

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Dương Công Diễn

**XU THẾ BIẾN ĐỔI BÃI BIỂN VÙNG CỬA ĐẠI, HỘI AN
DƯỚI TÁC ĐỘNG CỦA CÁC YẾU TỐ
THỦY ĐỘNG LỰC HỌC VÀ BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Hà Nội - 2026

BỘ GIÁO DỤC
VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

Dương Công Diễn

**XU THẾ BIẾN ĐỔI BÃI BIỂN VÙNG CỬA ĐẠI, HỘI AN DƯỚI
TÁC ĐỘNG CỦA CÁC YẾU TỐ
THỦY ĐỘNG LỰC HỌC VÀ BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT CHẤT

Ngành: Cơ học chất lỏng và chất khí

Mã số: 9.44.01.08

**Thay mặt tập thể người
hướng dẫn**
(Ký, ghi rõ họ tên)

PGS.TS. Đinh Văn Mạnh

Hà Nội - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: “Xu thế biến đổi bãi biển vùng Cửa Đại - Hội An dưới tác động của các yếu tố thủy động lực học và biến đổi khí hậu” là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể người hướng dẫn. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa và luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học Viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hà Nội, ngày 5 tháng 3 năm 2026

Tác giả luận án

Dương Công Diễn

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên tác giả xin bày tỏ lòng cảm ơn sâu sắc tới PGS.TS Đinh Văn Mạnh và GS.TS Hitoshi Tanaka đã tận tình hướng dẫn tác giả trong suốt quá trình nghiên cứu để hoàn thành luận án.

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn Ban Giám đốc, phòng Đào tạo, khoa Cơ học và tự động hóa, học viện Khoa học và Công nghệ và Viện Cơ học, đã giúp đỡ tạo mọi điều kiện để tác giả hoàn thành luận án này.

Tác giả xin cảm ơn Ban chủ nhiệm đề tài: “Xu thế biến đổi bãi biển vùng Cửa Đại – Hội An dưới tác động của các yếu tố thủy động lực học và biến đổi khí hậu” đã cho phép tác giả là thành viên chính, trực tiếp tham gia nghiên cứu và sử dụng các số liệu của dự án.

Nhân dịp này, tác giả cũng xin được bày tỏ lời cảm ơn sâu sắc tới các nhà khoa học, nhóm cộng tác nghiên cứu, các thầy cô và đồng nghiệp với tình cảm và lòng chân thành đã động viên, dành nhiều thời gian và công sức giúp đỡ và đóng góp những ý kiến quý báu trong suốt quá trình nghiên cứu thực hiện luận án.

Cuối cùng, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn đến gia đình đã quan tâm, động viên, khích lệ, ủng hộ và tạo điều kiện thuận lợi để tác giả yên tâm thực hiện và hoàn thành luận án.

Hà Nội, ngày 5 tháng 3 năm 2026

Tác giả luận án

Dương Công Diễn

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT.....	vii
DANH MỤC BẢNG.....	viii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ.....	1
MỞ ĐẦU 6	
a. Tính cấp thiết của đề tài	6
b. Mục tiêu nghiên cứu.....	7
c. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	8
c.1. Đối tượng nghiên cứu.....	8
c.2. Phạm vi nghiên cứu	8
d. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu.....	9
d.1. Cách tiếp cận	9
d.2. Phương pháp nghiên cứu.....	10
đ. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn.....	10
đ.1. Ý nghĩa khoa học.....	10
đ.2. Ý nghĩa thực tiễn	11
e. Cấu trúc luận án.....	12
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU.....	13
1.1. GIỚI THIỆU CHUNG	13
1.1.1. Tầm quan trọng của dải ven biển và vùng cửa sông	13
1.1.2. Vị trí địa lý và đặc điểm tự nhiên vùng Cửa Đại - Hội An	13
1.2. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU TRÊN THẾ GIỚI.....	14
1.2.1. Nghiên cứu về cơ chế thủy động lực học và vận chuyển bùn cát vùng cửa sông.....	14
1.2.2. Sự phát triển của các công cụ Mô hình toán.....	15
1.2.3. Nghiên cứu về tác động của Biến đổi khí hậu và Can thiệp bởi yếu tố con người	16
1.3. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU TẠI VIỆT NAM VÀ CỬA ĐẠI.....	17
1.3.1. Các nghiên cứu về đặc điểm thủy động lực học dải ven biển miền Trung	17

1.3.2. Lịch sử biến động và diễn biến hình thái khu vực Cửa Đại	18
1.3.3. Các quan điểm khoa học về nguyên nhân gây xói lở	18
1.3.4. Tổng quan về các giải pháp công trình đã áp dụng và đánh giá hiệu quả	19
1.3.5. Nhận định chung về tình hình nghiên cứu trong nước và các vấn đề tồn tại	19
1.4. TỔNG QUAN VỀ KỊCH BẢN BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU ÁP DỤNG CHO KHU VỰC	20
1.4.1. Cơ sở khoa học về Nước biển dâng và các báo cáo đánh giá toàn cầu ..	20
1.4.2. Các kịch bản Biến đổi khí hậu và Nước biển dâng cho Việt Nam.....	21
1.4.3. Kịch bản chi tiết áp dụng cho khu vực Quảng Nam và Cửa Đại	21
1.4.4. Tiếp cận "Nước biển dâng động" và tính cấp thiết của việc tích hợp kịch bản	22
1.4.5. Lựa chọn kịch bản tính toán cho Luận án	22
1.5. KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU VÀ TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI ...	23
1.5.1. Phân tích các khoảng trống nghiên cứu.....	23
1.6. MỤC TIÊU VÀ NỘI DUNG NGHIÊN CỨU	24
1.6.1. Mục tiêu nghiên cứu	24
1.6.2. Đối tượng và Phạm vi nghiên cứu.....	24
KẾT LUẬN CHƯƠNG 1.....	25
CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG BÃI BIỂN, CỬA SÔNG CỬA ĐẠI – HỘI AN BẰNG VIỄN THÁM.....	26
2.1. Số liệu phục vụ nghiên cứu	27
2.1.1. Số liệu ảnh vệ tinh	27
2.1.2. Số liệu địa hình đo đạc	29
2.1.3. Số liệu mực nước.....	30
2.2. Phân tích biến động đường bờ từ ảnh vệ tinh.....	31
2.2.1. Cơ sở phương pháp phân tích biến động đường bờ bằng ảnh vệ tinh...	31
2.2.2. Kết quả phân tích biến động đường bờ khu vực Cửa Đại - Hội An qua các giai đoạn	32
2.2.2.1. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 1973-1987 ..	33
2.2.2.2. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 1988-1998 ..	34

2.2.2.3. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 1998-2008 ..	36
2.2.2.4. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 2008-2017 ..	38
2.2.2.5. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 2018-2023 ..	39
2.3. Giải đoán địa hình đáy biển từ ảnh vệ tinh và dữ liệu đo đạc	42
2.3.1. Phương pháp giải đoán địa hình đáy biển từ ảnh vệ tinh	42
2.3.2. Kết quả giải đoán địa hình đáy biển bằng ảnh vệ tinh và phân tích biến động đáy biển	45
2.3.2.1. Kết quả kiểm định với chuỗi đo đạc tháng 3 năm 2016.....	45
2.3.2.2. Kết quả kiểm định với chuỗi đo đạc tháng 10 năm 2016.....	48
2.3.2.3. Kiểm định với chuỗi đo đạc tháng 3 năm 2017	50
2.3.2.4. Kiểm định với chuỗi đo đạc tháng 9 năm 2018	53
2.3.2.5. Kết quả phân tích biến động bãi biển khu vực Cửa Đại Hội An 55	
2.3.2.6. Biến động hình thái dưới tác động của trận lũ tháng 11 năm 2017	56
2.4. Kết luận Chương 2	56
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG BÃI BIỂN, CỬA SÔNG CỬA ĐẠI – HỘI AN BẰNG MÔ HÌNH SỐ	58
3.1. Số liệu phục vụ nghiên cứu	58
3.1.1. Số liệu phục vụ thiết lập mô hình.....	58
3.1.2. Số liệu phục vụ hiệu chỉnh và kiểm định mô hình	59
3.1.3. Số liệu phân tích điều kiện biên cho mô hình	64
3.2. Cơ sở phương pháp nghiên cứu biến động bãi biển bằng mô hình số DELFT3D.....	64
3.3. Thiết lập mô hình.....	65
3.3.1. Thiết lập vùng tính lưới tính.....	65
3.3.2. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình	67
3.4. Phương pháp mô phỏng biến động hình thái bãi biển dài hạn	76
3.4.1. Phân tích thủy triều hình thái học.....	77
3.4.2. Phân tích lưu lượng sông theo hình thái học	80
3.4.3. Phân tích năng lượng sóng theo hình thái học	82

3.4.4. Tổng hợp nghiên cứu mô phỏng biến động hình thái dài hạn theo phương pháp hình thái học	85
3.5. Kết quả mô phỏng biến động bãi biển, cửa sông khu vực Cửa Đại - Hội An..	86
3.5.1. Kết quả mô phỏng trường thủy động lực học.....	86
3.5.2. Kết quả mô phỏng biến đổi hình thái và đáy biển.....	87
3.6. Kết quả mô phỏng biến động đáy biển, cửa sông khu vực Cửa Đại-Hội An trong điều kiện bản biến đổi khí hậu	89
3.6.1. Các thiết lập kịch bản tính toán nước biển dâng do biến đổi khí hậu	89
3.6.2. Kết quả mô phỏng cho kịch bản R4.5 và R8.5.....	90
3.7. Kết luận Chương 3	94
4.1. Hiện trạng khu vực nghiên cứu	97
4.1.1. Vị trí địa lý, địa hình và địa mạo khu vực nghiên cứu	97
4.1.2. Hiện trạng khu vực cửa sông và bãi biển Cửa Đại, Hội An.....	98
4.2. Mục tiêu giải pháp công trình ổn định cửa sông và bãi biển Cửa Đại, Hội An	104
4.3. Các căn cứ nghiên cứu đề xuất phương án bố trí công trình ổn định cửa sông và bãi biển.....	104
4.4. Phương án bố trí công trình kè mở hàn tại bờ nam cửa sông Thu Bồn.....	106
4.5. Đánh giá hiệu quả kỹ thuật của các phương án bố trí công trình.....	108
4.5.1. Kết quả mô phỏng trường thủy động lực học.....	108
4.5.2. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ	109
4.5.3. Kết quả mô phỏng biến đổi đáy biển.....	112
4.6. Lựa chọn phương án công trình	116
4.7. Kết luận Chương 4	117
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	119
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ.....	121
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	122
PHỤ LỤC 1. Cơ sở lý thuyết mô hình DELFT_WAVE [40].....	1
PHỤ LỤC 2. Cơ sở lý thuyết mô hình DELFT_Flow	11

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

BOA	Bottom of Atmosphere
CEM	Coastal Engineering Manual
CERC	Coastal Engineering Research Center
CN	Công nghệ
DELFT 3D	Mô hình tính nước dâng do bão của Đại học DELFT, Hà Lan
ĐHQG	Đại học Quốc gia
E	East - Hướng đông
ENE	East - Northeast - Hướng đông đông bắc
KHTN&CNQG	Khoa học tự nhiên và Công nghệ Quốc gia
KS	Khách sạn
N	North - Hướng bắc
NCEP	National Centers for Environmental Prediction - Trung tâm dự báo môi trường Quốc gia
NDWI	Normalized Difference Water Index
NE	Northeast - Hướng đông bắc
NIR	Near Infrared
NN và PTNT	Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RMSE	Root Mean Squared Error
S	South - Hướng nam
SE	Southeast - Hướng đông nam
SPM	Shoreline Protection Manual - Sổ tay bảo vệ đường bờ của Hoa Kỳ
SW	Southwest - Hướng tây nam
SWAN	Simulating WAVes Nearshore - Mô hình tính sóng vùng ven bờ
TOA	Top of Atmosphere
UTM	Universal Transverse Mercator

DANH MỤC BẢNG

Bảng 2.1. Số liệu ảnh vệ tinh sử dụng trong nghiên cứu	27
Bảng 2.2. Dữ liệu khảo sát địa hình đáy biển	29
Bảng 3.1. Bảng thống kê cao độ và tọa độ các trạm đo hải văn trong tháng 10/2016 [35].....	60
Bảng 3.2. Bảng thống kê cao độ và tọa độ các trạm đo hải văn trong tháng 3/2017 [35].....	60
Bảng 3.3. Các tham số mô hình sử dụng trong hiệu chỉnh	67
Bảng 3.4. Kết quả hiệu chỉnh độ cao sóng, chu kỳ sóng, hướng sóng mô hình DELFT-WAVE.....	71
Bảng 3.5. Kết quả đánh giá sai số kiểm định mô hình sóng	74
Bảng 3.6. Các tham số mô hình dùng trong hiệu chỉnh.....	74
Bảng 3.7. Bảng kết quả đánh giá sai số kiểm định mô hình	76
Bảng 3.8. Bộ hằng số thủy triều trên biên mô hình cho khu vực Cửa Đại, Hội An (nguồn: Thủy triều toàn cầu TPXO).....	78
Bảng 3.9. Tổng hợp các thành phần thủy triều hình thái cho khu vực Cửa Đại, Hội An.....	79
Bảng 3.10. Các giá trị thống kê lưu lượng trên hệ thống sông Thu Bồn	81
Bảng 3.11. Tần suất sóng nước sâu khu vực biển Cửa Đại, Hội An	83
Bảng 3.12. Các hình thể sóng khí hậu theo mùa tại khu vực nghiên cứu.....	84
Bảng 3.13. Kịch bản nước dâng do biến đổi khí hậu khu vực biển Việt Nam	89
Bảng 3.14. Bảng mặt cắt bãi biển dùng trích xuất dữ liệu	89
Bảng 4.1. Kết quả đánh giá biến động bờ biển khu vực phía Bắc biển Cửa Đại, Hội An thời kỳ 1965-2014 [1]	98
Bảng 4,2, Thông số kê mở hàn được đề xuất cho khu vực bờ nam sông Cửa Đại .	107

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1. Phạm vi khu vực nghiên cứu.....	9
Hình 2.1. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 1973 -1987	33
Hình 2.2. Mức độ biến động đường bờ biển phía bắc và phía nam Cửa Đại giai đoạn 1973-1987	34
Hình 2.3. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 1973-1987	34
Hình 2.4. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 1988-1998	35
Hình 2.5. Mức độ biến động đường bờ biển phía bắc và phía nam Cửa Đại giai đoạn 1988-1998	35
Hình 2.6. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 1988-1998	36
Hình 2.7. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 1998-2008	37
Hình 2.8. Mức độ biến động đường bờ biển phía bắc và phía nam Cửa Đại giai đoạn 1998-2008	37
Hình 2.9. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 1998-2008	38
Hình 2.10. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 2008-2017	38
Hình 2.11. Mức độ biến động đường bờ biển phía bắc và phía nam Cửa Đại giai đoạn 2008-2017	39
Hình 2.12. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 2008-2017	39
Hình 2.13. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 2018-2023	40
Hình 2.14. Mức độ biến động đường bờ biển giai đoạn 2018-2023	40
Hình 2.15. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 2018-2023	41
Hình 2.16. Quan hệ giữa $\ln[nR_w(\text{green})]$ và $\ln[nR_w(\text{blue})]$ [32]	43
Hình 2.17. Sơ đồ các bước giải đoán độ sâu đáy biển từ ảnh vệ tinh Sentinel-2	44
Hình 2.18. Số liệu đo đạc độ sâu khu vực ven biển Cửa Đại - Hội An ngày 8 tháng 3 năm 2016	46
Hình 2.19. Mối quan hệ giữa bằng tần B8 với B2 và B8 với B3	46
Hình 2.20. Quan hệ tuyến tính giữa độ sâu nước và $\ln(B2)/\ln(B3)$	46

Hình 2.21. So sánh độ sâu nước đo đạc và giải đoán tháng 10 năm 2016.....	47
Hình 2.22. Kết quả giải đoán địa hình đáy biển khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn tháng 3 năm 2016.....	47
Hình 2.23. Ảnh vệ tinh và độ sâu nước đo đạc tháng 10 năm 2016	48
Hình 2.24. Mối quan hệ giữa bằng tần B8 với B2 (a) và B8 với B3 (b).....	48
Hình 2.25. Quan hệ tuyến tính giữa độ sâu nước và $\ln(B2)/\ln(B3)$	49
Hình 2.26. So sánh độ sâu nước đo đạc và giải đoán tháng 10 năm 2016.....	49
Hình 2.27. Kết quả giải đoán địa hình đáy biển khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn tháng 10 năm 2016.....	50
Hình 2.28. Hình ảnh khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn và vết đo sâu hồi âm.....	50
Hình 2.29. Mối quan hệ giữa bằng tần B8 với B2 (a) và B8 với B3 (b).....	51
Hình 2.30. Quan hệ tuyến tính giữa độ sâu nước và $\ln(B2)/\ln(B3)$	51
Hình 2.31. So sánh độ sâu nước đo đạc và giải đoán tháng 5 năm 2017.....	52
Hình 2.32. Kết quả giải đoán địa hình đáy biển khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn tháng 5 năm 2017	52
Hình 2.33. Ảnh vệ tinh Sentinel-2 và vết đo sâu hồi âm khu vực cửa sông Thu Bồn ngày 25 tháng 8 năm 2018.....	53
Hình 2.34. Sơ đồ tương quan tỉ lệ $\ln(B)/\ln(G)$ và độ sâu nước.....	54
Hình 2.35. So sánh kết quả giải đoán và đo đạc địa hình đáy biển dọc theo vết đo hồi âm ngày 25 tháng 9 năm 2018.....	54
Hình 2.36. Hình Bản đồ địa hình đáy biển khu vực ven biển Cửa Đại giải đoán từ ảnh Sentinel-2 ngày 25 tháng 9 năm 2018	55
Hình 2.37. Bản đồ biến động bãi biển cửa sông Thu Bồn từ tháng 3 năm 2016 đến tháng 3 năm 2017.....	55
Hình 2.38. Biến động địa hình đáy biển trong giai đoạn trước và sau cơn lũ tháng 11/2017	56
Hình 3.1. Tổng hợp địa hình khu vực biển Hội An	58
Hình 3.2. Vị trí bố trí các trạm đo đạc thủy, hải văn trong khu vực nghiên cứu	59
Hình 3.3. Diễn biến độ cao sóng 02 lần đo, đợt 1 tại hai trạm SMS01 (phía Bắc Cửa Đại), SMS02 (trước cửa sông Cửa Đại) [21].....	61
Hình 3.4. Diễn biến độ cao sóng 02 lần đo, đợt 2 tại hai trạm SMS01 (phía Bắc Cửa Đại), SMS02 (trước cửa sông Cửa Đại) [21].....	62

