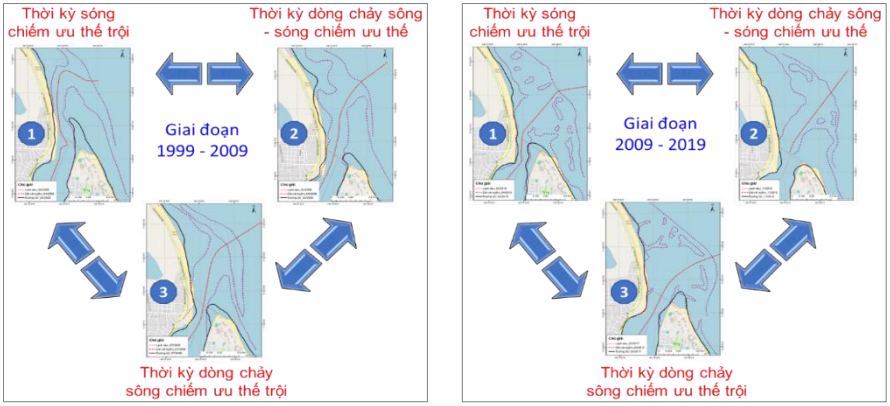
Hình 3.8: Tổng hợp diễn biến đường lạch sâu cửa Nhật Lệ

3.2.4 Tổng hợp xu thế DBHT cửa Nhật Lệ qua dữ liệu quan trắc

Từ dữ liệu đo đạc bình đồ và ảnh Sentinel, tổng hợp được bộ dữ liệu về đường bờ, dải cát ngầm và đường lạch sâu để đánh giá BĐHT cửa Nhật Lệ: BĐHT cửa sông phụ thuộc vào lưu lượng sông và sóng. Khi lưu lượng và sóng nhỏ (như năm 2005, 2015), mũi tên cát phía Nam phát triển mạnh, ép đường lạch sâu về phía Bắc, cửa sông bị thu hẹp. Khi lưu lượng và sóng lớn (2006, 2009, 2012, 2017), mũi tên cát bị thu ngắn, cửa sông mở rộng, đường lạch sâu dịch về giữa cửa, dải cát ngầm được đẩy ra xa phía biển.

3.2.5 Biến động hình thái cửa Nhật Lệ trong mối liên hệ với điều kiện thuỷ - hải văn vùng CSVB

Luận án đã khái quát được thành sơ đồ về chu trình biến đổi hình thái cửa Nhật Lệ trong giai đoạn 1999-2019 và 2009-2019.



a) Giai đoạn 1999 - 2009 *b) Giai đoạn 2009 - 2019*

Hình 3.13: Sơ đồ chu trình biến đổi hình thái cửa Nhật Lệ từ 1999 - 2019

Các chu trình này có ba hình thái cơ bản đặc trưng cho các thời kỳ: (1) Thời kỳ sóng chiếm ưu thế trội, (2) Thời kỳ dòng chảy sông - sóng cùng chiếm ưu thế, (3) Thời kỳ dòng chảy sông chiếm ưu thế trội. Hình thái cửa sông giai đoạn 2009-2019 có mũi tên cát phía bờ Nam ngắn hơn, hướng xoay ra phía biển và đường lạch sâu dịch về phía giữa cửa, dải cát ngầm cửa sông thu hẹp và phân tán thành các khu bồi - xói xen kẽ nhiều hơn so với giai đoạn trước

3.3 Đánh giá tác động và mức độ chi phối của các yếu tố động lực đến DBHT dài hạn cửa Nhật Lệ

Hình thái CSVB biến động liên tục do tác động tổng hợp của các yếu tố động lực sông, biển với hai quy mô thời gian: dài hạn (sóng, gió mùa, thủy triều, mực nước dâng - hạ theo mùa, lưu lượng sông trung bình ngày) và ngắn hạn (sóng, nước dâng trong bão, lưu lượng lũ lớn). Trong nghiên cứu DBHT dài hạn, yếu tố ngắn hạn không phân tích chi tiết. Mục 3.3 đánh giá tác động của các yếu tố đến biến động hình thái và làm cơ sở để chọn yếu tố cần đưa vào điều kiện biên của mô phỏng dài hạn DBHT cửa Nhật Lệ.

3.3.1 Phân tích lựa chọn các kịch bản

Luận án đánh giá tác động và mức độ chi phối của các yếu tố động lực (sóng, thủy triều, gió vùng nội tại, lưu lượng sông, nước dâng-hạ theo mùa) đến biến động hình thái cửa Nhật Lệ thông qua tính toán khối lượng bồi - xói lòng dẫn một năm liên tục với mô hình Delft3D, chọn năm 2018 do có dữ liệu đồng bộ. Mực nước đo giờ được phân tích tách thành phần thủy triều và nước dâng-hạ theo mùa với biên độ dao động mùa 20-40 cm (hè thấp, đông cao). Nghiên cứu mô phỏng 5 kịch bản: kịch bản nền KB1 với đầy đủ 5 yếu tố và 4 kịch bản loại bỏ lần lượt từng yếu tố; riêng yếu tố thủy triều là yếu tố nền cơ bản luôn tồn tại và biến động theo chu kỳ nên được được đưa vào trong tất cả các kịch bản.

3.3.2 Kết quả tính toán biến động bồi - xói lòng dẫn theo các kịch bản

Kết quả mô phỏng 5 kịch bản cho thấy kịch bản KB2 (không có sóng) khác biệt rõ nhất so với kịch bản nền KB1 về xu thế bồi - xói. Các kịch bản KB3, KB4, KB5 (loại bỏ lần lượt gió nội tại, lưu lượng sông, nước dâng - hạ theo mùa) ít khác biệt so với KB1 (đủ 5 yếu tố). Ở KB2, địa hình đáy biến động chủ yếu do lưu lượng sông, hình thành dải cát ngầm chắn cửa dạng cung tròn khép kín. Khối lượng bồi - xói tại KB2 nhỏ nhất so với KB1 và các kịch bản khác.

3.3.3 Đánh giá tác động và mức độ chi phối của các yếu tố động lực đến DBHT cửa Nhật Lệ

Đánh giá tác động của các yếu tố động lực thông qua so sánh khối lượng bồi - xói giữa 5 kịch bản. Kết quả cho thấy sóng là yếu tố chi phối mạnh nhất, khi loại bỏ sóng (KB2), khối lượng bồi - xói giảm 48,6 - 69,1% tại cửa sông và 94,4 - 98,1% tại bờ biển. Lưu lượng sông (KB4) ảnh hưởng lớn, giảm bồi - xói cửa sông 13 - 14%. Nước dâng - hạ theo mùa (KB5) gây xói đáng kể, giảm 6 - 7% tại cửa và 7,7 - 9% tại bờ biển. Gió nội tại (KB3) chỉ tác động nhỏ, thay đổi 0,9 - 2,4%. Như vậy, sóng và lưu lượng sông là 2 yếu tố có vai trò chi phối, nước dâng - hạ theo mùa có tác động lớn đến DBHT cửa Nhật Lệ.

Hình 3.16: Sơ đồ đánh giá tác động và mức độ chi phối của các yếu tố động lực đến DBHT cửa Nhật Lệ

3.4 Nghiên cứu hướng tiếp cận xây dựng mô hình mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông Nhật Lệ

Với cơ sở khoa học về hướng tiếp cận kết hợp giữa kỹ thuật thống kê và mô hình mô phỏng đã trình bày trong mục 2.2.3 của Chương 2 và các yếu tố động lực tác động chính đã xác định được trong mục 3.3, luận án nghiên cứu cụ thể hướng tiếp cận để xây dựng MH mô phỏng dài hạn DBHT cho cửa sông Nhật Lệ.

3.4.1 Phân tích xử lý số liệu điều kiện biên của mô hình DBHT dài hạn

• *Phân tích thống kê để xử lý số liệu điều kiện biên sóng:* Sử dụng chuỗi dữ liệu sóng 45 năm (1979-2024) từ Wave Watch III ngoài khơi Nhật Lệ. Phân tích thống kê về tần suất xuất hiện của 3 tham số sóng (chiều cao, hướng, chu kỳ) cho từng tháng của 12 tháng trong năm và phân phối thành sóng khí hậu đặc trưng trong 01 năm để dùng làm điều kiện biên cho mô phỏng dài hạn DBHT cửa Nhật Lệ. Kết quả phân tích thống kê cho thấy sóng biến đổi rõ rệt theo mùa. Mùa gió Đông Bắc (tháng 10-3), hướng sóng BĐB-ĐĐB-ĐĐN, chiều cao và chu kỳ lớn nhất vào tháng 10-1. Mùa gió Tây Nam (tháng 5-8), hướng sóng BĐB-ĐN và ĐĐB-TN, chiều cao và chu kỳ nhỏ nhất tháng 5-8. Tháng 4 và 9 chuyển mùa, sóng có ba hướng chính, tháng 9 mạnh hơn tháng 4. Sóng phổ biến cao 0,25-1,65 m (83,1%), chu kỳ 3-8 s (78,9%), hướng BĐB-ĐĐN (59,4%). Sóng lớn >2 m tập trung ở hướng Bắc đến Đông (10%).

• *Phân tích điều hòa để xử lý số liệu cho điều kiện biên mực nước:* Sử dụng chuỗi 35 năm mực nước giờ (1990-2024) tại trạm Đồng Hới (cửa

Nhật Lệ) để xây dựng biên mực nước cho mô hình DBHT dài hạn. Bằng phương pháp phân tích điều hòa, mực nước được tách thành hai thành phần: dao động thủy triều (chu kỳ nhật triều, bán nhật triều và sóng dài theo mùa) và dao động phi triều (nước dâng do gió, bão, sóng, lũ). Thành phần phi triều không có tính quy luật được loại bỏ. Kết quả xác định 69 hằng số điều hòa, trong đó chọn 10 hằng số chính (Q1, O1, P1, K1, N2, M2, S2, K2, SA, SSA) và hằng số A_0 để dự tính mực nước làm điều kiện biên. Do miền tính rộng (40 km), luận án kết hợp A_0 và SA, SSA với bộ hằng số triều toàn cầu TOPEX, đảm bảo đặc trưng khu vực và tính liên tục thủy triều trên toàn biên mô hình.

• *Phân tích thống kê xử lý số liệu cho điều kiện biên lưu lượng, bùn cát sông:* Do không có trạm đo lưu lượng, bùn cát gần cửa sông Nhật Lệ (trạm thủy văn Kiến Giang, Tám Lu ở thượng nguồn đã ngừng hoạt động từ thập niên 1980), luận án sử dụng mô hình SWAT và Mike Flood (được kế thừa, cập nhật bổ sung từ đề tài KC08.16/16-20) để mô phỏng thủy văn - thủy lực, bùn cát để xác định chuỗi 35 năm (1990-2024) lưu lượng, nồng độ BCLL trung bình ngày ra cửa sông. Kết quả cho thấy lưu lượng lớn nhất dao động <1000 m^3/s (năm ít nước) đến 2000-4000 m^3/s (năm nhiều nước); nồng độ BCLL biến đổi từ <50 g/m^3 (mùa kiệt) đến ≈ 5 kg/m^3 (lũ lớn). Chuỗi số liệu này được thống kê, sử dụng giá trị trung vị làm điều kiện biên cho mô hình DBHT dài hạn.

3.4.2 Mô phỏng thủy động lực khu vực cửa sông Nhật Lệ trên mô hình DBHT

Để mô phỏng đúng được DBHT cửa sông, trước hết MH phải tái hiện được chế độ thủy động lực cửa sông. Luận án chạy MH tính toán và đánh giá với điều kiện biên 01 năm đã xác định được ở mục 3.4.1. Kết quả cho thấy MH phản ánh tốt biến động thủy động lực theo mùa tại khu vực cửa Nhật Lệ.