Hình 3.5. Diễn biến mực nước tại trạm Đồn biên phòng Cửa Đại đo từ ngày 12/1/2016 đến 4/3/2017	63
Hình 3.6. Vị trí lấy mẫu bùn cát đáy [21]	63
Hình 3.7. Thành phần hạt đưa vào mô hình [21]	63
Hình 3.8. Sơ đồ khối quá trình mô phỏng biến đổi địa hình đáy biển trong mô hình DELFT3D.	65
Hình 3.9. Lưới tính và vị trí các trạm đo đặc sóng, dòng chảy.....	66
Hình 3.10. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01	68
Hình 3.11. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01	68
Hình 3.12. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01	68
Hình 3.13. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02	69
Hình 3.14. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02.....	69
Hình 3.15. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02	69
Hình 3.16. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS03	70
Hình 3.17. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS03.....	70
Hình 3.18. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS03	70
Hình 3.19. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01	72
Hình 3.20. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01	72
Hình 3.21. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01	72
Hình 3.22. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02	73
Hình 3.23. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02.....	73
Hình 3.24. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02	73
Hình 3.25. Kết quả kiểm định vận tốc dòng chảy tại trạm SMS01	75
Hình 3.26. Kết quả kiểm định hướng dòng chảy tại trạm SMS01.....	75
Hình 3.27. Kết quả kiểm định vận tốc dòng chảy tại trạm SMS03	75
Hình 3.28. Kết quả kiểm định hướng dòng chảy tại trạm SMS03.....	76
Hình 3.29. Dao động mực nước thủy triều trong trường hợp đầy đủ hằng số (nét liền, màu xanh đậm) và với các hằng số triều hình thái học (nét đứt, màu đỏ).	80
Hình 3.30. Diễn biến lưu lượng tại trạm thủy văn Nông Sơn từ năm 1977-2010	80
Hình 3.31. Sơ đồ diễn biến lưu lượng trung bình ngày trong năm	81
Hình 3.32. Phân bố độ cao sóng theo trung bình ngày (chuỗi số liệu 1995 -2022)..	82

Hình 3.33. Hoa sóng cực đại trong hai mùa: Mùa đông và Mùa hè	83
Hình 3.34. Sơ đồ tổng hợp điều kiện biên mô phỏng biến động hình thái dài hạn theo phương pháp hình thái học	85
Hình 3.35. Trường dòng chảy trong khoảng thời gian lưu lượng cao	86
Hình 3.36. Trường dòng chảy tại khu vực phân kỳ	86
Hình 3.37. Trường dòng chảy trước bãi Cửa Đại	86
Hình 3.38. Biến động địa hình đáy sau 1 năm	87
Hình 3.39. Cao độ đáy biển sau 1 năm	87
Hình 3.40. Biến động địa hình đáy sau 2 năm	87
Hình 3.41. Cao độ đáy biển sau 2 năm	87
Hình 3.42. Biến động địa hình đáy sau 3 năm	87
Hình 3.43. Cao độ đáy biển sau 3 năm	87
Hình 3.44. Biến động địa hình đáy sau 4 năm	88
Hình 3.45. Cao độ đáy biển sau 4 năm	88
Hình 3.46. Biến động địa hình đáy sau 5 năm	88
Hình 3.47. Cao độ đáy biển sau 5 năm	88
Hình 3.51. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 01 (Bãi biển Tân Mỹ)	90
Hình 3.52. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 02 (Bãi biển Cửa Đại).....	91
Hình 3.53. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 03 (Bãi biển KS Gold Sand)	91
Hình 3.54. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 04 (Bãi biển KS Sunrise)	92
Hình 3.55. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 05 (Bãi biển KS Vinpearl)	92
Hình 3.56. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 06 (Bờ sông phía bắc Cửa Đại)	93
Hình 3.57. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 06 (Mặt cắt trung tâm sông Cửa Đại)	93
Hình 3.58. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 06 (Bờ sông phía nam Cửa Đại)	94
Hình 4.1. Hình ảnh khu vực biển Cửa Đại – Hội An.....	97

Hình 4.2. Bãi biển Cửa Đại, Hội An biến động theo mùa [26].....	99
Hình 4.3. Biến đổi bãi biển khi có các công trình xây dựng ven bờ [37] [38]	99
Hình 4.4. Công trình bảo vệ bờ không phát huy hiệu quả trong bão [26]	100
Hình 4.5. Khu vực bờ sông bị xói lở.....	101
Hình 4.6. Đê ngầm chắn sóng tại bãi biển Cửa Đại [39]	102
Hình 4.7. Hình ảnh các giải pháp công trình bảo vệ bờ biển phía Bắc Cửa Đại [27].....	103
Hình 4.8. Sự dịch chuyển cồn cát trước cửa sông Cửa Đại từ năm 1965 đến 2017	105
Hình 4.9. Phương án đề xuất bố trí kè mỏ hàn tại khu vực bờ phía nam sông Cửa Đại.....	107
Hình 4.10. Trường dòng vận tốc dòng chảy trong lũ.....	108
Hình 4.11. Trường dòng vận tốc dòng chảy dưới tác động của sóng	108
Hình 4.12. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 1 năm	109
Hình 4.13. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 2 năm	109
Hình 4.14. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 3 năm	109
Hình 4.15. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 4 năm	110
Hình 4.16. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 5 năm	110
Hình 4.17. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 6 năm	110
Hình 4.18. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 7 năm	111
Hình 4.19. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 8 năm	111
Hình 4.20. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 9 năm	111
Hình 4.21. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 10 năm	112
Hình 4.22. Diễn biến địa hình đáy biển sau 1 năm	113
Hình 4.23. Diễn biến địa hình đáy biển sau 2 năm	113
Hình 4.24. Diễn biến địa hình đáy biển sau 3 năm	113
Hình 4.25. Diễn biến địa hình đáy biển sau 4 năm	114
Hình 4.26. Diễn biến địa hình đáy biển sau 5 năm	114
Hình 4.27. Diễn biến địa hình đáy biển sau 6 năm	114
Hình 4.28. Diễn biến địa hình đáy biển sau 7 năm	115
Hình 4.29. Diễn biến địa hình đáy biển sau 8 năm	115
Hình 4.30. Diễn biến địa hình đáy biển sau 9 năm	115

MỞ ĐẦU

a. Tính cấp thiết của đề tài

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và áp lực phát triển kinh tế - xã hội ngày càng gia tăng, vấn đề ổn định vùng bờ biển và cửa sông đang trở thành thách thức lớn trên phạm vi toàn cầu. Tại Việt Nam, dải ven biển miền Trung với đặc thù địa hình dốc, chế độ thủy động lực phức tạp và chịu ảnh hưởng trực tiếp của bão lũ, là khu vực nhạy cảm và dễ bị tổn thương nhất. Điển hình trong số đó là khu vực cửa sông Cửa Đại và bãi biển Hội An (tỉnh Quảng Nam) – một hệ thống tự nhiên có giá trị đặc biệt quan trọng cả về mặt sinh thái, kinh tế và văn hóa.

Về mặt địa lý và kinh tế, biển Cửa Đại nằm ở vị trí chiến lược phía Đông thành phố Hội An, là cửa ngõ thoát lũ của hệ thống sông Thu Bồn – vu gia, một trong những lưu vực sông lớn nhất Việt Nam, đồng thời là nơi hội tụ của ba dòng sông chính: Thu Bồn, Trường Giang và Đé Võng. Với vị trí chỉ cách trung tâm di sản văn hóa thế giới Hội An khoảng 5 km và thành phố Đà Nẵng 30 km, Cửa Đại từng được tạp chí du lịch quốc tế bình chọn là một trong 25 bãi biển đẹp nhất Châu Á. Vẻ đẹp hoang sơ với bãi cát trắng mịn trải dài và hệ sinh thái ven biển trù phú đã biến nơi đây thành "thời nam châm" thu hút du lịch, đóng góp tỷ trọng lớn vào nguồn thu ngân sách của tỉnh Quảng Nam, đồng thời là sinh kế của hàng nghìn hộ dân ven biển thông qua các hoạt động du lịch và đánh bắt thủy hải sản. Khu vực Cửa Đại, Hội An đóng vai trò là 'nút thắt' động lực quan trọng bậc nhất trong hệ thống sông Vu Gia - Thu Bồn, nơi diễn ra sự tương tác phức tạp giữa dòng chảy sông, chế độ sóng gió mùa và tác động che chắn đặc thù của hệ thống đảo Cù Lao Chàm,. Mặc dù sở hữu vị thế chiến lược về kinh tế - du lịch và di sản văn hóa, khu vực này đang đối mặt với tình trạng mất cân bằng bùn cát nghiêm trọng chưa từng có.

Số liệu quan trắc và phân tích viễn thám cho thấy, đường bờ biển khu vực phía Bắc Cửa Đại đã bị xói lở dữ dội, với đường bờ lùi sâu vào đất liền từ 300m đến 500m trong giai đoạn nghiên cứu. Đặc biệt, sự xuất hiện và biến mất liên tục của các đảo cát (năm 1988 và 2018) ngay tại cửa sông, là minh chứng cho sự bất ổn định cực đại của chế độ thủy thạch động lực học nơi đây.

Thực tế cho thấy, các giải pháp công trình bảo vệ bờ cục bộ (kè cứng, đê ngầm, túi địa kỹ thuật) đã được triển khai nhưng hiệu quả còn hạn chế, thậm chí bị phá hủy trong bão do chưa giải quyết được gốc rễ vấn đề là sự thiếu hụt và phân bố lại nguồn bùn cát từ thượng nguồn,. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu với mực nước biển dâng dự báo có thể đạt tới 55cm (kịch bản RCP4.5) hoặc 77cm (kịch bản RCP8.5) vào cuối thế kỷ, việc nghiên cứu cơ chế vận chuyển bùn cát và đề xuất giải pháp ổn định bền

vững dựa trên sự hiểu biết sâu sắc về thêm cát cửa sông là yêu cầu cấp thiết về mặt khoa học và thực tiễn."

Xuất phát từ những vấn đề nêu trên, việc lựa chọn đề tài luận án “Xu thế biến đổi bãi biển vùng Cửa Đại - Hội An dưới tác động của các yếu tố thủy động lực học và biến đổi khí hậu” sẽ đóng góp một phần vào việc làm rõ cơ chế vận chuyển bùn cát dưới các tác động của điều kiện tự nhiên, trên cơ sở đó định hướng các giải pháp ổn định cửa sông và khắc phục tình trạng xói lở tại các bãi biển lân cận. Kết quả của luận án là tài liệu tham khảo cho công tác quy hoạch nhằm ổn định bờ bãi biển để phục vụ phát triển kinh tế - xã hội trong tương lai.

b. Mục tiêu nghiên cứu

- Mục tiêu tổng quát: Xác định, làm rõ cơ chế thủy động lực học và quy luật vận chuyển bùn cát chi phối quá trình biến đổi hình thái vùng cửa sông và ven biển Cửa Đại - Hội An; từ đó dự báo xu thế biến đổi trong tương lai và đề xuất các giải pháp kỹ thuật chỉnh trị hợp lý nhằm ổn định cửa sông, bảo vệ bãi biển, phục vụ phát triển kinh tế - xã hội bền vững.

- Mục tiêu cụ thể Để đạt được mục tiêu tổng quát, luận án tập trung thực hiện các mục tiêu cụ thể sau:

Thứ nhất: Đánh giá toàn diện hiện trạng và tái hiện lại xu thế biến động đường bờ, địa hình đáy biển khu vực Cửa Đại - Hội An trong quá khứ (từ năm 1973 đến nay) thông qua việc tích hợp đa nguồn dữ liệu: số liệu đo đạc thực địa, bản đồ địa hình các thời kỳ và chuỗi ảnh viễn thám đa thời gian. Mục tiêu này nhằm nhận diện các chu kỳ biến động và các "điểm nóng" xói lở.

Thứ hai: Phân tích vai trò và mức độ tác động của các yếu tố động lực chủ đạo (dòng chảy sông, sóng, thủy triều, nước dâng) đến quá trình vận chuyển, phân bố lại bùn cát tại khu vực cửa sông và dải ven bờ. Đặc biệt làm rõ cơ chế tương tác sông - biển và vai trò chắn sóng của Cù Lao Chàm.

Thứ ba: Thiết lập và ứng dụng thành công hệ thống mô hình số trị hiện đại Delft3D có độ tin cậy cao, đã được hiệu chỉnh và kiểm định kỹ lưỡng, để mô phỏng trường thủy động lực và diễn biến hình thái đáy biển.

Thứ tư: Dự báo xu thế biến đổi hình thái bãi biển và cửa sông đến năm 2050 và 2100 dưới các kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng (theo các kịch bản RCP 4.5 và RCP 8.5) nhằm cung cấp tầm nhìn dài hạn cho công tác quy hoạch.

Thứ năm: Đề xuất định hướng các giải pháp kỹ thuật công trình chỉnh trị tại khu vực cửa sông nhằm giảm thiểu xói lở, ổn định luồng lạch cửa sông và điều tiết lượng phân phối bùn cát từ sông cho các bãi biển lân cận (bãi biển phía bắc và phía nam) một cách bền vững, hài hòa với cảnh quan du lịch.

c. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

c.1. Đối tượng nghiên cứu

Luận án tập trung nghiên cứu các đối tượng sau:

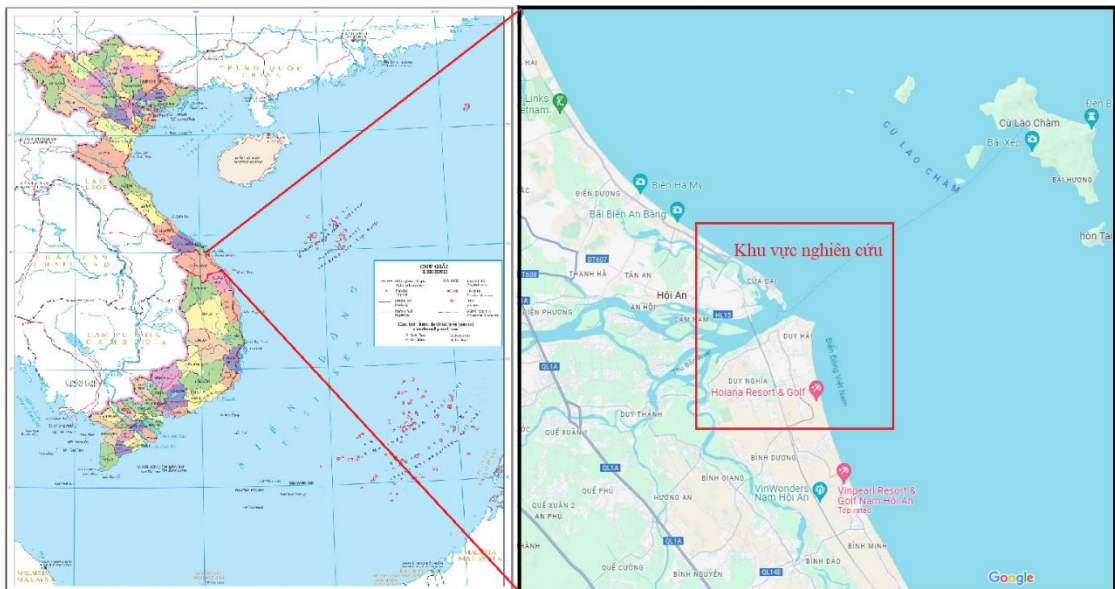
Các quá trình thủy động lực học: Chế độ dòng chảy sông Thu Bồn, chế độ sóng, thủy triều, nước dâng.

Quá trình vận chuyển trầm tích: Cơ chế vận chuyển bùn cát dọc bờ và ngang bờ, cân bằng bùn cát vùng cửa sông.

Biến động hình thái: Sự thay đổi đường bờ biển, biến đổi địa hình đáy biển, sự hình thành và dịch chuyển của các cồn cát ngầm và nổi.

c.2. Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi không gian: Khu vực nghiên cứu trọng điểm bao gồm cửa sông Cửa Đại và dải bờ biển lân cận mở rộng về hai phía Bắc và Nam, mỗi phía khoảng 10 km (từ bãi biển An Bàng phía Bắc đến khu vực Duy Hải phía Nam). Về phía biển, phạm vi nghiên cứu mở rộng ra đến độ sâu trên 20 m hoặc ranh giới tác động của dòng chảy sông, bao gồm cả khu vực ảnh hưởng của đảo Cù Lao Chàm. Về phía sông, giới hạn đến vùng ảnh hưởng của thủy triều và xâm nhập mặn (cầu Câu Lâu). Hình 1 là sơ đồ phạm vi nghiên cứu.