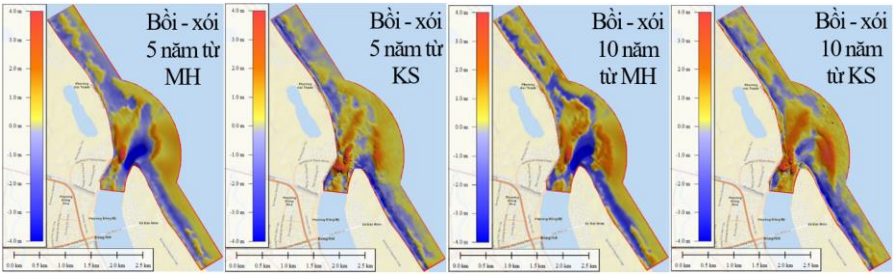
• *Đặc trưng sóng:* Trong mùa gió Đông Bắc, sóng chủ yếu từ hướng ĐB với chiều cao ven bờ phía Bắc 0,7-1,1 m và phía Nam 0,5-0,8 m. Sóng bị khúc xạ mạnh, gây hội tụ và tập trung năng lượng tại bờ Bắc, dẫn đến xói lở mạnh, trong khi bờ Nam ít bị tác động, có xu hướng bồi tụ. Dòng ven bờ mùa này chủ yếu từ Bắc xuống Nam, chi phối vận chuyển bùn cát và gây xói phía Bắc. Mùa gió Tây Nam, sóng từ hướng ĐN yếu hơn, phân bố đều, ít hội tụ, chủ yếu bồi lắng quanh mũi cát phía Nam. Dòng ven bờ đảo chiều từ Nam lên Bắc, giảm tạm thời xói lở do mùa Đông Bắc để lại.

• *Đặc trưng dòng chảy:* Mùa gió Đông Bắc, dòng chảy hướng chủ đạo ĐN với vận tốc >0,5 m/s, mở rộng ra biển. Ven bờ hình thành dòng ven bờ 0,2-0,35 m/s, gây xói lở. Mùa gió Tây Nam, dòng chảy yếu hơn, lệch về

phía Bắc do sóng ĐN. Ven bờ phía Bắc, dòng từ Nam lên Bắc, giảm xói lở. Phía Nam cửa sông xuất hiện dòng hội tụ yếu, tăng bồi tụ. Sự thay đổi dòng ven bờ phản ánh rõ sự chi phối của gió mùa, sóng và địa hình bờ, quyết định quá trình xói - bồi cửa sông.

3.4.3 Mô phỏng dài hạn diễn biến hình thái cửa sông Nhật Lệ

Mô hình Delft3D được thiết lập với điều kiện biên phản ánh đầy đủ biến động thủy hải văn theo mùa như trên, sau đó mở rộng mô phỏng DBHT cho 5 và 10 năm. Do chuỗi số liệu điều kiện biên dài 01 năm nên hệ số gia tốc hình thái MorFac (Mf) được áp dụng giá trị từ 5 đến 10 khi mô phỏng DBHT cho 5-10 năm. Cách này cho phép lặp lại chuỗi biên, đồng thời nhân tốc độ thay đổi hình thái với hệ số MorFac cho từng bước thời gian mô phỏng, đảm bảo phản ánh xu thế dài hạn. So sánh kết quả MH với số liệu đo đạc (2009-2015 và 2009-2019) cho thấy mô hình mô phỏng tốt xu thế bồi - xói, đặc biệt tại khu vực biến động mạnh. Ở phân vùng cửa sông, tỷ lệ V_{MH}/V_{KS} (V_{MH} - khối lượng bồi, xói từ MH, V_{KS} - khối lượng bồi, xói từ khảo sát) đạt 0,83 lần (672.855/811.785 m³) cho 5 năm và 0,86 lần (1.022.888/1.195.480 m³) cho 10 năm, thể hiện sự tương đồng về xu thế và mức độ biến động; ở các phân vùng khác (trong sông, bờ Bắc, bờ Nam) đạt tỷ lệ thấp hơn. Điều này khẳng định tính khả thi của mô hình mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông Nhật Lệ.



Hình 3.29: So sánh BĐ bồi - xói giữa kết quả MH và đo khảo sát địa hình

3.4.4 Đề xuất hướng tiếp cận xây dựng mô hình mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông Nhật Lệ

Từ kết quả mô phỏng dài hạn DBHT (5 và 10 năm) trong giai đoạn 2009-2019, luận án đề xuất hướng tiếp cận xây dựng mô hình mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông Nhật Lệ với các bước chính sau:

• *Phân tích điều kiện biên:*

- Biên sóng: Chuỗi sóng khí hậu trong 01 năm, phân tích thống kê để xác định biên sóng khí hậu.

- Biên mực nước: Chuỗi mực nước giờ trong 01 năm, phân tích điều hòa

thủy triều để xác định các hằng số thủy triều, nước dâng - hạ theo mùa.

- Biên lưu lượng sông: Chuỗi lưu lượng trung bình ngày trong 01 năm, phân tích thống kê xác định giá trị trung vị.