Hình 1. Phạm vi khu vực nghiên cứu

d. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

d.1. Cách tiếp cận

Cách tiếp cận Luận án sử dụng cách tiếp cận hệ thống và tích hợp đa ngành. Vấn đề xói lở Cửa Đại không được xem xét như một hiện tượng đơn lẻ mà được đặt trong mối quan hệ tương tác tổng thể của hệ thống lưu vực sông - cửa sông - bờ biển.

Tiếp cận từ dữ liệu thực đo đến mô hình: Kết hợp chặt chẽ giữa phân tích số liệu đo đạc tại hiện trường, dữ liệu viễn thám để hiểu bản chất vật lý, từ đó xây dựng và kiểm chứng mô hình toán.

Tiếp cận kế thừa và phát triển: Kế thừa có chọn lọc các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước, đồng thời áp dụng các công nghệ mới (viễn thám, mô hình 3D, liên kết mô hình) để giải quyết các hạn chế của nghiên cứu trước.

Tiếp cận kịch bản: Đánh giá rủi ro dựa trên các kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng theo quy chuẩn quốc tế và Việt Nam.

d.2. Phương pháp nghiên cứu

Để giải quyết các nhiệm vụ đặt ra, luận án phối hợp sử dụng các phương pháp nghiên cứu chủ đạo sau:

Phương pháp thu thập và tổng hợp tài liệu: Thu thập các dữ liệu khí tượng thủy văn, hải văn, bản đồ địa hình, địa chất, quy hoạch phát triển kinh tế - xã hội từ các nguồn chính thống và các đề tài dự án liên quan.

Phương pháp viễn thám và GIS: Sử dụng chuỗi ảnh vệ tinh đa thời gian (Landsat, Sentinel) kết hợp với các thuật toán chiết xuất đường bờ (như chỉ số NDWI) và công cụ GIS để phân tích biến động đường bờ biển định lượng qua các giai đoạn lịch sử (1973-2023), xác định tốc độ xói lở/bồi tụ.

Phương pháp phân tích thống kê: Xử lý chuỗi số liệu thủy hải văn nhiều năm để xác định các đặc trưng sóng, gió, dòng chảy thiết kế và các điều kiện biên cho mô hình.

Phương pháp mô hình hóa: Đây là phương pháp nòng cốt của luận án. Sử dụng bộ phần mềm mô hình số trị tiên tiến (như Delft3D) để thiết lập các module:

Module dòng chảy (FLOW): Mô phỏng chế độ thủy lực, dòng chảy do sông và triều.

Module sóng (WAVE): Mô phỏng quá trình truyền sóng, biến dạng sóng từ ngoài khơi vào bờ.

Module vận chuyển bùn cát và biến đổi đáy (MORPH): Tính toán vận chuyển trầm tích và diễn biến hình thái đáy dưới tác động tương tác sóng - dòng chảy.

Phương pháp chuyên gia và đánh giá hiệu quả: Tham vấn ý kiến các chuyên gia đầu ngành để lựa chọn giải pháp kỹ thuật và đánh giá hiệu quả, tính khả thi của các giải pháp đề xuất trên mô hình trước khi đưa ra khuyến nghị thực tế.

đ. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

đ.1. Ý nghĩa khoa học

Luận án đóng góp vào cơ sở lý luận về sự ổn định của các cửa sông chịu tác động che chắn của đảo. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra cơ chế vật lý: khi cửa sông dịch chuyển vào sâu trong vùng khuất sóng (shadow zone) do đảo Cù Lao Chàm tạo ra, năng lượng sóng không đủ lớn để vận chuyển bùn cát từ thềm cát vào bồi đắp cho bờ

biển, dẫn đến xói lở bờ phía Bắc. Đây là phát hiện quan trọng giải thích cho thất bại của các giải pháp bảo vệ bờ cục bộ trước đây.

Bên cạnh đó, luận án cũng xây dựng thành công quy trình ứng dụng phương pháp giải đoán địa hình đáy biển từ ảnh vệ tinh kết hợp số liệu đo đạc (tỷ lệ logarit các kênh phổ), cung cấp một công cụ hiệu quả để giám sát biến động độ sâu vùng ven bờ miền Trung nơi dữ liệu đo đạc trực tiếp thường xuyên bị thiếu hụt.

Áp dụng kỹ thuật 'Hệ số tăng tốc hình thái' (Morphological Acceleration Factor - Morfac) kết hợp với phương pháp tổng hợp thủy triều và sóng khí hậu đại diện,. Kỹ thuật này cho phép mô phỏng diễn biến hình thái trong dài hạn (từ 5 đến 10 năm) dựa trên các tính toán thủy động lực học ngắn hạn, giúp giải quyết bài toán dự báo xu thế biến đổi bờ biển dưới tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu một cách hiệu quả và chính xác.

đ.2. Ý nghĩa thực tiễn

Cung cấp công cụ giám sát chi phí thấp cho công tác quản lý đới bờ: Luận án đã xây dựng và kiểm chứng thành công quy trình giải đoán địa hình đáy biển từ ảnh vệ tinh (Sentinel-2) kết hợp với số liệu đo đạc hạn chế,. Kết quả này cung cấp cho chính quyền địa phương và các đơn vị quản lý một công cụ hiệu quả, chi phí thấp để giám sát liên tục biến động của các bãi ngầm và thềm cát cửa sông – những khu vực khó tiếp cận đo đạc thường xuyên nhưng lại đóng vai trò quyết định đến sự ổn định của bãi biển.

Đề xuất giải pháp kỹ thuật chỉnh trị "mềm" thay thế cho các công trình "cứng": Kết quả nghiên cứu là cơ sở thực tiễn để chuyển đổi tư duy chống xói lở từ "phòng vệ thụ động" (xây kè cứng, đê ngầm bảo vệ bờ cục bộ gây mất mỹ quan du lịch) sang "chỉnh trị chủ động",. Cụ thể, giải pháp hệ thống kè mở hàn nấn dòng chảy được đề xuất trong luận án giúp đưa thềm cát ra khỏi "vùng khuất sóng" của đảo Cù Lao Chàm, tái lập cơ chế phân phối bùn cát tự nhiên về phía Bắc,. Đây là luận cứ khoa học quan trọng để thiết kế các công trình chỉnh trị cửa sông Thu Bồn trong tương lai, đảm bảo mục tiêu kép: vừa ổn định bờ sông phía Nam, vừa nuôi dưỡng bãi biển Cửa Đại một cách bền vững.

Cơ sở khoa học cho quy hoạch không gian biển thích ứng với biến đổi khí hậu: Bộ bản đồ dự báo biến đổi đường bờ đến năm 2050 và 2100 theo các kịch bản RCP4.5 và RCP8.5, cung cấp dữ liệu đầu vào quan trọng cho công tác quy hoạch không gian biển và xây dựng hành lang bảo vệ bờ biển tỉnh Quảng Nam. Các kết quả này giúp các nhà hoạch định chính sách xác định được chỉ giới xây dựng an toàn cho các khu

ngỉ dưỡng, giảm thiểu rủi ro kinh tế - xã hội do tác động cộng hưởng của bão, lũ và nước biển dâng.

e. Cấu trúc luận án

Ngoài phần Mở đầu, Kết luận và Kiến nghị, Danh mục tài liệu tham khảo và Phụ lục, nội dung chính của luận án được kết cấu thành 4 chương như sau:

Chương 1: Tổng quan nghiên cứu. Trình bày tổng quan các vấn đề lý thuyết, các nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến xói lở bồi tụ cửa sông, các đặc điểm tự nhiên của khu vực nghiên cứu Cửa Đại – Hội An.

Chương 2: Nghiên cứu biến động bãi biển, cửa sông Cửa Đại – Hội An bằng viễn thám. Trình bày phương pháp và kết quả phân tích biến động đường bờ, địa hình đáy biển thông qua chuỗi ảnh vệ tinh và số liệu đo đạc.

Chương 3: Nghiên cứu biến động bãi biển, cửa sông Cửa Đại – Hội An bằng mô hình số. Trình bày việc thiết lập, kiểm định mô hình thủy động lực học và hình thái; kết quả mô phỏng chế độ dòng chảy, sóng, vận chuyển bùn cát và biến đổi địa hình trong các điều kiện hiện trạng và kịch bản biến đổi khí hậu.

Chương 4: Nghiên cứu đề xuất giải pháp kỹ thuật ổn định cửa sông và bãi biển Cửa Đại, Hội An. Đề xuất các phương án công trình chỉnh trị, mô phỏng đánh giá hiệu quả của các phương án và kiến nghị giải pháp tối ưu nhằm giảm thiểu xói lở và ổn định cửa sông

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

1.1. GIỚI THIỆU CHUNG

1.1.1. Tầm quan trọng của dải ven biển và vùng cửa sông

Vùng cửa sông và dải ven biển được xác định là khu vực chuyển tiếp sinh thái - động lực quan trọng nhất trên bề mặt Trái Đất, nơi diễn ra sự tương tác phức tạp giữa thạch quyển, thủy quyển và khí quyển [1]. Về mặt kinh tế - xã hội, đây là khu vực phát triển năng động nhất, nơi cư trú của hơn 60% dân số thế giới và tập trung các đô thị lớn [2],[3]. Tuy nhiên, xét dưới góc độ động lực học, vùng cửa sông là hệ thống rất nhạy cảm và dễ bị tổn thương, luôn có xu hướng tự điều chỉnh để đạt trạng thái cân bằng động dưới tác động của các yếu tố ngoại sinh [4].

Trong những thập kỷ gần đây, sự ổn định hình thái của các vùng cửa sông trên thế giới đang bị đe dọa nghiêm trọng bởi tác động kép: sự biến đổi của các quá trình tự nhiên và sự can thiệp của con người.

Thứ nhất, về phía lục địa, việc xây dựng các đập thủy điện và hồ chứa thượng nguồn đã làm suy giảm đáng kể lượng bùn cát vận chuyển ra biển, gây ra hiện tượng "đói trầm tích" tại nhiều hệ thống châu thổ lớn [5], [6].

Thứ hai, từ phía biển, Biến đổi khí hậu dẫn đến nước biển dâng và sự gia tăng cường độ bão, làm thay đổi trường năng lượng sóng và dòng chảy ven bờ, từ đó phá vỡ cân bằng trầm tích tự nhiên [7], [3].

Tại Việt Nam, với chiều dài đường bờ biển hơn 3.260 km, vấn đề xói lở và bồi tụ vùng cửa sông đang diễn ra với quy mô và cường độ ngày càng gay gắt, đặc biệt là tại khu vực miền Trung – nơi có độ dốc lưu vực lớn và dải đồng bằng ven biển hẹp [8]. Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng, dải ven biển miền Trung đang chịu áp lực lớn từ sự thay đổi chế độ thủy văn dòng chảy sông do thủy điện và sự gia tăng tần suất các hiện tượng thời tiết cực đoan [9], [10]. Do đó, việc nghiên cứu cơ chế diễn biến hình thái vùng cửa sông không chỉ dừng lại ở bài toán mô tả hiện trạng, mà đòi hỏi một cách tiếp cận tổng hợp, định lượng các tương tác đa chiều giữa thủy động lực học, vận chuyển bùn cát và các kích bản biến đổi khí hậu.

1.1.2. Vị trí địa lý và đặc điểm tự nhiên vùng Cửa Đại - Hội An

Khu vực nghiên cứu trọng tâm của luận án là vùng biển Cửa Đại và dải bờ biển lân cận thuộc thành phố Hội An, tỉnh Quảng Nam. Cửa Đại là cửa ngõ chính đổ ra Biển Đông của hệ thống sông Vu Gia - Thu Bồn – một trong những hệ thống sông lớn nhất miền Trung Việt Nam với diện tích lưu vực khoảng 10.350 km² [11].

Về vị trí địa lý, khu vực này có ý nghĩa chiến lược đặc biệt quan trọng:

- Về kinh tế - văn hóa: Nằm kế cận Di sản Văn hóa Thế giới Phố cổ Hội An và Khu dự trữ sinh quyển thế giới Cù Lao Chàm. Dải bờ biển Cửa Đại đóng vai trò là "tấm khiên" bảo vệ cấu trúc địa mạo của đô thị cổ Hội An trước tác động của biển, đồng thời là tài nguyên du lịch cốt lõi của tỉnh Quảng Nam [12].

- Về đặc điểm động lực: Đây là khu vực có chế độ thủy động lực học cực kỳ phức tạp. Cửa Đại chịu sự chi phối mạnh mẽ của chế độ gió mùa: gió mùa Đông Bắc (tháng 10 - tháng 3 năm sau) gây ra sóng lớn và dòng chảy dọc bờ mạnh hướng Bắc - Nam; gió mùa Tây Nam (tháng 5 - tháng 9) có cường độ yếu hơn [13]. Bên cạnh đó, quá trình tương tác sông - biển tại đây còn chịu ảnh hưởng của chế độ bán nhật triều không đều và dòng chảy lũ từ thượng nguồn.

Mâu thuẫn lớn nhất hiện nay tại Cửa Đại là sự xung đột giữa yêu cầu phát triển bền vững và thực trạng xói lở nghiêm trọng. Từ đầu những năm 2000 đến nay, bờ biển Cửa Đại đã bị xói lở dữ dội, đường bờ biển lùi sâu vào đất liền từ 150m đến 200m tại một số vị trí trọng yếu, phá hủy nhiều công trình hạ tầng du lịch và đe dọa sinh kế người dân [14], [15]. Mặc dù nhiều giải pháp công trình (kè cứng, kè mềm, nuôi bãi) đã được triển khai, nhưng tình trạng xói lở vẫn diễn biến phức tạp và có xu hướng lan truyền sang các khu vực lân cận (như bãi biển An Bàng về phía Bắc).

Thực trạng này đặt ra một vấn đề khoa học cấp thiết: Sự biến đổi hình thái Cửa Đại có phải chỉ là hiện tượng cục bộ, hay là hệ quả tất yếu của sự mất cân bằng trong cán cân bùn cát toàn lưu vực dưới tác động của BĐKH và thủy điện thượng nguồn? Để trả lời câu hỏi này, cần thiết lập một khung nghiên cứu định lượng dựa trên mô hình toán hiện đại, xem xét đầy đủ các yếu tố thủy động lực học trong mối liên kết Vùng - Cửa sông - Biển ven bờ.

1.2. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU TRÊN THẾ GIỚI

Việc nghiên cứu diễn biến hình thái vùng cửa sông và dải ven biển đã trải qua một quá trình phát triển lâu dài, gắn liền với sự tiến bộ của cơ học chất lỏng, công nghệ đo đạc và năng lực tính toán. Trên thế giới, các hướng nghiên cứu chính tập trung vào ba trụ cột: (i) Cơ chế vật lý của tương tác sóng - dòng chảy - bùn cát; (ii) Phát triển các mô hình toán mô phỏng; và (iii) Đánh giá tác động của biến đổi khí hậu và can thiệp nhân sinh.

1.2.1. Nghiên cứu về cơ chế thủy động lực học và vận chuyển bùn cát vùng cửa sông

Vùng cửa sông được đặc trưng bởi sự tương tác phức tạp giữa các yếu tố động lực biển (sóng, triều) và động lực sông. Các nghiên cứu kinh điển đã thiết lập nền tảng lý thuyết vững chắc cho các quá trình này.

Về lý thuyết sóng và dòng chảy ven bờ:

Nghiên cứu mang tính đột phá của Longuet-Higgins và Stewart (1964) [16] về khái niệm "ứng suất bức xạ" đã đặt nền móng cho việc giải thích cơ chế sinh ra dòng chảy dọc bờ và sự dâng nước do sóng trong vùng sóng vỡ. Theo đó, sự biến đổi động lượng của sóng khi truyền vào vùng nước nông tạo ra một lực dư, đóng vai trò là động lực chính thúc đẩy dòng chảy ven bờ và vận chuyển bùn cát [17].

Tuy nhiên, các lý thuyết ban đầu thường giả định dòng chảy là dừng và đồng nhất theo độ sâu. Trong thực tế tại các vùng cửa sông, sự phân tầng tỷ trọng (do sự hòa trộn nước mặn - ngọt) tạo ra cấu trúc dòng chảy ba chiều (3D) phức tạp. Các nghiên cứu của Dyer (1997) [18] và Geyer & MacCready (2014) [19] đã chỉ ra rằng, hoàn lưu hấp dẫn và dòng chảy thứ cấp (secondary flow) đóng vai trò quyết định trong việc giữ trầm tích mịn lại trong vùng cửa sông, tạo nên vùng cực đại đục.

Về tương tác Sóng - Dòng chảy:

Đây là một trong những chủ đề thách thức nhất trong thủy lực học ven bờ. Khi sóng truyền trên nền dòng chảy (ví dụ: sóng lừng truyền ngược dòng chảy lũ từ sông ra), các thông số sóng (chiều cao, bước sóng) sẽ bị biến đổi đáng kể do hiệu ứng Doppler và sự thay đổi độ nhám đáy biểu kiến [20].

Nghiên cứu của Soulsby (1997) [21] và Fredsøe & Deigaard (1992) [22] đã chứng minh rằng: sự hiện diện của sóng làm gia tăng ứng suất cắt đáy lên gấp nhiều

lần so với trường hợp chỉ có dòng chảy, dẫn đến việc kích hoạt bùn cát đáy dễ dàng hơn. Sau khi bùn cát được khuấy động lên cột nước, dòng chảy sẽ đóng vai trò là tác nhân vận chuyển.

Nhận định: Các kết quả nghiên cứu này chỉ ra rằng, nếu bỏ qua tương tác Sóng - Dòng chảy trong tính toán (chỉ cộng gộp tuyến tính), sai số trong ước tính lượng vận chuyển bùn cát có thể lên tới 50-100%. Đây là cơ sở lý luận quan trọng để luận án lựa chọn phương pháp mô hình liên kết thay vì các mô hình đơn lẻ.

Về cơ chế vận chuyển bùn cát dọc bờ và ngang bờ:

Vận chuyển dọc bờ: Công thức CERC (1984) [23] và các biến thể của Kamphuis (1991)[24] đã được áp dụng rộng rãi để ước tính tổng lượng bùn cát di chuyển dọc bờ dựa trên năng lượng sóng. Tuy nhiên, các công thức thực nghiệm này thường kém chính xác tại các vùng cửa sông có địa hình phức tạp và nguồn cấp trầm tích biến động.

Vận chuyển ngang bờ: Các nghiên cứu của Roelvink & Stive (1989) [25] tập trung vào sự hình thành đê cát ngầm và sự dịch chuyển của đường bờ trong bão. Cơ chế dòng chảy hoàn lưu được xác định là nguyên nhân chính kéo cát từ bãi ra khơi trong điều kiện sóng lớn [26].

1.2.2. Sự phát triển của các công cụ Mô hình toán

Sự phát triển của khoa học máy tính đã chuyển dịch trọng tâm nghiên cứu từ các mô hình vật lý sang các mô hình toán. Quá trình này có thể chia thành các giai đoạn phát triển từ 2D đến 3D và từ lưới cấu trúc sang lưới phi cấu trúc.

Giai đoạn phát triển các mô hình 2D (Depth-averaged Models):

Trong thập kỷ 1980-1990, các mô hình thủy lực 2D trung bình theo độ sâu như MIKE 21 (DHI), TELEMAC-2D, DELFT3D-FLOW trở thành công cụ tiêu chuẩn. Các mô hình này giải hệ phương trình Saint-Venant (hoặc Nước nông - Shallow Water Equations), giả thiết vận tốc phân bố đều hoặc theo quy luật logarit theo phương đứng.

Ưu điểm của mô hình 2D là tốc độ tính toán nhanh, phù hợp cho quy mô vùng. Tuy nhiên, hạn chế lớn nhất là không mô phỏng được dòng chảy xoắn ốc tại các đoạn sông cong và sự phân tầng mặn - ngọt tại cửa sông [27]. Đối với vùng Cửa Đại, nơi có địa hình đáy thay đổi đột ngột từ sông ra biển, việc sử dụng mô hình 2D có thể không phản ánh đúng trường ứng suất đáy thực tế.

Sự chuyển dịch sang mô hình 3D và Lưới phi cấu trúc:

Từ những năm 2000, xu hướng nghiên cứu chuyển mạnh sang các mô hình 3 chiều (3D) giải hệ phương trình Navier-Stokes trung bình Reynolds (RANS).

Về phương pháp số: Sự ra đời của phương pháp Phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM) và Thể tích hữu hạn (Finite Volume Method - FVM) trên lưới phi cấu trúc (Flexible Mesh - FM) là một bước tiến lớn. Các mô hình như MIKE 3 FM hay FVCOM cho phép tăng mật độ lưới tại các khu vực quan trọng (cửa sông, công trình kè) và giảm mật độ ở ngoài khơi, giải quyết bài toán tối ưu hóa giữa độ chính xác và thời gian tính toán [28], [29].

Về mô hình khép kín rối: Trong các mô hình 3D, việc xác định độ nhớt xoáy là then chốt. Các nghiên cứu hiện đại thường sử dụng mô hình rối k-epsilon hoặc Smagorinsky để mô phỏng sự khuếch tán động lượng theo phương đứng và phương ngang [30]. Như đã đề cập trong lý thuyết thủy lực hiện đại (và cũng là phương pháp luận án sẽ áp dụng), các tensor ứng suất Reynolds và độ nhớt rối ngang không còn là

hằng số mà biến đổi theo không gian và thời gian, phụ thuộc vào năng lượng rối và tốc độ tiêu tán rối.

Mô hình hình thái:

Sự tích hợp giữa Mô hình Thủy động lực, Mô hình Sóng phổ và Mô hình Vận chuyển bùn cát tạo nên các hệ thống mô phỏng hình thái động.

Diễn hình là khái niệm "Morphological Acceleration Factor" (Hệ số tăng tốc hình thái) được đề xuất bởi Roelvink (2006) [31], cho phép mô phỏng diễn biến đáy biển trong thời gian dài (vài chục năm) bằng cách nhân tốc độ biến đổi đáy với một hệ số tỷ lệ, giúp giải quyết bài toán dự báo dài hạn. Các phần mềm như DELFT3D, MIKE 21/3 Coupled Model FM hiện nay đã cho phép mô phỏng tương tác hai chiều: dòng chảy làm thay đổi địa hình đáy, và địa hình đáy mới quay ngược lại tác động lên trường dòng chảy [28].

1.2.3. Nghiên cứu về tác động của Biến đổi khí hậu và Can thiệp bởi yếu tố con người

Tác động của Biến đổi khí hậu và Nước biển dâng:

Cách tiếp cận truyền thống trong việc đánh giá tác động của nước biển dâng là sử dụng Quy tắc Bruun (Bruun Rule, 1962) [32]. Quy tắc này giả định rằng khi mực nước biển dâng lên, trầm tích bãi biển sẽ tịnh tiến vào bờ và nâng cao lên để giữ nguyên dạng hình học cân bằng, với nguồn cát lấy từ việc xói lở phần bãi cao.

Mặc dù đơn giản và dễ áp dụng, Quy tắc Bruun đã vấp phải nhiều chỉ trích trong các nghiên cứu gần đây [33], [34] do:

Chỉ xét cân bằng ngang bờ (2D), bỏ qua vận chuyển dọc bờ.

Không xét đến nguồn bùn cát từ sông hoặc sự mất mát bùn cát ra biển sâu.

Không áp dụng được cho các vùng cửa sông có địa hình phức tạp hoặc có công trình bảo vệ.

Các nghiên cứu hiện đại của IPCC (2021) và các nhóm nghiên cứu hàng đầu (như Deltares, UNESCO-IHE) đề xuất hướng tiếp cận “Mô hình dựa trên quá trình”. Theo đó, tác động của BĐKH không chỉ là sự dâng lên tĩnh của mực nước, mà là sự thay đổi của cả hệ thống động lực: bão mạnh hơn gây ra nước dâng do bão (storm surge) cao hơn, sóng lớn hơn thâm nhập sâu vào cửa sông, làm thay đổi điểm vỡ sóng và vùng hoạt động của bùn cát [35].

Nghiên cứu của Hinkel et al. (2014) [36] và Vousdoukas et al. (2018) [37] trên quy mô toàn cầu đã chỉ ra rằng, xói lở bờ biển trong thế kỷ 21 sẽ bị chi phối bởi các "sự kiện cực đoan kép" – sự kết hợp đồng thời của triều cường, nước dâng do bão và lưu lượng lũ lớn từ thượng nguồn.

Tác động của can thiệp bởi con người:

Trên thế giới, sự suy giảm nguồn bùn cát do đập thủy điện là nguyên nhân hàng đầu gây xói lở châu thổ. Nghiên cứu của Syvitski et al. (2009) [5] trên 33 châu thổ lớn thế giới cho thấy phần lớn đang bị "chìm" do thiếu hụt trầm tích.

Trường hợp sông Nile (Ai Cập) sau khi xây đập Aswan High Dam là bài học kinh điển: xói lở bờ biển gia tăng đột biến do lượng phù sa về châu thổ giảm 98% [38]. Tương tự, tại lưu vực sông Mekong, các nghiên cứu của Kondolf et al. (2014) [39] và Manh et al. (2015) [40] dự báo lượng bùn cát về Đồng bằng sông cử long có thể giảm tới 95% nếu toàn bộ các đập dòng chính được xây dựng.

Đối với các giải pháp công trình, xu hướng thế giới đang chuyển dịch từ "Cứng hóa" (kè biển, đê chắn sóng) sang "Thích ứng dựa vào tự nhiên" như nuôi bãi, trồng

rừng ngập mặn và tôn tạo cồn cát [41]. Các nghiên cứu đánh giá sau dự án tại Hà Lan hay Mỹ chỉ ra rằng, các công trình cứng thường gây ra hiện tượng xói lở hạ lưu và làm mất mỹ quan, trong khi nuôi bãi mang lại hiệu quả bền vững hơn về mặt sinh thái và du lịch.

Tổng hợp và nhận định:

Từ tổng quan tài liệu quốc tế, có thể rút ra một số kết luận định hướng cho nghiên cứu tại Cửa Đại:

Các lý thuyết thủy động lực học hiện đại đòi hỏi phải xem xét đầy đủ tương tác Sóng - Dòng chảy và các thành phần rối 3 chiều.

Công nghệ mô hình hóa đã chuyển sang sử dụng lưới lồng ghép trên nhiều quy mô khác nhau và các mô hình hình thái dài hạn.

Đánh giá tác động biến đổi khí hậu cần vượt qua giới hạn của Quy tắc Bruun, hướng tới mô phỏng tương tác động lực trong các kịch bản cực đoan.

Nguyên nhân xói lở thường là tổ hợp của sự thiếu hụt nguồn cát từ thượng nguồn và gia tăng năng lượng phá hủy từ phía biển, do đó cần một cách tiếp cận tích hợp Lưu vực - Bờ biển.

Đây chính là các khoảng trống về mặt phương pháp luận mà các nghiên cứu trước đây tại Việt Nam chưa hoàn toàn lấp đầy, và là cơ sở để Luận án đề xuất khung nghiên cứu trong các chương tiếp theo.

1.3. TỔNG QUAN TÌNH HÌNH NGHIÊN CỨU TẠI VIỆT NAM VÀ CỬA ĐẠI

Trong khi các nghiên cứu trên thế giới tập trung nhiều vào cơ chế vật lý và phát triển công cụ mô hình, thì các nghiên cứu trong nước về dải ven biển miền Trung và đặc biệt là khu vực Cửa Đại - Hội An lại mang tính ứng dụng cao, gắn liền với nhu cầu cấp bách về phòng chống thiên tai và phát triển kinh tế. Tổng quan các nghiên cứu này có thể được phân chia theo quy mô từ khu vực đến địa phương, và theo tiến trình lịch sử của các can thiệp công trình.

1.3.1. Các nghiên cứu về đặc điểm thủy động lực học dải ven biển miền Trung

Dải ven biển miền Trung Việt Nam, kéo dài từ Quảng Bình đến Bình Thuận, được giới nghiên cứu trong nước xác định là khu vực có chế độ động lực biển khắc nghiệt và phức tạp nhất cả nước. Các công trình nghiên cứu của Lương Phương Hậu và cộng sự (2005) [42], Lê Đình Thành (2010) [43] đã chỉ ra ba đặc trưng cốt lõi chi phối quá trình hình thái tại đây:

Chế độ sóng gió mùa: Sự luân phiên của hai mùa gió (Đông Bắc và Tây Nam) tạo ra hai trường sóng trái ngược nhau. Trong đó, sóng mùa Đông Bắc đóng vai trò chủ đạo với năng lượng lớn, tạo ra dòng chảy dọc bờ hướng Nam có khả năng vận chuyển bùn cát mạnh mẽ. Ngược lại, mùa gió Tây Nam thường gây ra sóng nhỏ hơn nhưng lại trùng với thời kỳ kiệt của các sông, tạo điều kiện cho triều và mặn xâm nhập sâu [14].

Độ dốc đáy biển lớn: Khác với vùng biển Bắc Bộ hay Nam Bộ có thềm lục địa thoải, dải ven biển miền Trung có đường đẳng sâu -10m đến -20m nằm rất gần bờ. Nghiên cứu của Nguyễn Mạnh Hùng (2012) [44] cho thấy đặc điểm này làm cho sóng ít bị tiêu tán năng lượng do ma sát đáy trước khi vỡ, dẫn đến chiều cao sóng tại vùng sóng vỡ rất lớn, gây xói lở mạnh.

Tác động của bão: Với tần suất trung bình 4-6 cơn bão/năm đổ bộ, các nghiên cứu thống kê của Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu (IMHEN,

2015) [45] khẳng định bão là yếu tố "kích hoạt" các biến đổi địa hình đột ngột. Trong bão, sự kết hợp giữa nước dâng và sóng lớn có thể gây ra xói lở bằng cả chục năm diễn biến tự nhiên cộng lại.

1.3.2. Lịch sử biến động và diễn biến hình thái khu vực Cửa Đại

Cửa Đại là cửa sông biến động mạnh và diễn hình bậc nhất miền Trung. Lịch sử biến đổi của nó đã được nhiều tác giả dựng lại thông qua phân tích ảnh vệ tinh và bản đồ cổ.

Giai đoạn trước năm 2000 (Giai đoạn tương đối ổn định):

Các nghiên cứu của nhóm tác giả Đào Nguyên Khôi (2018) [46] và Lê Thanh Chương (2015) [47] sử dụng chuỗi ảnh Landsat từ 1975-2000 cho thấy: mặc dù cửa sông có sự dịch chuyển trực lạch sâu và biến đổi doi cát bờ Bắc/Nam theo mùa, nhưng tổng thể đường bờ biển Hội An vẫn giữ được trạng thái cân bằng động. Sự bồi - xói diễn ra xen kẽ theo quy luật: mùa Đông Bắc xói lở, mùa Tây Nam bồi tụ [48].

Giai đoạn sau năm 2000 đến nay (Giai đoạn xói lở mất kiểm soát):

Sự cân bằng động bị phá vỡ hoàn toàn bắt đầu từ những năm đầu thế kỷ 21. Báo cáo của Ủy ban nhân dân tỉnh Quảng Nam (2020) [49] và nghiên cứu của Nguyễn Trung Việt và cộng sự (2015, 2017) [50] ghi nhận tốc độ xói lở bờ biển Cửa Đại - Hội An diễn ra với quy mô chưa từng có.

Về không gian: Xói lở lan truyền từ phía Bắc Cửa Đại lên đến bãi biển An Bàng (cách cửa sông 4-5km).

Về cường độ: Tốc độ lùi đường bờ trung bình đạt 10-15 m/năm, cá biệt có những năm bão lớn lùi tới 30-40 m [14].

Về hình thái: Sự xuất hiện và biến mất liên tục của các đảo cát ngay tại cửa sông vào năm 2008-2010 và 2017-2019 là minh chứng cho sự bất ổn định cực đại của chế độ dòng chảy và bùn cát [10].

1.3.3. Các quan điểm khoa học về nguyên nhân gây xói lở

Đây là vấn đề gây tranh luận nhiều nhất trong cộng đồng khoa học trong nước và quốc tế. Tổng quan tài liệu cho thấy có hai luồng quan điểm chính, không loại trừ lẫn nhau nhưng khác nhau về trọng số tác động.

Quan điểm 1: Nguyên nhân chủ đạo do thiếu hụt nguồn bùn cát từ thượng nguồn

Nhóm nghiên cứu của Đại học Thủy lợi và Viện Khoa học thủy lợi Miền Trung (Doan et al., 2018; Mai et al., 2020) [51], [52] nhấn mạnh vai trò của hệ thống bậc thang thủy điện trên sông Vu Gia - Thu Bồn.

Cơ sở đưa ra nhận định trên đó là: Từ khi các hồ chứa lớn (Sông Tranh 2, A Vương, Đăk Mi 4...) đi vào vận hành và chặn dòng, một lượng lớn bùn cát đáy đã bị giữ lại.

Kết quả chứng minh: Kết quả tính toán cân bằng bùn cát cho thấy lượng tải lượng trầm tích về Cửa Đại đã giảm khoảng 40-60% so với thời kỳ tự nhiên. Sự thiếu hụt này làm mất khả năng tự phục hồi của bãi biển sau mùa gió bão [53].

Hệ quả: Dòng chảy đi ra biển là dòng "đói" bùn cát, có xu hướng xói sâu lòng dẫn và bờ để bù đắp năng lượng, gây ra xói lở hạ du.

Quan điểm 2: Nguyên nhân chủ đạo do biến đổi động lực biển và tai biến cực đoan

Nhóm nghiên cứu hợp tác Việt - Nhật (Tanaka, Viet et al., 2017, 2019) [10 và các nhà nghiên cứu độc lập khác (Trương và cộng sự, 2016) [54] lại chú trọng vào sự thay đổi của các yếu tố biển.

Cơ sở đưa ra quan điểm đó là: Sự gia tăng tần suất các cơn bão mạnh và áp thấp nhiệt đới trực tiếp vào Quảng Nam trong giai đoạn 2000-2020 là nguyên nhân kích hoạt. Đặc biệt, hiện tượng El Nino/La Nina làm thay đổi hướng sóng chủ đạo trong một số năm, gây ra sự tập trung năng lượng sóng vào các "điểm nóng" cục bộ.

Chứng minh: Mô phỏng số trị cho thấy trong các đợt triều cường kết hợp sóng lớn, ứng suất cắt đáy tại khu vực Cửa Đại vượt xa ngưỡng khởi động bùn cát, cuốn trôi hàng nghìn mét khối cát ra khơi chỉ trong vài ngày – điều mà sự thiếu hụt thương nguồn (vốn diễn ra từ từ) không thể giải thích hết được sự đột biến này [15].