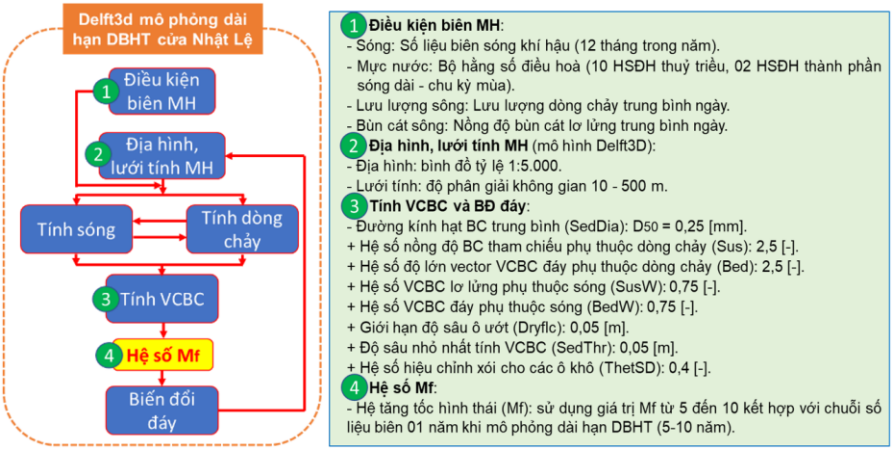
- Biên bùn cát: Chuỗi nồng độ bùn cát lơ lửng trung bình ngày trong 01 năm, phân tích thống kê xác định giá trị trung vị.

• *Thiết lập mô hình:*

Ứng dụng Delft3D với hệ số gia tốc hình thái M_f, lưới tính phân giải 10-20 m vùng cửa sông, tăng dần ra biển đến 500 m, đảm bảo độ chính xác và thời gian tính toán hợp lý.

• *Thời gian mô phỏng:*

Chọn mô phỏng 5-10 năm, phù hợp xu thế biến động hình thái và khả năng tính toán trên máy tính cá nhân cấu hình cao.



Hình 3.31: Sơ đồ hướng tiếp cận xây dựng MH mô phỏng dài hạn DBHT cửa sông Nhật Lệ

3.5 Kết luận Chương 3

Chương 3 tập trung phân tích diễn biến hình thái (DBHT) cửa sông Nhật Lệ dựa trên dữ liệu quan trắc (ảnh viễn thám, đo đạc bình đồ nhiều năm) và kết quả mô phỏng Delft3D. Kết quả cho thấy cửa sông biến động phức tạp, với đặc trưng xói - bồi luân phiên chịu chi phối bởi sóng và dòng chảy sông theo mùa. Mũi tên cát phía Nam cửa Nhật Lệ có xu hướng ngắn dần, từ 218-269 m (1999-2009) xuống 132-160 m (2009-2019). Mô phỏng xác định sóng là yếu tố chi phối chính (48,6-69,1% tại cửa, 94,4-98,1% ở bờ biển phụ cận); tiếp đến là lưu lượng sông và mực nước theo mùa. Luận án đã nghiên cứu được hướng tiếp cận xây dựng mô hình mô phỏng dài hạn DBHT (5-10 năm), với chuỗi số liệu biên 01 năm kết hợp hệ số MorFac =

5 và 10, mô phỏng tốt xu thế biến đổi và dịch chuyển luồng lạch. Kết quả này là cơ sở khoa học cho chương 4, nơi đề xuất giải pháp ổn định cửa sông.

CHƯƠNG 4. ĐỊNH HƯỚNG GIẢI PHÁP ỔN ĐỊNH CỬA NHẬT LỆ

4.1 Mục tiêu, yêu cầu chỉnh trị cửa Nhật Lệ

• *Mục tiêu chỉnh trị*: Ổn định luồng tàu và duy trì độ sâu phục vụ giao thông thủy; đảm bảo thoát lũ (tần suất P = 5%); bảo vệ, tôn tạo bãi biển, giảm xâm thực, bảo vệ môi trường và cảnh quan khu vực cửa sông.

• *Yêu cầu chỉnh trị cửa Nhật Lệ*: Về chức năng và quy mô công trình, cửa Nhật Lệ là cửa sông phẳng có doi cát chắn, biến động mạnh theo mùa, gây bồi lấp luồng tàu và cản trở thoát lũ. Giải pháp chính là xây dựng hệ thống đê ngăn cát, giảm sóng (NCGS) hai phía cửa sông để hướng dòng, ổn định luồng và giảm nạo vét. Tuyến đê cần dài vượt đới sóng vỡ, đảm bảo thoát lũ tần suất 5% và có thể kết hợp du lịch. Bờ biển Bắc và Nam cửa Nhật Lệ bị xói lở nghiêm trọng, cần đê ngầm giảm sóng kết hợp mỏ hàn, vừa bảo vệ bờ vừa duy trì cảnh quan du lịch.

4.2 Tác động của bố trí không gian công trình đê NCGS đến khả năng thoát lũ

Đánh giá tác động của đê NCGS đến thoát lũ cửa Nhật Lệ bằng mô hình Delft3D với các phương án chiều dài đê khác nhau. Chiều rộng giữa hai đê cố định 350 m, giới hạn bởi đường Trương Pháp (bờ Bắc), kè SunSpa-Mỹ Cảnh (bờ Nam), nhằm xác định sơ bộ chiều dài phù hợp, đảm bảo thoát lũ.

4.2.1 Sơ bộ một số phương án đê NCGS

Cửa sông Nhật Lệ hẹp, gây khó khăn thoát lũ nên chiều rộng giữa hai đê NCGS không nhỏ hơn cửa sông tự nhiên. Luận án giữ nguyên hướng tuyến cửa sông, chỉ thay đổi chiều dài đê từ 250 m (chiều rộng T.Bình dải VCBC) đến 1000 m (vượt dải cát ngầm), tăng mỗi 100 m, gồm 8 phương án. Các PA được mô phỏng với lũ P = 5% để đánh giá ảnh hưởng thoát lũ. Sử dụng 11 điểm mực nước và vận tốc, cách nhau khoảng 500 m, từ cầu Nhật Lệ (P1) đến cửa sông (P11) để đánh giá tác động đê NCGS đến thoát lũ.