Quan điểm 3: Tác động của các công trình ven bờ và khai thác cát

Ngoài hai nguyên nhân vĩ mô trên, nhiều nghiên cứu (Vu et al., 2014) [55] chỉ ra tác động tiêu cực của các hoạt động xây dựng khu nghỉ dưỡng du lịch sát mép nước và việc hút cát nạo vét luồng lạch. Việc xây dựng các tường chắn sóng cục bộ tại các khu nghỉ dưỡng đã gây ra hiện tượng "xói lở đầu cuối", đẩy vấn đề xói lở sang các khu vực lân cận chưa được bảo vệ.

1.3.4. Tổng quan về các giải pháp công trình đã áp dụng và đánh giá hiệu quả

Thực tiễn ứng phó tại Cửa Đại trong 10 năm qua là một "phòng thí nghiệm sóng" về các giải pháp công trình bảo vệ bờ biển.

Các giải pháp kè cứng:

Kè mái nghiêng và tường đứng: Ban đầu, các giải pháp truyền thống như kè lát mái bê tông, rọ đá được áp dụng cấp bách. Tuy nhiên, các công trình này nhanh chóng bị phá hủy hoặc lún sụt sau 1-2 mùa bão do nền cát yếu và xói chân [56].

Kè mỏ hàn và Đê phá sóng: Một số đoạn đã thử nghiệm mỏ hàn để giữ cát. Hiệu quả ghi nhận được là có gây bồi phía thượng lưu dòng chảy dọc bờ, nhưng lại gây xói lở nghiêm trọng phía hạ lưu (bờ biển phía Bắc), minh chứng cho sự nhạy cảm của dòng bùn cát dọc bờ [55].

Các giải pháp kè mềm:

Đê ngầm Geotube: Dự án kè mềm bằng túi địa kỹ thuật (Geotube) dọc bãi tắm Vinpearl và Palm Garden là một nỗ lực chuyển đổi. Nghiên cứu đánh giá sau 5 năm của Viện Kỹ thuật Biển (2019) [56] cho thấy Geotube có hiệu quả trong việc giảm sóng mà không gây chia cắt cảnh quan quá lớn. Tuy nhiên, tuổi thọ vật liệu và nguy cơ rách túi do mảnh vụn trôi nổi vẫn là thách thức.

Giải pháp nuôi bãi:

Năm 2020, dự án nuôi bãi quy mô lớn (phun cát từ nguồn nạo vét luồng Cửa Đại lên bãi) đã được thực hiện. Kết quả quan trắc ban đầu rất khả quan, bãi biển được tái tạo nhanh chóng. Tuy nhiên, các nhà khoa học cảnh báo rằng nếu không có công trình giữ chân (như đê ngầm chữ Y hay chữ T), lượng cát nuôi này sẽ sớm bị sóng cuốn trôi về vị trí cũ [57].

1.3.5. Nhận định chung về tình hình nghiên cứu trong nước và các vấn đề tồn tại

Tổng hợp lại, các nghiên cứu tại Việt Nam và Cửa Đại đã đạt được những thành tựu đáng kể:

Đã xác định được danh mục các nguyên nhân gây xói lở (thủy điện, bão, sóng, con người).

Đã thử nghiệm nhiều loại hình công trình và rút ra bài học kinh nghiệm xương máu.

Đã xây dựng được bộ cơ sở dữ liệu nền tảng về địa hình, thủy văn (dù còn gián đoạn).

Tuy nhiên, vẫn tồn tại những "khoảng trống" lớn mà Luận án cần giải quyết:

Thứ nhất - Về sự tích hợp định lượng: Chưa có công trình nào định lượng được tỷ trọng đóng góp của từng nguyên nhân trong một mô hình tổng thể. (Ví dụ: Xói lở do thủy điện chiếm bao nhiêu %? Do biến đổi khí hậu chiếm bao nhiêu %?). Các nghiên cứu thường chỉ xét riêng lẻ từng yếu tố.

Thứ hai - Về công cụ mô phỏng: Hầu hết các nghiên cứu trong nước vẫn sử dụng mô hình 2D lưới cấu trúc đơn giản và trên quy mô địa phương. Việc áp dụng mô hình 3D lưới đủ mịn và trên nhiều quy mô để giải quyết bài toán tương tác phức tạp tại vùng cửa sông sâu và hẹp như Cửa Đại còn rất hạn chế. Đặc biệt là các nghiên cứu về cấu trúc dòng chảy 3 chiều gây xói sâu cục bộ.

Thứ ba - Về kịch bản tương lai: Các giải pháp đưa ra thường mang tính ngắn hạn (5-10 năm). Thiếu các nghiên cứu mô phỏng kịch bản dài hạn (đến 2050, 2100) xét đến sự cộng hưởng của Nước biển dâng (theo kịch bản mới nhất của Bộ Tài nguyên và Môi trường) [58] [59] và Quy hoạch bậc thang thủy điện.

Chính vì vậy, việc thực hiện đề tài "Xu thế biến đổi bãi biển vùng Cửa Đại, Hội An dưới tác động của các yếu tố Thủy động lực học và Biến đổi khí hậu" với cách tiếp cận mới về mô hình toán hiện đại DELFT3D và kịch bản tổng hợp là hết sức cần thiết và có ý nghĩa khoa học, thực tiễn sâu sắc.

1.4. TỔNG QUAN VỀ KỊCH BẢN BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU ÁP DỤNG CHO KHU VỰC

Biến đổi khí hậu và nước biển dâng được xác định là một trong những thách thức lớn nhất đối với sự ổn định hình thái dải ven biển trong thế kỷ 21. Để dự báo xu thế biến đổi bãi biển Cửa Đại - Hội An trong dài hạn, việc lựa chọn và phân tích các kịch bản biến đổi khí hậu phù hợp là bước tiền đề quan trọng, quyết định độ tin cậy của kết quả mô phỏng.

1.4.1. Cơ sở khoa học về Nước biển dâng và các báo cáo đánh giá toàn cầu

Trên phạm vi toàn cầu, Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu (IPCC) đã liên tục cập nhật các kịch bản phát thải và dự báo mực nước biển dâng qua các kỳ báo cáo (AR4, AR5 và mới nhất là AR6).

Trong báo cáo đánh giá lần thứ 6 (AR6, 2021), IPCC khẳng định mực nước biển trung bình toàn cầu đang dâng lên với tốc độ gia tăng, từ mức 1.3 mm/năm (giai đoạn 1901-1971) lên tới 3.7 mm/năm (giai đoạn 2006-2018) [3]. Nguyên nhân chính là do sự giãn nở nhiệt của đại dương và sự tan chảy của các khối băng lục địa.

Một điểm mới quan trọng trong các nghiên cứu gần đây là sự chuyển dịch từ các kịch bản SRES (trong AR4) sang các Đường dẫn Nồng độ Đại diện trong AR5 và hiện nay là các Lộ trình Kinh tế - Xã hội chung trong AR6. Tuy nhiên, trong bối cảnh nghiên cứu ứng dụng tại Việt Nam, hệ thống kịch bản dựa trên RCPs vẫn là cơ sở pháp lý chủ đạo cho quy hoạch phòng chống thiên tai [59].

Các nghiên cứu của Church et al. (2013) [60] và Slangen et al. (2014) [61] cũng chỉ ra rằng, nước biển dâng không đồng đều trên toàn cầu. Do ảnh hưởng của

hoàn lưu đại dương và biến đổi trường trọng lực Trái đất, mực nước biển tại khu vực Tây Thái Bình Dương (bao gồm Biển Đông Việt Nam) thường có xu hướng dâng cao hơn mức trung bình toàn cầu khoảng 10-15%. Điều này đặt ra yêu cầu phải sử dụng các kịch bản đã được chi tiết hóa (downscaling) cho từng địa phương thay vì sử dụng số liệu trung bình thế giới.

1.4.2. Các kịch bản Biến đổi khí hậu và Nước biển dâng cho Việt Nam

Tại Việt Nam, Bộ Tài nguyên và Môi trường đã lần lượt công bố các Kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng vào các năm 2009, 2012, 2016 và cập nhật mới nhất năm 2020. Đây là nguồn dữ liệu đầu vào chính thống và bắt buộc cho các nghiên cứu đánh giá tác động môi trường.

Đặc điểm của Kịch bản 2016 và 2020:

Kịch bản năm 2020 được xây dựng dựa trên báo cáo AR5 của IPCC, sử dụng phương pháp chi tiết hóa động lực với các mô hình khí hậu khu vực độ phân giải cao. Các kịch bản nồng độ khí nhà kính được xem xét bao gồm:

RCP 2.6 (Kịch bản thấp): Giả định lượng phát thải khí nhà kính giảm mạnh, nhiệt độ toàn cầu tăng dưới 2°C. Đây là kịch bản lý tưởng nhưng ít có khả năng xảy ra trong thực tế phát triển hiện nay.

RCP 4.5 (Kịch bản trung bình): Mức phát thải trung bình, tương ứng với việc các quốc gia thực hiện cam kết giảm phát thải nhưng chưa triệt để. Đây được coi là kịch bản "cơ sở" (baseline) cho quy hoạch.

RCP 8.5 (Kịch bản cao): Mức phát thải cao, giả định sự phát triển kinh tế phụ thuộc nhiều vào nhiên liệu hóa thạch. Đây là kịch bản "xấu nhất" (worst-case scenario), thường được dùng để thiết kế các công trình trọng điểm có tuổi thọ dài (như đê biển, điện hạt nhân) để đảm bảo an toàn tuyệt đối.

Luận án lựa chọn sử dụng số liệu từ Kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng phiên bản năm 2020 (hoặc 2016 tùy vào thời điểm bắt đầu nghiên cứu, cần thống nhất) làm cơ sở tính toán, tập trung vào hai kịch bản RCP 4.5 và RCP 8.5 để đánh giá khoảng dao động của rủi ro.

1.4.3. Kịch bản chi tiết áp dụng cho khu vực Quảng Nam và Cửa Đại

Dựa trên bản đồ nguy cơ ngập lụt và số liệu chi tiết hóa cho các trạm hải văn ven biển miền Trung, các thông số đặc trưng cho khu vực Quảng Nam được tổng hợp như sau:

Về mực nước biển dâng:

Theo kịch bản RCP 4.5, mực nước biển tại khu vực Quảng Nam vào năm 2050 dự báo tăng khoảng 23-25 cm, và đến năm 2100 tăng khoảng 53-55 cm so với thời kỳ cơ sở.

Theo kịch bản RCP 8.5, mức tăng này đáng kể hơn, có thể đạt 28-30 cm vào năm 2050 và lên tới 73-77 cm (thậm chí xấp xỉ 100 cm theo cận trên khoảng tin cậy 95%) vào năm 2100 [59].

Nhận định: Với độ dốc bãi biển Cửa Đại trung bình khoảng 1/50 đến 1/100, mức nước dâng tĩnh 70 cm theo lý thuyết hình học đơn giản có thể gây ra sự lùi đường bờ từ 35m đến 70m. Tuy nhiên, con số thực tế sẽ lớn hơn nhiều do tác động cộng hưởng của sóng.

Về sự thay đổi chế độ bão và áp thấp nhiệt đới:

Khu vực ven biển Quảng Nam nằm trong vùng trọng điểm bão của Việt Nam. Các mô hình khí hậu dự báo số lượng cơn bão có thể không tăng nhiều, nhưng cường độ bão có xu hướng mạnh lên, và quỹ đạo bão có xu hướng dịch chuyển về phía Nam và xuất hiện muộn hơn vào cuối mùa mưa [62].

Điều này đặc biệt nguy hiểm cho Cửa Đại vì bão cuối mùa thường kết hợp với gió mùa Đông Bắc và lũ chính vụ sông Thu Bồn, tạo ra tổ hợp "Lũ - Bão - Triều cường" gây sức tàn phá cực đại.

Về thay đổi chế độ sóng:

Một số nghiên cứu gần đây sử dụng mô hình sóng toàn cầu (WAVEWATCH III) cho thấy dưới tác động của biến đổi khí hậu, chiều cao sóng cực đại (H_{max}) trong bão tại Biển Đông có xu hướng tăng, đồng thời hướng sóng chủ đạo trong mùa đông có sự thay đổi nhẹ [63]. Sự thay đổi hướng sóng (dù chỉ vài độ) có thể làm thay đổi hoàn toàn cân bằng vận chuyển bùn cát dọc bờ, biến một vùng đang ổn định thành vùng xói lở.

1.4.4. Tiếp cận "Nước biển dâng động" và tính cấp thiết của việc tích hợp kịch bản

Đa số các nghiên cứu trước đây tại Cửa Đại thường áp dụng kịch bản biến đổi khí hậu theo cách "cộng tĩnh", tức là cộng thêm giá trị nước biển dâng vào biên mực nước của mô hình thủy lực hiện trạng.

Tuy nhiên, các nghiên cứu quốc tế của Arns et al. (2017) [64] và Voudoukas et al. (2018) [37] đã chỉ ra hạn chế của phương pháp này. Khi mực nước trung bình dâng cao, độ sâu nước tại vùng ven bờ tăng lên, làm giảm ma sát đáy và thay đổi điểm vỡ của sóng. Kết quả là sóng có thể truyền sâu hơn vào bờ với năng lượng lớn hơn, gây ra hiện tượng nước dâng do sóng cao hơn. Hiệu ứng này được gọi là "Nước biển dâng động".

Bên cạnh đó, khái niệm "Ngập lụt cộng hưởng" đang trở thành tâm điểm nghiên cứu. Tại Cửa Đại, rủi ro lớn nhất không đến từ việc nước biển dâng từ từ, mà đến từ sự xuất hiện đồng thời của: (1) Nước biển dâng do biến đổi khí hậu + (2) Nước dâng do bão + (3) Triều cường + (4) Lũ thượng nguồn.

Theo nghiên cứu của nhóm tác giả Đại học Quốc gia Hà Nội (2019), xác suất xảy ra các sự kiện tổ hợp này sẽ tăng lên đáng kể trong tương lai. Một trận bão có chu kỳ lặp lại 100 năm trong hiện tại có thể trở thành sự kiện 10 hoặc 20 năm trong bối cảnh nước biển dâng [65].

1.4.5. Lựa chọn kịch bản tính toán cho Luận án

Trên cơ sở phân tích các văn bản pháp lý và xu hướng khoa học nêu trên, Luận án xác định khung kịch bản tính toán cho Chương 4 như sau:

Kịch bản nền (Baseline): Hiện trạng năm 2020 (để kiểm định mô hình).

Các mốc thời gian dự báo: Năm 2050 (ngắn hạn, phục vụ quy hoạch chi tiết) và năm 2100 (dài hạn, phục vụ định hướng chiến lược).

Kịch bản phát thải: Sử dụng RCP 4.5 (kịch bản trung bình) và RCP 8.5 (kịch bản cực đoan) từ Báo cáo năm 2020 của Bộ Tài nguyên và Môi trường.

Tích hợp đa yếu tố: Luận án sẽ không chỉ xét SLR đơn lẻ, mà sẽ xây dựng các tổ hợp kịch bản bao gồm: Mực nước biển dâng + Bão thiết kế (cấp 12-13) + Lưu lượng xả lũ cực hạn từ thượng nguồn (xét đến quy trình vận hành hồ chứa).

Cách tiếp cận này đảm bảo tính kế thừa các dữ liệu quốc gia, đồng thời khắc phục được các hạn chế của phương pháp cộng tính truyền thống, giúp bức tranh dự báo về xói lở Cửa Đại trở nên toàn diện và sát thực tế hơn.

1.5. KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU VÀ TÍNH CẤP THIẾT CỦA ĐỀ TÀI

Từ những phân tích tổng quan tài liệu trong và ngoài nước ở các mục trên, có thể nhận thấy bức tranh nghiên cứu về diễn biến hình thái vùng Cửa Đại - Hội An đã có những nét vẽ cơ bản. Tuy nhiên, để hoàn thiện bức tranh này nhằm phục vụ công tác dự báo dài hạn và quy hoạch bền vững, vẫn còn tồn tại những "khoảng trống" lớn về mặt phương pháp luận và cơ sở dữ liệu mà các nghiên cứu trước chưa giải quyết triệt để.

1.5.1. Phân tích các khoảng trống nghiên cứu

Luận án xác định ba nhóm vấn đề chính còn tồn tại cần được khắc phục:

Khoảng trống thứ nhất: Hạn chế về công cụ mô hình hóa các quá trình thủy động lực học phức tạp

Hầu hết các nghiên cứu trước đây tại khu vực Cửa Đại đều sử dụng các mô hình thủy lực 2 chiều trung bình theo độ sâu trên lưới tính đơn giản hoặc khu vực nhỏ. Mặc dù các mô hình này có ưu điểm về tốc độ tính toán, nhưng chúng bộc lộ những hạn chế căn bản về mặt vật lý khi áp dụng cho một vùng cửa sông có địa hình đáy thay đổi đột ngột và chế độ dòng chảy phức tạp như Cửa Đại:

Về cấu trúc dòng chảy: Mô hình 2D không thể mô phỏng được cấu trúc dòng chảy theo phương đứng, đặc biệt là dòng chảy hoàn lưu (undertow) và dòng chảy thứ cấp tại khu vực cửa lạch sâu. Trong khi đó, đây chính là các động lực chủ đạo gây ra sự vận chuyển bùn cát lơ lửng và xói lở chân công trình.

Về mô hình rối: Các nghiên cứu trước thường đơn giản hóa hệ số nhớt xoáy là hằng số hoặc sử dụng công thức thực nghiệm đơn giản. Điều này không phản ánh đúng bản chất tiêu tán năng lượng của sóng vỡ và tương tác sóng - dòng chảy. Để khắc phục, cần thiết phải áp dụng mô hình 3 chiều (3D) giải hệ phương trình Navier-Stokes trung bình Reynolds (RANS) kết hợp với các mô hình khép kín rối bậc cao (như k-epsilon hoặc Smagorinsky) để tính toán chính xác tensor ứng suất Reynolds và ứng suất cắt đáy.

Về lưới tính toán: Do có sự tương tác của nhiều yếu tố động lực học, trong đó mỗi yếu tố để có sự chính xác cần mô phỏng trên các quy mô không gian khác nhau, do vậy cần thiết phải có sự xác định không gian phù hợp với từng loại yếu tố mô phỏng. Trong nghiên cứu này lựa chọn trên hai quy mô: Quy mô khu vực (Quảng Nam – Đà Nẵng) và quy mô địa phương (cửa sông Cửa Đại, Hội An và khu vực bờ biển lân cận).

Khoảng trống thứ hai: Thiếu sự đánh giá định lượng về tương tác đa chiều trong các sự kiện cực đoan

Các nghiên cứu hiện có thường tiếp cận vấn đề theo hướng đơn lẻ hoặc cộng gộp tuyến tính: hoặc chỉ xét tác động của thiếu hụt bùn cát thượng nguồn, hoặc chỉ xét tác động của sóng biển.

1.6. MỤC TIÊU VÀ NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Dựa trên việc xác định các khoảng trống nghiên cứu và tính cấp thiết của đề tài, luận án xác định các mục tiêu và nội dung cụ thể như sau:

1.6.1. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát:

Làm sáng tỏ cơ chế thủy động lực học và vận chuyển bùn cát chi phối quá trình biến đổi hình thái vùng cửa sông Cửa Đại - Hội An; trên cơ sở đó dự báo xu thế biến đổi hình thái bãi biển dưới tác động của các yếu tố thủy động lực và các kịch bản Biến đổi khí hậu (BĐKH) và nước biển dâng kết hợp với sự thay đổi của quá trình phân phối nguồn bùn cát từ sông tới hai phía bãi biển.

Mục tiêu cụ thể:

- Nghiên cứu hiện trạng và xu thế biến động vùng cửa sông và bãi biển khu vực Cửa Đại, Hội An trên cơ sở các nguồn dữ liệu thu thập và phân tích tìm ra các đặc trưng chi phối và ảnh hưởng tới quá trình cung cấp và phân phối bùn cát đến các khu vực bãi biển Cửa Đại, Hội An.

- Ứng dụng mô hình toán đã được hiệu chỉnh, kiểm định để mô phỏng quá trình biến động địa hình khu vực cửa sông và bãi biển. Phân tích, đánh giá phạm vi mức độ biến động của thềm cát cửa sông trong mối liên hệ với xói lở, bồi tụ bãi biển từ đó đề xuất định hướng giải pháp kỹ thuật ổn định cửa sông và bảo vệ bãi biển khu vực Cửa Đại, Hội An.

Về mặt dự báo: Xây dựng được bộ bản đồ dự báo biến đổi đường bờ biển Cửa Đại - Hội An theo các kịch bản biến đổi khí hậu (RCP 4.5, RCP 8.5) đến năm 2050 và 2100, làm cơ sở khoa học cho việc đề xuất các giải pháp quy hoạch và bảo vệ bờ biển.

1.6.2. Đối tượng và Phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu:

Các quá trình thủy động lực học: Sóng, dòng chảy (dòng triều, dòng chảy sông, dòng chảy dọc bờ, dòng hoàn lưu), nước dâng do biến đổi khí hậu.

Quá trình vận chuyển bùn cát: Di chuyển bùn cát lơ lửng, bùn cát đáy và diễn biến hình thái đáy biển/đường bờ.

Phạm vi nghiên cứu: Khu vực cửa sông Cửa Đại, Hội An và các khu vực bờ biển lân cận

Phạm vi không gian:

Vùng biển ven bờ Quảng Nam và Đà Nẵng phục vụ thiết lập mô hình trên quy mô khu vực.

Khu vực trọng điểm: Cửa sông Cửa Đại và dải bờ biển Hội An (từ An Bàng đến Cửa Đại), kéo dài ra độ sâu khoảng -20m.

Phạm vi thời gian:

Số liệu quá khứ và hiện trạng: Giai đoạn 2010 – 2020, phục vụ hiệu chỉnh và kiểm định mô hình.

Giai đoạn dự báo: Đến năm 2050 và tầm nhìn 2100.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Chương 1 đã hệ thống hóa toàn diện cơ sở lý luận và thực tiễn liên quan đến quá trình biến đổi hình thái vùng cửa sông ven biển dưới tác động của các yếu tố tự nhiên và nhân sinh. Thông qua việc phân tích, tổng hợp các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước, cũng như đánh giá hiện trạng tại khu vực Cửa Đại - Hội An, một số kết luận chính được rút ra như sau:

Về tính chất phức tạp của khu vực nghiên cứu: Cửa Đại là một hệ thống cửa sông - bờ biển điển hình của miền Trung Việt Nam, chịu sự chi phối mạnh mẽ của chế độ gió mùa, bão nhiệt đới và sự tương tác phức tạp giữa sông và biển. Tình trạng xói lở nghiêm trọng hiện nay là hệ quả của sự mất cân bằng trong cân cân bùn cát, bị thúc đẩy bởi các tác động cộng hưởng từ thủy điện thượng nguồn (giữ cát), sự phân phối bùn cát do dịch chuyển cửa sông và biến đổi khí hậu (nước dâng).

Về khoảng trống phương pháp luận: Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu được thực hiện, nhưng đa số vẫn tiếp cận dựa trên các mô hình 2D trung bình hóa hoặc các công thức thực nghiệm đơn giản, chưa mô phỏng đầy đủ cấu trúc dòng chảy 3 chiều và tương tác phi tuyến giữa sóng và dòng chảy tại khu vực cửa lạch sâu và dốc. Bên cạnh đó, các đánh giá dự báo thường mang tính ngắn hạn, thiếu vắng các kịch bản dài hạn tích hợp yếu tố biến đổi khí hậu theo các chuẩn mực quốc tế mới nhất (RCP/SSP).

Về định hướng của luận án: Để khắc phục các hạn chế trên, luận án xác định hướng tiếp cận nòng cốt là sử dụng công nghệ mô hình toán hiện đại (Hệ thống mô hình liên kết DELFT 3D của Viện Thủy Lực Hà Lan). Đây là công cụ cho phép lượng hóa chính xác các trường động lực và vận chuyển bùn cát trong điều kiện cực đoan, làm cơ sở tin cậy cho việc dự báo xu thế biến đổi đường bờ đến năm 2050 và 2100.

Những phân tích tổng quan này là tiền đề khoa học quan trọng để luận án tiến hành xây dựng khung phương pháp luận, thiết lập mô hình và triển khai các nội dung nghiên cứu chi tiết. Cơ sở lý thuyết về mô hình toán, quy trình thiết lập lưới tính toán và các bước kiểm định mô hình sẽ được trình bày cụ thể trong chương tiếp theo.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG BÃI BIỂN, CỬA SÔNG CỬA ĐẠI – HỘI AN BẰNG VIỄN THÁM

Nghiên cứu biến động hình thái vùng cửa sông ven biển đòi hỏi một chuỗi số liệu đo đạc địa hình liên tục và dài hạn. Tuy nhiên, tại khu vực Cửa Đại - Hội An cũng như nhiều vùng ven biển khác của Việt Nam, số liệu quan trắc thực địa thường đứt quãng, thiếu đồng bộ và chỉ tập trung vào một số thời điểm nhất định. Để khắc phục hạn chế này, việc ứng dụng công nghệ viễn thám kết hợp với Hệ thống thông tin địa lý (GIS) được xem là giải pháp tối ưu, cho phép tái hiện lại bức tranh toàn cảnh về lịch sử biến động đường bờ và địa hình đáy biển trong hơn 50 năm qua (1973 – nay).

2.1. Số liệu phục vụ nghiên cứu

Để đảm bảo độ tin cậy và tính đại diện cho các giai đoạn biến động, luận án đã thu thập và xử lý bộ cơ sở dữ liệu đa nguồn, bao gồm:

Tư liệu viễn thám đa thời gian Luận án khai thác hệ thống ảnh vệ tinh quang học độ phân giải trung bình và cao từ hai nguồn dữ liệu uy tín là USGS (Mỹ) và ESA (Châu Âu). Tổng cộng 40 cảnh ảnh (scenes) đã được lựa chọn, đảm bảo chất lượng quang phổ, ít mây và bao trùm các thời điểm trước và sau mùa gió đông bắc hằng năm (Chi tiết xem Bảng 2.1).

Giai đoạn 1973 – 2015: Sử dụng chuỗi ảnh Landsat (Landsat 1, 2, 4, 5, 7, 8) với độ phân giải không gian 30m. Đây là nguồn dữ liệu duy nhất cho phép đánh giá biến động trong quá khứ xa.

Giai đoạn 2016 – 2023: Sử dụng ảnh Sentinel-2 (A/B) với độ phân giải cao 10m, cho phép chi tiết hóa các cấu trúc hình thái phức tạp tại cửa sông và các đảo cát mới hình thành.

Dữ liệu khảo sát thực địa để hiệu chỉnh và đánh giá độ chính xác của các thuật toán giải đoán, luận án sử dụng bộ số liệu đo đạc địa hình đáy biển chi tiết được thực hiện qua 04 đợt khảo sát (3/2016, 10/2016, 3/2017 và 9/2018) bằng máy đo sâu hồi âm đơn tia và đa tia, kết hợp với hệ thống định vị GPS (Chi tiết xem Bảng 2.2).

Dữ liệu thủy văn Chuỗi số liệu mực nước giờ tại trạm hải văn Sơn Trà và trạm Cửa Đại được sử dụng để hiệu chỉnh đường bờ triều, đưa các đường mép nước tại thời điểm chụp ảnh về cùng một cao độ quy chiếu (thường là mực nước trung bình hoặc mực nước triều kiệt) nhằm loại bỏ sai số do dao động thủy triều.

2.1.1. Số liệu ảnh vệ tinh

Số liệu ảnh vệ được thu thập từ nguồn ảnh vệ tinh từ các trung tâm dữ liệu ảnh vệ tinh của Mỹ và Châu Âu (Bảng 2.1). Nguồn ảnh vệ viễn thám được tiến hành thu thập trong giai đoạn từ năm 1973 cho tới nay. Nguồn ảnh vệ tinh là dạng ảnh quang phổ ánh sáng của các dự án vệ tinh Landsat và Sentinel-2.

Bảng 2.1. Số liệu ảnh vệ tinh sử dụng trong nghiên cứu

Thời gian (ngày/tháng/năm)	Nguồn ảnh	Độ phân giải (m)	Hệ tọa độ
30/06/1973	Landsat 1	30	UTM/WGS1984
13/03/1975	Landsat 2	30	UTM/WGS1984

Thời gian (ngày/tháng/năm)	Nguồn ảnh	Độ phân giải (m)	Hệ tọa độ
06/01/1979	Landsat 3	30	UTM/WGS1984
15/12/1987	Landsat4	30	UTM/WGS1984
03/09/1988	Landsat4	30	UTM/WGS1984
02/06/1989	Landsat4	30	UTM/WGS1984
08/08/1990	Landsat4	30	UTM/WGS1984
10/07/1991	Landsat4	30	UTM/WGS1984
25/05/1992	Landsat4	30	UTM/WGS1984
15/07/1993	Landsat5	30	UTM/WGS1984
15/05/1994	Landsat5	30	UTM/WGS1984
23/09/1995	Landsat5	30	UTM/WGS1984
05/06/1996	Landsat6	30	UTM/WGS1984
08/06/1997	Landsat6	30	UTM/WGS1984
14/08/1998	Landsat6	30	UTM/WGS1984
10/09/1999	Landsat7	30	UTM/WGS1984
07/05/2000	Landsat7	30	UTM/WGS1984
13/07/2001	Landsat7	30	UTM/WGS1984
29/05/2002	Landsat7	30	UTM/WGS1984
16/05/2003	Landsat7	30	UTM/WGS1984
03/06/2004	Landsat7	30	UTM/WGS1984
21/05/2005	Landsat7	30	UTM/WGS1984
25/06/2006	Landsat7	30	UTM/WGS1984
30/07/2007	Landsat7	30	UTM/WGS1984
29/05/2008	Landsat7	30	UTM/WGS1984
21/09/2009	Landsat7	30	UTM/WGS1984
06/07/2010	Landsat7	30	UTM/WGS1984

Thời gian (ngày/tháng/năm)	Nguồn ảnh	Độ phân giải (m)	Hệ tọa độ
25/07/2011	Landsat7	30	UTM/WGS1984
08/05/2012	Landsat7	30	UTM/WGS1984
08/09/2013	Landsat8	30	UTM/WGS1984
06/05/2014	Landsat8	30	UTM/WGS1984
26/06/2015	Landsat8	30	UTM/WGS1984
03/05/2016	Sentinel-2	10	UTM/WGS1984
21/08/2017	Sentinel-2	10	UTM/WGS1984
25/09/2018	Sentinel-2	10	UTM/WGS1984
30/09/2019	Sentinel-2	10	UTM/WGS1984
10/08/2020	Sentinel-2	10	UTM/WGS1984
25/08/2021	Sentinel-2	10	UTM/WGS1984
31/07/2022	Sentinel-2	10	UTM/WGS1984
26/07/2023	Sentinel-2	10	UTM/WGS1984

2.1.2. Số liệu địa hình đo đạc

Số liệu địa hình đáy biển được thực hiện đo đạc trong bốn đợt trong đó hai đợt được thực hiện đo đạc đồng thời cùng với các yếu tố thủy động lực học thuộc dự án nghiên cứu Việt Nam - Cộng hòa Pháp “Nghiên cứu quá trình xói lở và các biện pháp bảo vệ bờ biển phòng chống xói lở Cửa Đại, Hội An” [66] và hai đợt được thực hiện do nghiên cứu sinh tự thực hiện. Dữ liệu địa hình được đo đạc bằng thiết bị đo sâu hồi âm được hiệu chỉnh với mực nước thực đo và đưa về cùng cao độ mốc quốc gia (Bảng 2.2).

Bảng 2.2. Dữ liệu khảo sát địa hình đáy biển

Lần đo	Thời gian đo đạc	Thiết bị đo	Khoảng cách đo (m)
1	08/03/2016	Echosounder Garmin	10
2	21/10/2016	Echosounder Garmin	10

3	21/03/2017	Echosounder Garmin	10
4	25/08/2018	Echosounder Garmin	10

2.1.3. Số liệu mực nước

Số liệu mực nước tại trạm hải văn Sơn Trà và trạm Cửa Đại được thu thập sử dụng trong hiệu chỉnh đường bờ khi giải đoán từ ảnh vệ tinh. Số liệu mực nước trạm Sơn Trà được thu thập từ năm 1994 đến 2023. Số liệu mực nước được đo đạc bằng máy tự ghi tại cầu tàu biên phòng Cửa Đại, Hội An có tọa độ ($15^{\circ}52'33,00''\text{N}$, $108^{\circ}23'20,61''\text{E}$) trong ba năm từ 09/2013 đến tháng 3/2017 trong khuôn khổ đề tài “Nghiên cứu đánh giá các giải pháp kè mềm bảo vệ bờ biển Cửa Đại, thành phố Hội An hiện nay và đề xuất giải pháp nâng cao hiệu quả”, đề tài KH&CN cấp tỉnh, Nguyễn Ngọc Thế làm chủ nhiệm [67]. Số liệu mực nước thực đo được sử dụng trực tiếp trong phân tích ảnh vệ tinh trong giai đoạn có số liệu thu thập. Trong giai đoạn quá khứ không có số liệu thu thập, tác giả sử dụng số liệu thực đo và phân tích điều hòa phân tách các thành phần hằng số điều hòa thủy triều và tiến hành phân tích lại mực nước cho từng thời điểm trong quá khứ (Bảng 2.3).

Bảng 2.3. Bảng phân tích các hằng số điều hòa tại trạm Cửa Đại

TT	Tên sóng triều	Biên độ (cm)	Pha(độ)	TT	Tên sóng triều	Biên độ (cm)	Pha(độ)
1	K1	24,189	183,9	15	J1	1,084	212,2
2	SA	17,106	249,1	16	MS4	0,284	241,4
3	M2	17,098	98,4	17	MSF	1,432	69,1
4	O1	17,952	141,6	18	L2	0,2	146,6
5	S2	5,906	127,3	19	MU2	0,81	53,4
6	P1	7,807	182	20	M4	0,415	180,1
7	N2	3,855	77	21	T2	0,357	115,8
8	SSA	5,009	67,1	22	R2	0,093	358,9
9	MM	0,554	138	23	2SM2	0,06	133,4
10	Q1	3,287	129,5	24	S1	0,294	0,7
11	K2	1,67	139,7	25	M3	0,307	352,5
12	MF	2,791	68,5	26	M6	0,184	330,9
13	M1	0,97	170,6	27	S4	0,053	26,6
14	NU2	0,638	90,7				

2.2. Phân tích biến động đường bờ từ ảnh vệ tinh

2.2.1. Cơ sở phương pháp phân tích biến động đường bờ bằng ảnh vệ tinh

Quy trình chiết xuất đường bờ được thực hiện dựa trên thuật toán chỉ số nước khác biệt Chuẩn hóa (NDWI - Normalized Difference Water Index) theo đề xuất của McFeeters (1996) và Xu (2006). Phương pháp này tận dụng sự hấp thụ mạnh của nước trong dải phổ hồng ngoại gần (NIR) và sự phản xạ mạnh trong dải phổ xanh (Green) để tách biệt ranh giới Lục địa – Đại dương. Công thức như sau:

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad (2.1)$$

Tỷ số giữa kênh 3 và kênh 8 là nhỏ hơn 1 đối với bề mặt nước và lớn hơn 1 đối với đất ở khu vực ven biển.