4.2.2 Đánh giá tác động của đê NCGS đến khả năng thoát lũ

• *Thay đổi mực nước lũ*: Phân tích mực nước lũ lớn nhất (Hmax) tại 11 điểm dọc sông Nhật Lệ cho thấy, khi chiều dài đê NCGS tăng từ PA0 đến PA1000m, mực nước có xu hướng tăng, rõ rệt từ PA650m trở đi. Tại P1-P4 (gần cầu Nhật Lệ), Hmax tăng 0,25-0,27m; P5-P8 tăng 0,26-0,30m, phản ánh ảnh hưởng thoát lũ giảm. P10 (cửa sông) tăng mạnh nhất 0,91 m (từ

1,10m lên 2,01m) do dồn nước, trong khi P11 (ngoài biển) chỉ tăng nhẹ 0,19m. Phân tích hồi quy cho thấy Hmax tăng mạnh đến PA750m, sau đó ổn định dần.

• *Thay đổi vận tốc dòng chảy lũ*: Phân tích trường dòng chảy lũ tại cửa sông Nhật Lệ theo các phương án bố trí đê NCGS cho thấy chiều dài đê ảnh hưởng lớn đến thoát lũ và bồi lấp. Ở PA0 (không có đê), dòng chảy phân tán mạnh, tạo xoáy cục bộ, giảm hiệu quả thoát lũ. Các phương án PA250m-PA450m bắt đầu định hướng dòng nhưng vẫn còn phân tán sau khi qua cửa sông. Từ PA550m-PA750m, dòng chảy ổn định, vận tốc tập trung theo trục ra biển, giảm xoáy và tăng vận chuyển bùn cát. Tuy nhiên, PA850m-PA1000m gây kênh hóa quá mức, hình thành vận tốc cực đại cục bộ giữa 2 đê NCGS. Phân tích vận tốc Vmax cho thấy P1-P4 giảm nhẹ (0,08-0,09 m/s), P5-P8 ít biến động, P9-P10 giảm mạnh gần 1 m/s, còn P11 tăng đột biến từ 2,31 lên 4,50 m/s, chứng tỏ đê dài khoảng 750m cho hiệu quả thoát lũ.

• *Tương quan giữa mực nước - vận tốc dòng chảy lũ và chiều dài đê NCGS*: Phân tích mối tương quan giữa mực nước lũ cực đại (Hi/H_0 max) và vận tốc dòng chảy lũ (Vi/V_0 max) tại đoạn P7-P11 cho thấy tác động rõ rệt của chiều dài đê NCGS. Khu vực trong cửa (P7-P9) thể hiện mối quan hệ nghịch tuyến tính rõ, R^2 đạt 0,82-0,88: mực nước tăng, vận tốc giảm. Tại P10 sát cửa sông, tương quan nghịch mạnh nhất với $R^2 = 0,99$, phản ánh vai trò cửa sông như vùng chuyển tiếp, nơi mực nước cao làm phân tán dòng chảy, giảm vận tốc tập trung. Ngược lại, tại P11 ngoài cửa, mối quan hệ chuyển sang tương quan thuận, $R^2 = 0,41$, cho thấy mực nước tăng kéo theo vận tốc tăng do chênh lệch thủy lực giữa sông và biển, nhưng độ tin cậy thấp vì chịu ảnh hưởng thêm của sóng và địa hình đáy biển. Kết quả cho thấy chiều dài hợp lý của đê cần cân bằng giữa giảm dâng mực nước và duy trì vận tốc thoát lũ.

4.3 Định hướng giải pháp ổn định cửa sông Nhật Lệ

Trên cơ sở chiều dài đê NCGS đã xác định, luận án nghiên cứu bố trí chi tiết hệ thống công trình, phân tích và đề xuất giải pháp chỉnh trị phù hợp nhằm ổn định tổng thể khu vực cửa sông Nhật Lệ.

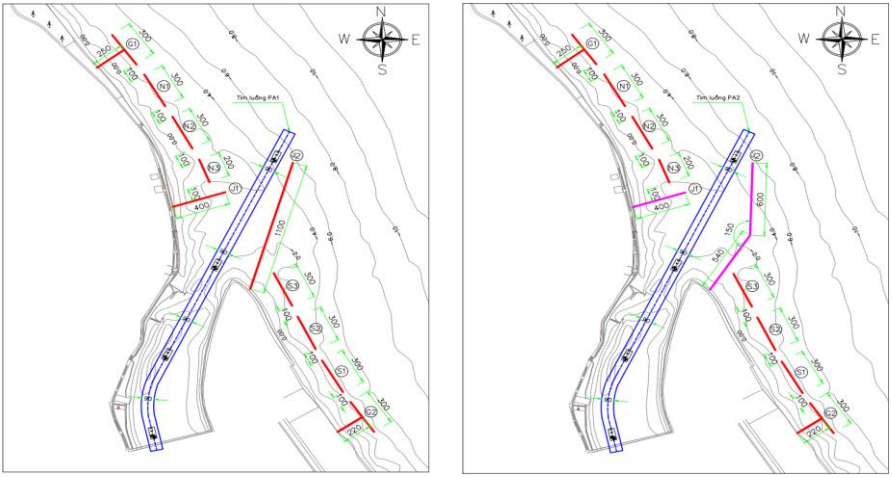
4.3.1 Phương án bố trí không gian hệ thống công trình ổn định cửa sông Nhật Lệ

• *Đề xuất phương án đê NCGS ổn định tuyến luồng tàu cửa sông*: Kết quả phân tích cho thấy, để ổn định cửa sông Nhật Lệ và khắc phục dải cát ngầm chắn cửa, đê NCGS cần chiều dài tối thiểu 750 m. Tuy nhiên, tăng chiều dài đê có thể gây dâng mực nước lũ do giảm khả năng thoát lũ trực tiếp ra biển. Vì vậy, khi chọn phương án ≥750 m, cần điều chỉnh hướng và

khoảng cách giữa hai đê để mở rộng không gian thoát lũ, giảm nguy cơ úng ngập khu dân cư ven sông. Kết quả nghiên cứu hình thái cho thấy luồng lạch, mũi tên cát phía Nam và dải cát ngầm biến động mạnh. Với cao độ đáy luồng tàu thiết kế -6,3 m, trong khi dải cát ngầm chỉ -2 đến -4 m, tuyến đê NCGS cần phải vượt qua dải cát này mới phát huy hiệu quả tốt. Luận án đề xuất hai phương án: PA1 với đê NCGS bờ Bắc dài 400 m, vuông góc bờ biển; đê NCGS bờ Nam dài 1.100 m, chếch góc 45° với bờ. PA2 với đê NCGS bờ Bắc như PA1; đê NCGS bờ Nam gồm 2 đoạn, lần lượt dài 540 m (chếch 70°) và 600 m (giảm sóng); cao trình đỉnh đê +3,0 m.

• *Đề xuất phương án đê ngầm giảm sóng ổn định bờ biển phụ cận*: Luận án đề xuất xây dựng hệ thống đê ngầm giảm sóng tách bờ nhằm gây bồi và ổn định bờ biển phía Bắc và Nam cửa sông. Vị trí, quy mô công trình được xác định dựa trên TCVN 9901:2023, kết quả nghiên cứu trước đây và tính toán chiều rộng VCBC trong vùng sóng vỡ bằng mô hình Litpack. Kết quả cho thấy VCBC rộng 220-250 m từ bờ ra, cao độ đáy khoảng -5 m. Phương án đề xuất: (1) Bờ Bắc (Bàu Tró), tuyến chỉnh trị dài 1,4 km bố trí 3 đê ngầm (2 dài 300 m, 1 dài 200 m), cách bờ 200- 250 m, đỉnh +0,5 m, khoảng cách giữa các đê 100 m; kèm 1 mỏ hàn chữ T (cánh 300 m, thân 220 m, đỉnh +0,5 m). (2) Bờ Nam (Bảo Ninh), tuyến chỉnh trị dài 1,5 km bố trí 3 đê ngầm (mỗi đê 300 m) cùng khoảng cách và cao trình như bờ Bắc; mỏ hàn chữ T (cánh 300 m, thân 230 m, đỉnh +0,5 m).

Tổng hợp giữa hai phương án công trình đê NCGS và phương án đê ngầm giảm sóng thành hai phương án bố trí không gian của hệ thống thống công trình ổn định cửa Nhật Lệ, ký hiệu là PA1-BW và PA2-BW).



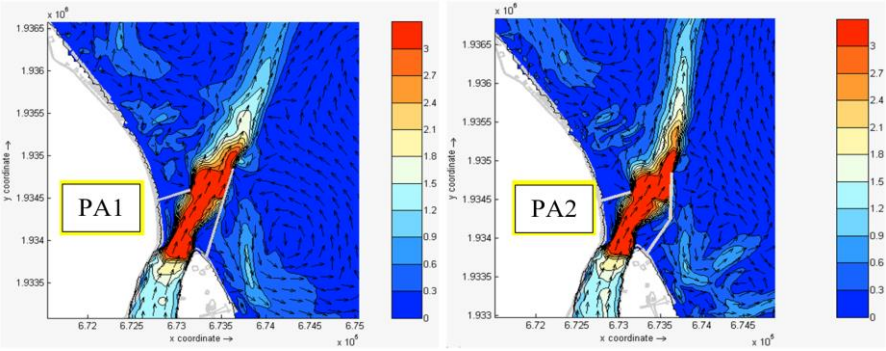
a) Phương án công trình PA1-BW *b) Phương án công trình PA2-BW*

Hình 4.11: Bố trí tổng thể hệ thống công trình cửa Nhật Lệ

4.3.2 Đánh giá tác động của công trình đến khả năng thoát lũ sông

• *Thay đổi mực nước lũ*: Đánh giá tác động các phương án đê NCGS đến mực nước lũ lớn nhất (Hmax) cho thấy cả PA1 và PA2 đều làm Hmax tăng so với hiện trạng (PA0), đặc biệt tại vùng thượng lưu (P1-P6). PA1 gây ảnh hưởng mạnh hơn, ví dụ tại P1: Hmax tăng từ 2,99 m (PA0) lên 3,10 m (PA1) và 3,07 m (PA2). Vùng trung lưu (P5-P7) cũng tăng rõ, như P7 từ 2,70 m lên 2,83 m (PA1) và 2,79 m (PA2). Khu vực cửa sông (P9-P11) mức tăng nhỏ hơn, nhưng P10 nhạy cảm nhất, từ 1,10 m lên 1,76 m (PA1) và 1,53 m (PA2).

• *Thay đổi vận tốc dòng chảy lũ*: Kết quả mô phỏng dòng chảy lũ thiết kế P = 5% cho thấy sự khác biệt giữa hai phương án đê NCGS. Ở PA1, dòng chảy tập trung và tăng tốc mạnh (vận tốc > 2,7 m/s) nhưng lệch về bờ Nam, gây xoáy cục bộ nguy cơ xói tại đầu đê. PA2 dẫn dòng ổn định hơn, hướng thẳng ra biển, vùng vận tốc lớn phân bố đều, giảm xáo trộn và suy yếu dòng xoáy. Nhờ không gian thoát lũ rộng hơn, PA2 hiệu quả hơn trong kiểm soát và phân bố dòng chảy.