Sau khi phân ngưỡng tự động để tách lớp nước, đường mép nước thu được sẽ được hiệu chỉnh về vị trí thực của đường bờ dựa trên độ dốc bãi biển và mực nước triều tại thời điểm chụp ảnh (H_{tide}), đảm bảo tính nhất quán khi so sánh giữa các năm.

2.2.2. Kết quả phân tích biến động đường bờ khu vực Cửa Đại - Hội An qua các giai đoạn

Kết quả phân tích chuỗi ảnh vệ tinh giai đoạn 1973 – 2023 cho thấy quá trình biến động hình thái khu vực Cửa Đại diễn ra cực kỳ phức tạp, có thể phân chia thành 3 giai đoạn đặc trưng sau:

Diễn biến hình thái đường bờ và cửa sông được phân chia thành 3 giai đoạn động lực đặc trưng:

- Giai đoạn 1973 - 1998 (Cân bằng động và Bồi tụ ưu thế): Đây là giai đoạn cửa sông và bãi biển biến động trong trạng thái cân bằng tự nhiên. Mặc dù có sự dịch chuyển của luồng lạch, nhưng sự xuất hiện của đảo cát nổi (năm 1988) lệch về phía Bắc đã đóng vai trò là nguồn cung cấp trầm tích quan trọng, giúp bãi biển phía Bắc được bồi tụ mạnh mẽ (cực đại tới 1,2 km),.

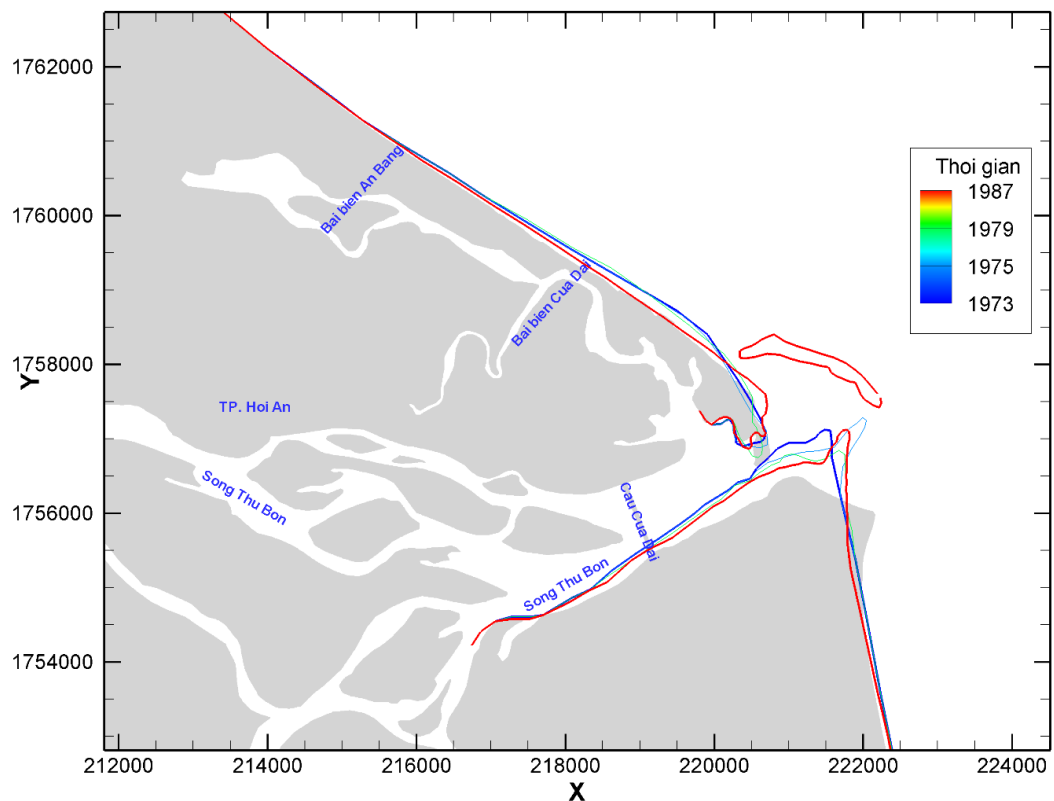
- Giai đoạn 1998 - 2017 (Xói lở mạnh và Dịch chuyển cửa sông): Đánh dấu sự phá vỡ cân bằng trầm tích. Bắt đầu từ các đợt lũ lớn lịch sử (1998, 1999), bờ Nam sông Thu Bồn bị xói lở dữ dội và dịch chuyển về phía Nam khoảng 300-500m,. Sự dịch chuyển này làm thay đổi góc tới của sóng và đẩy thêm cát ra xa hoặc rơi vào vùng khuất sóng, dẫn đến tình trạng "đói" trầm tích và xói lở liên tục tại bãi biển phía Bắc (lùi sâu 30-50m/năm).

- Giai đoạn 2018 - 2025 (Tái lập đảo cát và Xu thế mới): Dưới tác động của trận lũ lớn tháng 11/2017, một đảo cát mới (Đảo Khủng Long) đã hình thành. Kết quả phân tích cho thấy chu kỳ tái lập đảo cát (khoảng 30 năm từ 1988 đến 2018) là một đặc trưng hình thái quan trọng của khu vực, phản ánh cơ chế tự điều chỉnh của hệ thống sông - biển trước sự thiếu hụt bùn cát.

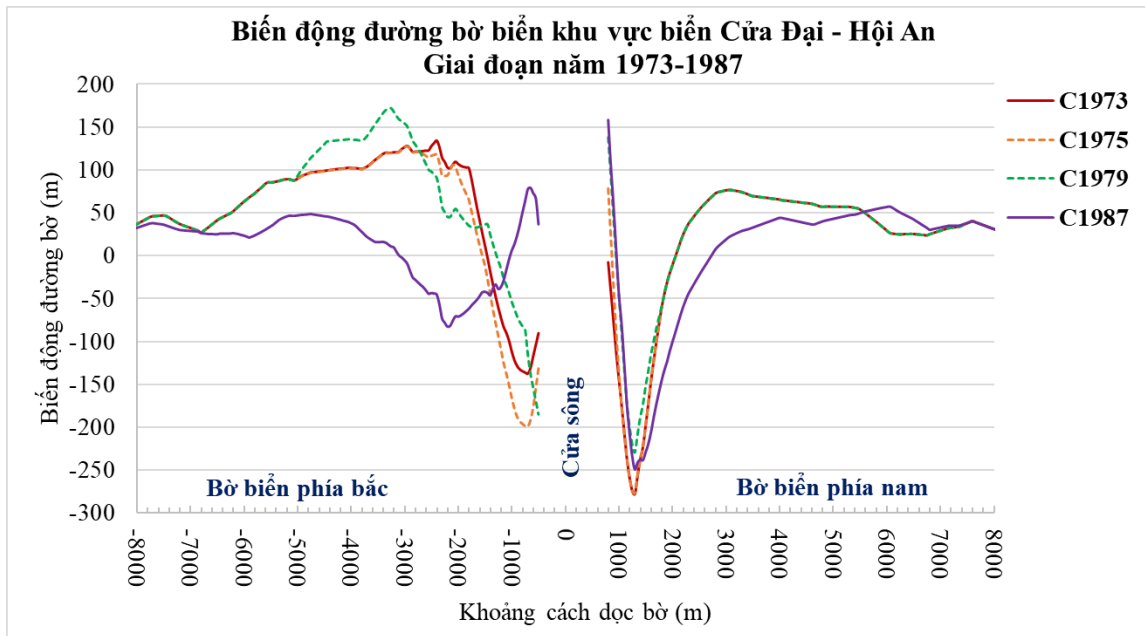
Dưới đây là phân tích chi tiết cho từng giai đoạn

2.2.2.1. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 1973-1987

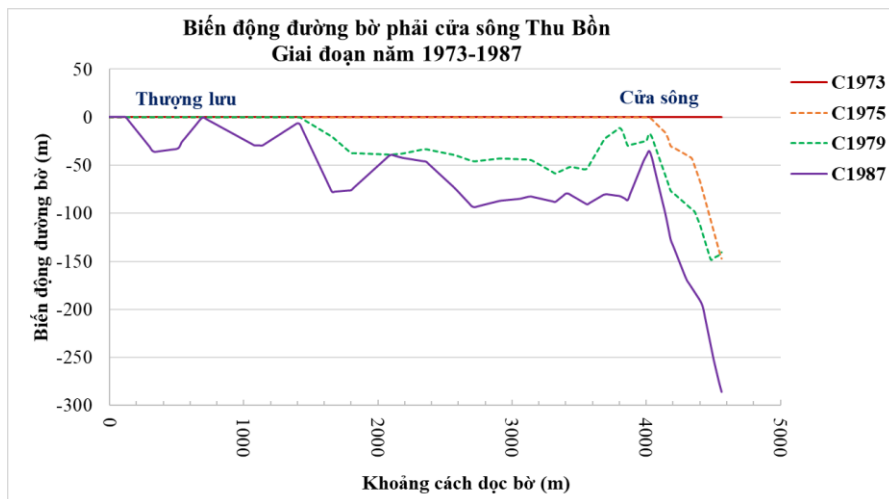
Trong giai đoạn này, ảnh vệ tinh được sử dụng là ảnh Landsat5. Trong các năm từ 1973 đến 1979, đường bờ biển khu vực phía bắc và phía nam Cửa Đại có xu hướng bồi. Bãi phía bắc cực đại bồi tới 100 m. Bãi biển phía nam trong giai đoạn đầu khá ổn định. Ngược lại, trong thời gian cuối từ năm 1979 đến 1987 có sự biến động khá mạnh, bãi biển phía bắc Cửa Đại xói lở khá mạnh, bãi phía bắc xói lở đến 250 m. Bãi phía nam cũng có xu thế xói tại vị trí sát cửa sông, xa về phía nam bãi có xu thế bồi. Vị trí bờ nam dịch chuyển về phía nam với tốc độ khá ổn định, vị trí dịch chuyển cực đại tới 100 m. Đặc biệt trong giai đoạn này có sự xuất hiện đảo cát phía trước cửa sông và nằm lệch về phía bắc. Điều kiện thủy văn đáng chú ý trong giai đoạn này là sự xuất hiện của lũ lớn tháng 12 năm 1986. Hình 2.1÷2.3 trình bày kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 1973-1987.



Hình 2.1. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 1973 -1987



Hình 2.2. Mức độ biến động đường bờ biển phía bắc và phía nam Cửa Đại giai đoạn 1973-1987

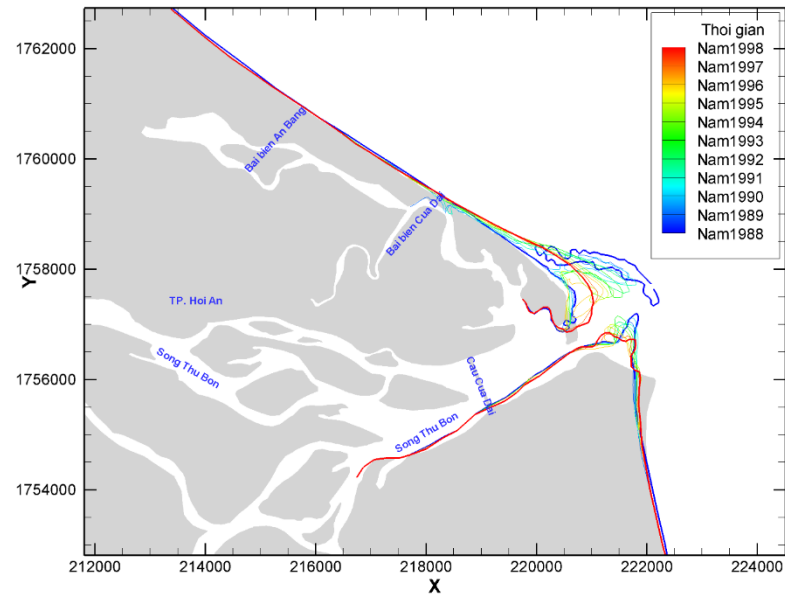


Hình 2.3. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 1973-1987

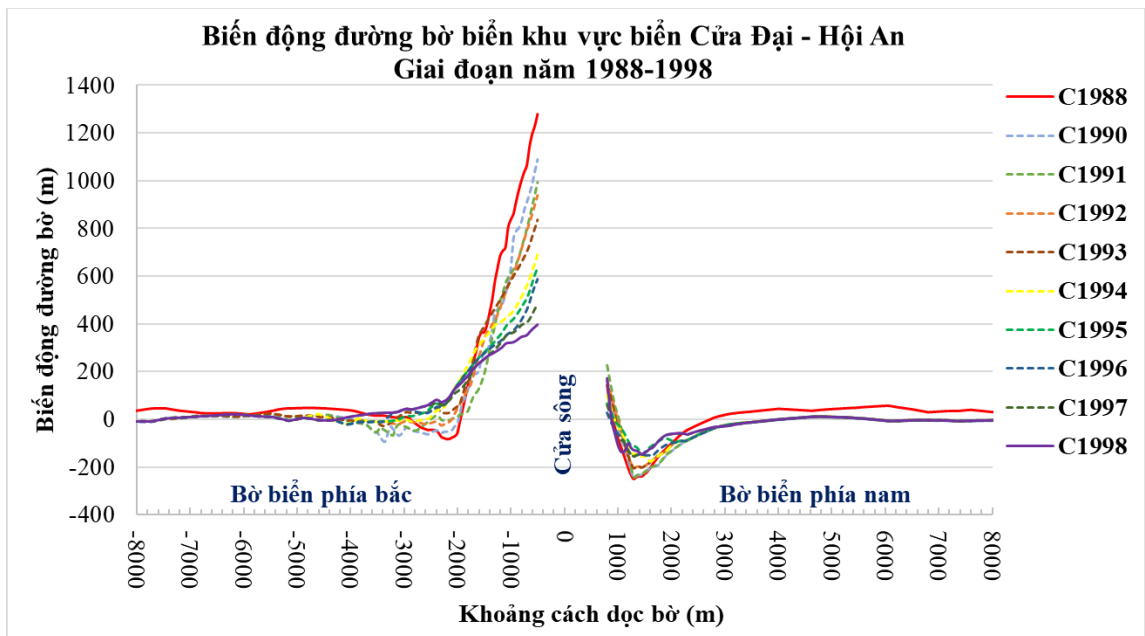
2.2.2.2. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 1988-1998

Kết quả phân tích đường bờ trong giai đoạn này cho thấy sự bồi lắng trong giai đoạn này là khá mạnh. Trong giai đoạn này có sự xuất hiện của đảo cát lớn phía ngoài cửa sông và lệch về phía bắc. Đảo cát này dần dần nối với bờ phía bắc và tiến triển như một phần của bờ biển phía bắc. Lượng cát từ đảo cát được phân tán dọc theo bãi biển lên phía bắc làm cho bờ biển được bồi tụ khá mạnh, vị trí bồi tụ cực đại lên tới 1,2 km tại khu vực sát cửa sông. Bãi biển phía nam bồi tụ nhẹ. Đường bờ phía nam cửa sông ổn định và bồi tụ nhẹ. Về điều kiện thủy văn trong giai đoạn này không xuất

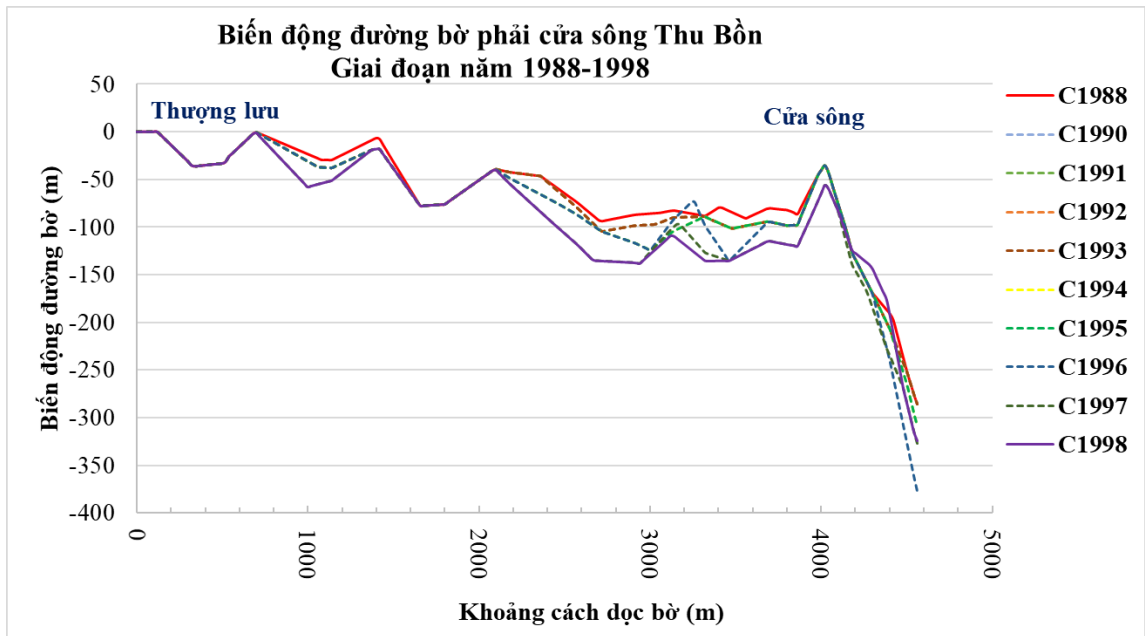
hiện lũ lớn nhưng thường xuyên xảy ra lũ vừa vào năm 1990, 1995, 1996 và 1997 (Hình 2.4÷2.6).