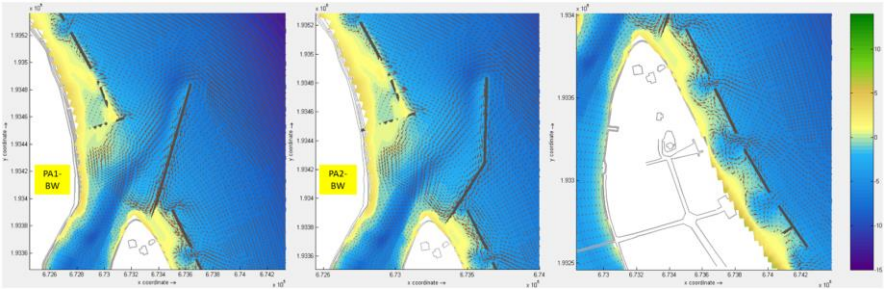
Hình 4.13: Biến đổi v.tốc dòng chảy lũ các PA bố trí không gian đê NCGS

4.3.3 Đánh giá tác động của hệ thống công trình đến biến động thủy động lực

• *Thay đổi đặc trưng sóng*: Trường sóng khu vực cửa sông Nhật Lệ được phân tích cho hai chế độ gió mùa chủ đạo (Đông Bắc và Tây Nam) với các phương án. Cả hai phương án công trình đều làm giảm đáng kể tác động sóng, đặc biệt trong mùa gió Đông Bắc khi sóng lớn và nguy cơ xói lở cao. Trong mùa gió Đông Bắc, hiện trạng (PA0) cho thấy sóng Đông Bắc tác động trực tiếp vào cửa sông, chiều cao sóng >1,2 m, gây nguy cơ biến động bồi-xói và cản trở tàu thuyền. Với PA1-BW và PA2-BW, sóng bị bẻ hướng và suy yếu rõ rệt, trong đó PA2-BW hiệu quả hơn, tạo vùng nước êm phía sau đê, bảo vệ cửa sông và ổn định hình thái. Trong mùa gió Tây Nam, hiện trạng sóng vẫn xâm nhập sâu nhưng lệch hướng. Hai phương án

công trình giúp phản xạ và giảm sóng, với PA2-BW kiểm soát tốt hơn, hạ chiều cao sóng xuống dưới 0,6 m, bảo vệ bờ, đặc biệt là bờ Nam cửa sông.

• *Thay đổi đặc trưng dòng chảy*: Kết quả mô phỏng trường dòng chảy theo mùa tại cửa Nhật Lệ với hai phương án PA1-BW và PA2-BW cho thấy cả hai đều cải thiện đáng kể điều kiện thủy động lực so với hiện trạng. Tuy nhiên PA2-BW hiệu quả hơn, ổn định luồng dòng chảy ra biển, giảm dòng rối và xoáy ven bờ giúp kiểm soát bùn cát và giảm xói lở. Trong mùa gió Đông Bắc, PA2-BW có khoảng cách rộng giữa hai đê giúp giảm mức độ tập trung dòng chảy ra biển, triệt tiêu xoáy ngoài cửa, giảm sóng ở cả hai phía bờ và tạo vùng nước êm, hỗ trợ ổn định hình thái và bảo vệ luồng tàu. Vì vậy, PA2-BW được đánh giá là giải pháp phù hợp, hiệu quả và bền vững cho chỉnh trị cửa sông Nhật Lệ.



Hình 4.16: Trường dòng chảy khu vực công trình

4.4 Kết luận Chương 4

Chương 4 đã đề xuất một số phương án bố trí đê NCGS và tiến hành mô phỏng, đánh giá hiệu quả để đáp ứng yêu cầu chức năng và tham số thiết kế. Luận án tính toán, đánh giá tác động của bố trí không gian 02 đê NCGS đến thoát lũ, từ đó phân tích tạo cơ sở khoa học để lựa chọn chiều dài tuyến công trình, đề xuất hệ thống công trình tổng thể để ổn định khu vực cửa sông. Định hướng được giải pháp công trình đáp ứng tốt mục tiêu chỉnh trị, vừa đảm bảo an toàn thoát lũ và giao thông thủy, vừa ổn định hình thái cửa sông; hiệu quả của giải pháp được đánh giá mô phỏng dài hạn DBHT.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Đóng góp mới của luận án

(1) Làm sáng tỏ được sự tác động và mức độ chi phối của từng yếu tố thủy động lực (sóng, gió nội tại vùng nghiên cứu, lưu lượng sông, mực nước dâng - hạ theo mùa) đến biến động hình thái cửa sông Nhật Lệ, thông

qua phương pháp tách riêng điều kiện biên trong mô hình toán.

(2) Nghiên cứu được hướng tiếp cận xây dựng mô hình toán hai chiều (2DH) mô phỏng dài hạn (5 - 10 năm) DBHT cho cửa sông Nhật Lệ, trên cơ sở kết hợp giữa hai phương pháp, kỹ thuật thống kê (trong xử lý số liệu điều kiện biên) và mô hình mô phỏng (trong xử lý gia tăng tốc độ tính toán hình thái); khắc phục được hạn chế về thời gian tính toán đối với dạng mô hình mô phỏng dài hạn DBHT. Luận án đã đề xuất được giá trị của hệ số tăng tốc hình thái MorFac (Mf) phù hợp Mf từ 5 đến 10 kết hợp với chuỗi số liệu điều kiện biên một năm, khi mô phỏng DBHT cửa sông Nhật Lệ trong thời kỳ dài hạn từ 5 đến 10 năm.

(3) Định hướng được giải pháp công trình ổn định cửa sông Nhật Lệ và bờ biển phụ cận: hệ thống công trình theo phương án PA2-BW (gồm tuyến đê NCGS phía Bắc dài 400 m, tuyến đê NCGS phía Nam dài 1.100 m; cụm 03 đê ngầm, 01 mỏ hàn chữ T ở bờ biển phía Bắc và 03 đê ngầm, 01 mỏ hàn chữ T ở bờ biển phía Nam). Giải pháp góp phần ổn định tuyến luồng cửa sông và giảm thiểu nguy cơ xói lở - bồi lấp khu vực cửa sông Nhật Lệ. Giải pháp được đề xuất trên cơ sở nghiên cứu phân tích, đánh giá bố trí không gian của hệ thống công trình để đảm bảo thoát lũ và hiệu quả ổn định bồi - xói trên mô hình DBHT dài hạn.

2. Những kết quả đạt được

Luận án tập trung nghiên cứu DBHT và định hướng giải pháp ổn định cửa sông Nhật Lệ, làm rõ vai trò chi phối của các yếu tố động lực và đánh giá hiệu quả công trình chỉnh trị thông qua mô hình Delft3D. Trước hết, luận án tổng quan, phân loại và làm rõ đặc điểm hình thái, thủy động lực của loại hình cửa sông phẳng có doi cát chắn, phổ biến tại ven biển miền Trung. Từ tổng hợp các nghiên cứu trong và ngoài nước về DBHT và giải pháp ổn định cửa sông, luận án chỉ ra khoảng trống nghiên cứu về DBHT dài hạn và xác định cơ sở khoa học để xây dựng nội dung nghiên cứu.

Từ số liệu quan trắc (1999-2024) và ảnh viễn thám, luận án phân tích biến động đường bờ, lòng dẫn, lạch sâu cửa Nhật Lệ. Kết quả cho thấy cửa không ổn định, thường dịch chuyển mạnh vào mùa gió Đông Bắc. Vùng giao thoa sóng - dòng chảy sông thường hình thành dải cát chắn cửa, gây

bồi lắng cục bộ. Luận án xác lập chu trình biến đổi hình thái gồm ba trạng thái: (1) Sóng chiếm ưu thế, (2) Sóng và dòng chảy sông cùng chiếm ưu thế, (3) Dòng chảy sông chiếm ưu thế.

Ứng dụng mô hình Delft3D, luận án mô phỏng thủy động lực, vận chuyển bùn cát, DBHT và làm rõ vai trò của từng yếu tố. Sóng biển, đặc biệt mùa gió Đông Bắc, là yếu tố chi phối mạnh nhất, quyết định hướng và cường độ dòng ven bờ, tái phân bố trầm tích. Dòng chảy sông duy trì và mở cửa sông; thủy triều và mực nước biển dâng-hạ theo mùa cũng tác động đáng kể. Đây là đóng góp khoa học số 1. Luận án xây dựng mô hình mô phỏng dài hạn (5-10 năm) nhờ sử dụng hệ số tăng tốc hình thái (Mf) và phân tích thống kê điều kiện biên, cho phép mô phỏng các trạng thái bồi - xói thực tế. Đây là đóng góp số 2. Từ kết quả mô hình, luận án đề xuất hai phương án bố trí công trình ổn định cửa. Trong đó, phương án PA2-BW (đê ngăn cát giảm sóng phía Bắc dài 400 m, phía Nam dài 1.100 m, có 06 đê ngầm và 02 mỏ hàn chữ T) đạt hiệu quả ổn định dòng chảy và giảm bồi lắng. Đây là đóng góp số 3.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học tham khảo cho quy hoạch, thiết kế công trình ổn định cửa Nhật Lệ và tham khảo cho các cửa sông tương tự ven biển miền Trung.

3. Kiến nghị về hướng phát triển nghiên cứu

• *Một số hạn chế, tồn tại trong nghiên cứu của luận án:* Luận án kết hợp phân tích thống kê và mô hình Delft3D, giúp tăng tốc tính toán 5-10 lần nhưng mô phỏng dài hạn (5-10 năm) vẫn mất 5-7 ngày/chạy trên PC Core-i7. Luận án tập trung phân tích số liệu dài hạn trung bình hóa, chưa nghiên cứu chi tiết biến động cực trị (lũ, bão). Ngoài ra, chưa đánh giá tác động biến đổi khí hậu và hiệu quả kinh tế của giải pháp công trình.

• *Một số định hướng nghiên cứu tiếp:* Tiếp tục hoàn thiện mô hình mô phỏng dài hạn DBHT cho các cửa sông ven biển miền Trung, phục vụ ổn định dân sinh, kinh tế và phòng chống thiên tai. Đồng thời, nghiên cứu bố trí không gian, tham số thiết kế công trình nhằm nâng cao hiệu quả kinh tế - kỹ thuật và khả năng ổn định cửa sông./.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

[1] Doan Quang Tri, Nguyen Van Nhat, **Vu Dinh Cuong** (2023). Application of deep learning and remote sensing to assess the riverbank change: A case study at Nhat Le river mouth, Viet Nam. Proceedings of the Sixth International Scientific Conference (pages 215-226). The International Conference "Earth and Environmental Sciences, Mining for Digital Transformation, Green Development and Response to Global Change" (GREEN EME 2023, Ho Chi Minh City).

[2] **Vu Dinh Cuong**, Nguyen Thanh Hung, Tran Dinh Hoa, Nguyen Tien Thanh (2024). Shoreline Changes and Sediment Transport along Nhat Le Coast, Vietnam. Engineering, Technology & Applied Science Research. Vol. 14, No. 2, 2024, 13493-13501 (www.etasr.com).

[3] **Vũ Đình Cương**, Nguyễn Thanh Hùng, Trần Đình Hòa (2025). Đánh giá tác động của các yếu tố động lực đến biến động hình thái cửa Nhật Lệ, tỉnh Quảng Bình. Tạp chí Khoa học và công nghệ thủy lợi, số 89 - tháng 4/2025, trang 2 - 12.

[4] **Vu Dinh Cuong**, Nguyen Thanh Hung, Tran Dinh Hoa (2025). Morphological changes at Nhat Le estuary under hydro-meteorological influence. J. Hydro-Meteorol. 2025, 23, 60-71; doi:10.36335/VNJHM .2025(23), 60-71.

[5] **Vũ Đình Cương**, Nguyễn Thanh Hùng (2025). Nghiên cứu hướng tiếp cận mô phỏng dài hạn diễn biến hình thái cửa sông Nhật Lệ, tỉnh Quảng Bình. Tạp chí Người xây dựng, số 399 tháng 6 - 2025, trang 59 - 65.

----------///----------