Hình 2.4. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 1988-1998



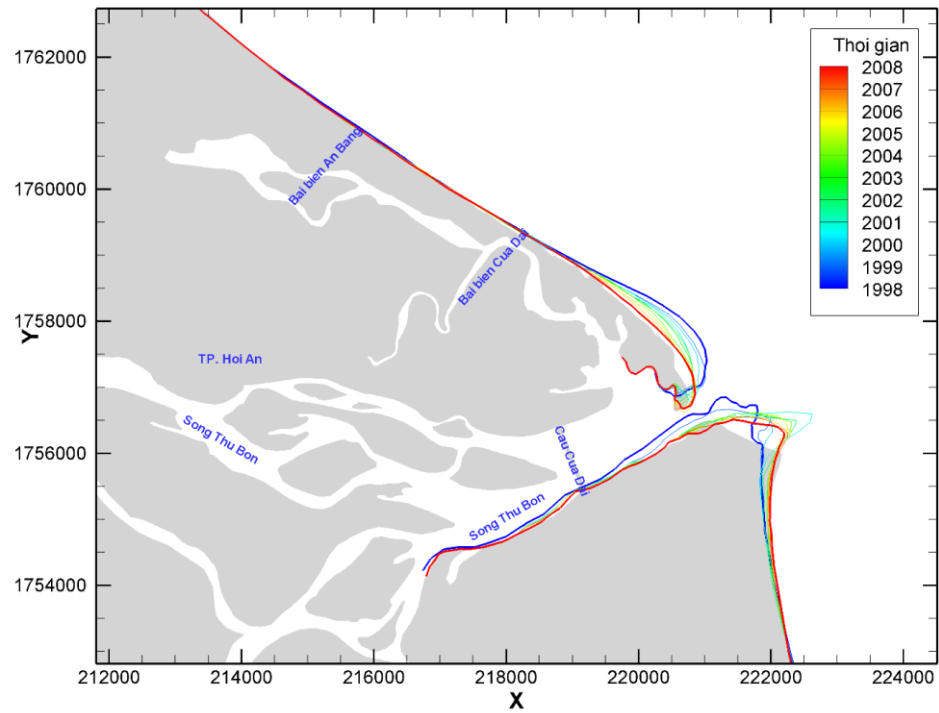
Hình 2.5. Mức độ biến động đường bờ biển phía bắc và phía nam Cửa Đại giai đoạn 1988-1998



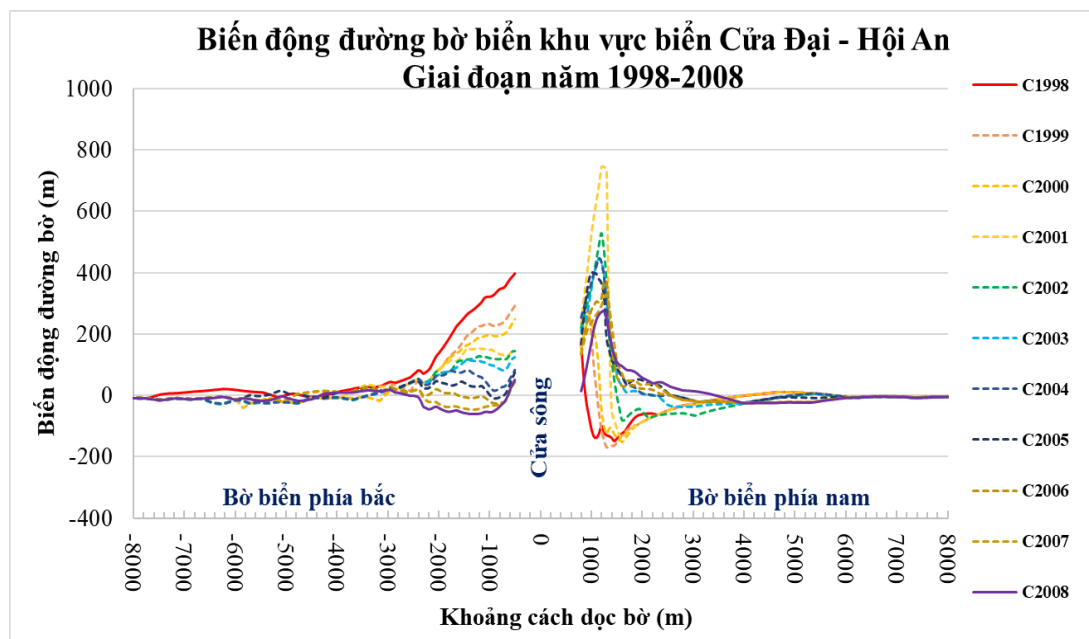
Hình 2.6. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 1988-1998

2.2.2.3. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 1998-2008

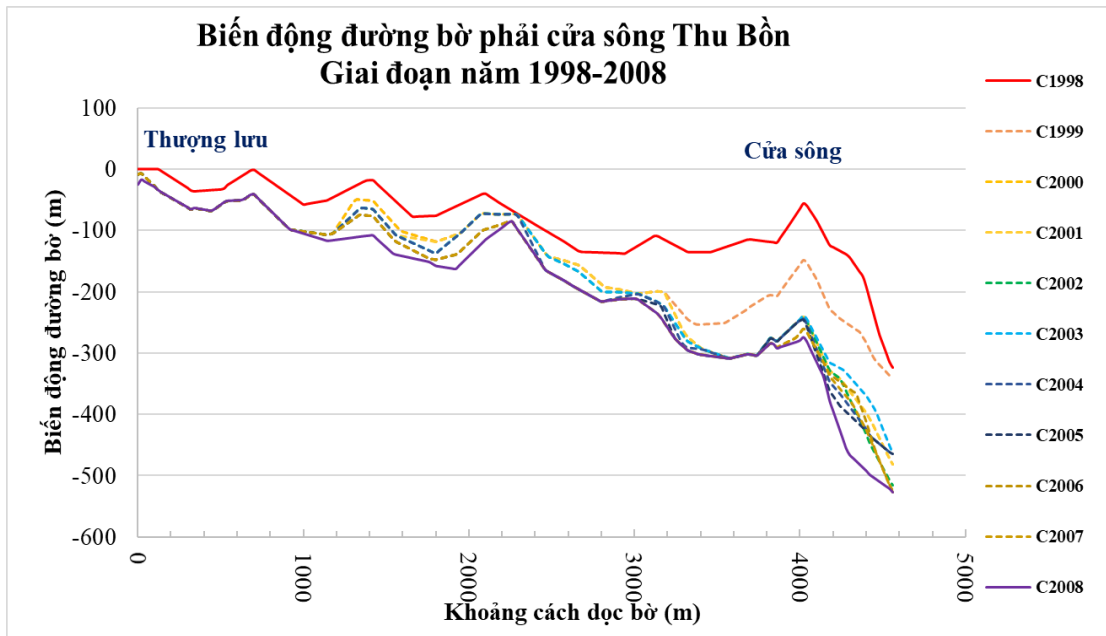
Đây là giai đoạn có sự biến động đường bờ khá mạnh, đặc biệt là khu vực hai bên cửa sông. Phía bờ bắc, tốc độ xói lở mạnh và tương đối đều trong các năm. Trong giai đoạn này, phía bờ bắc bị xói lở tới trên 400 m. Ngược lại với bờ bắc, phía bờ nam hầu hết diễn ra quá trình bồi tụ nhẹ, riêng doi cát sát cửa sông diễn ra quá trình xói. Bờ nam sông Thu Bồn bị xói lở khá mạnh, tốc độ xói lở tăng dần từ thượng nguồn về phía cửa sông. Cực đại khu vực gần cửa sông, bờ sông bị dịch chuyển xuống phía nam trên 300 m. Đặc điểm thủy văn trong giai đoạn này có nhiều đợt lũ lớn diễn ra vào năm 1998, 1999 và các đợt lũ vừa năm 2000, 2001 và 2003 (Hình 2.7÷2.9).



Hình 2.7. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 1998-2008



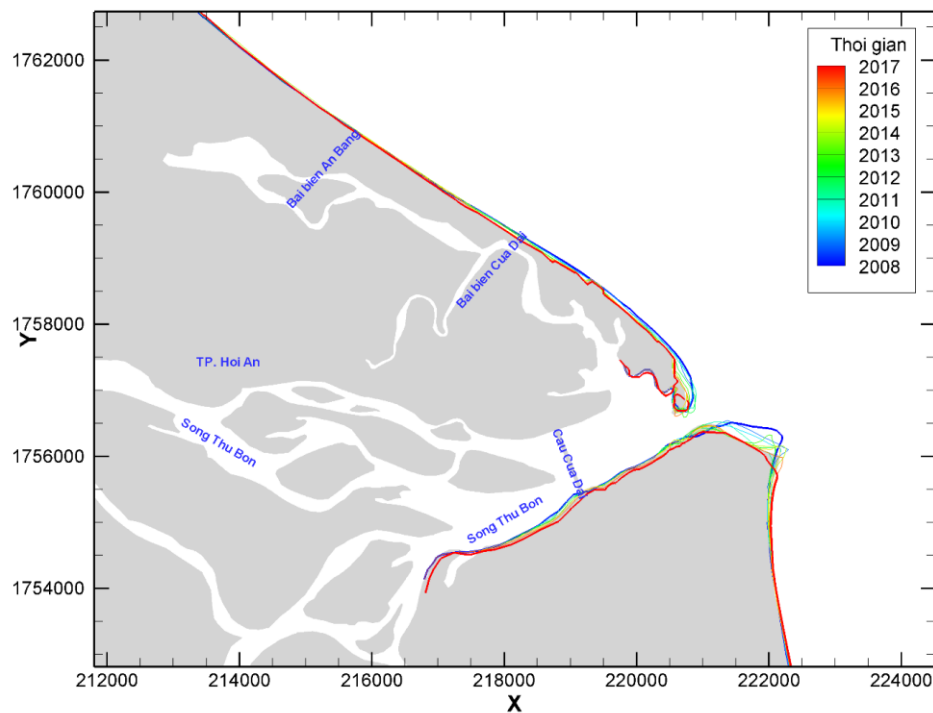
Hình 2.8. Mức độ biến động đường bờ biển phía bắc và phía nam Cửa Đại giai đoạn 1998-2008



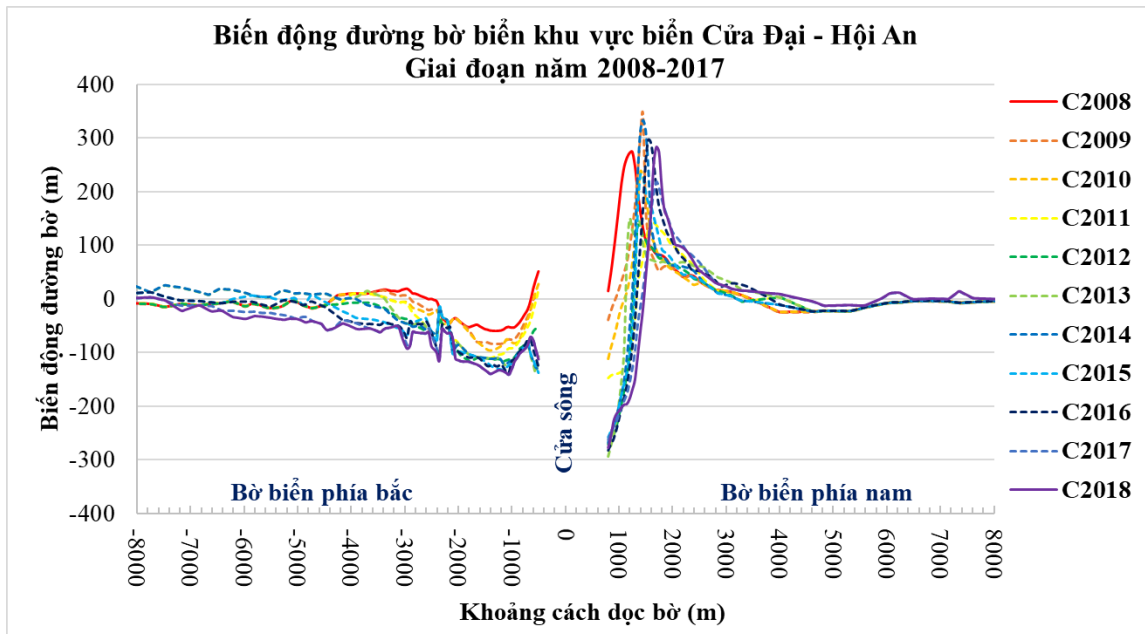
Hình 2.9. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 1998-2008

2.2.2.4. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 2008-2017

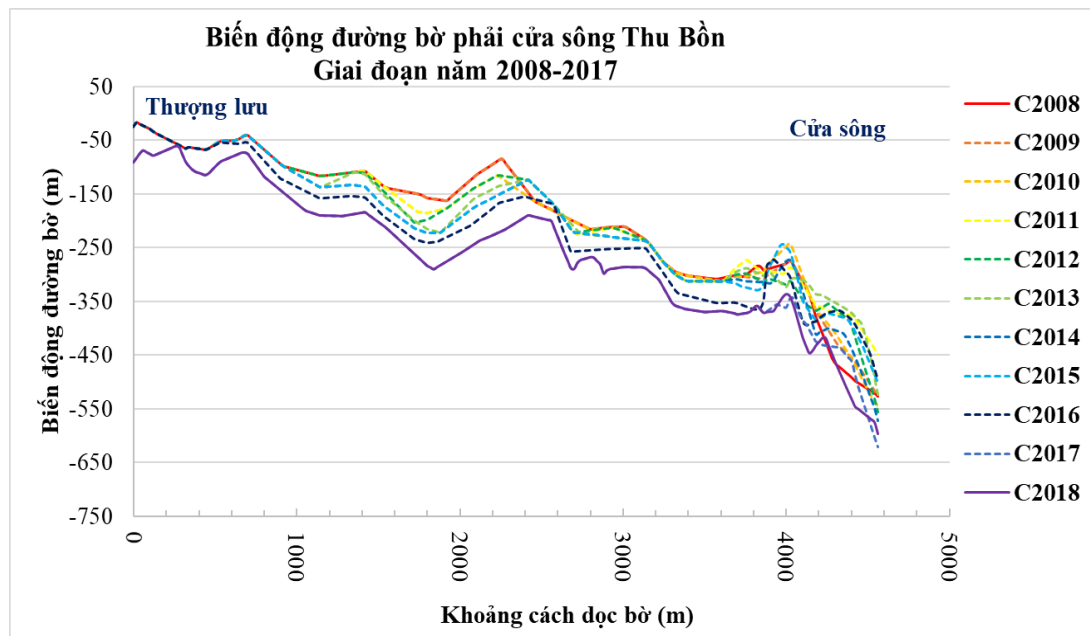
Trong giai đoạn này trên bãi biển phía bắc và khu vực cửa sông tiếp tục trong trạng thái xói lở, khoảng cách xói lở từ 30 m đến 50 m. Bờ biển phía nam duy trì trạng thái ổn định. Bờ nam sông Thu Bồn tiếp tục bị dịch chuyển xuống phía nam, khoảng cách dịch chuyển trung bình 50 m (Hình 2.10÷2.12).



Hình 2.10. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 2008-2017



Hình 2.11. Mức độ biến động đường bờ biển phía bắc và phía nam Cửa Đại giai đoạn 2008-2017

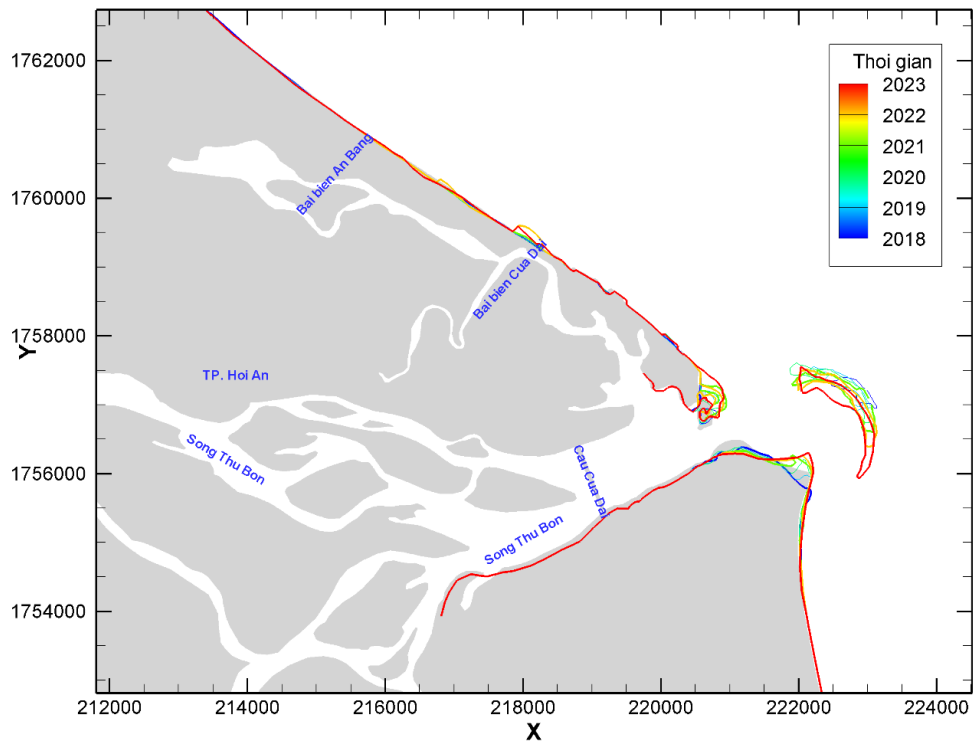


Hình 2.12. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 2008-2017

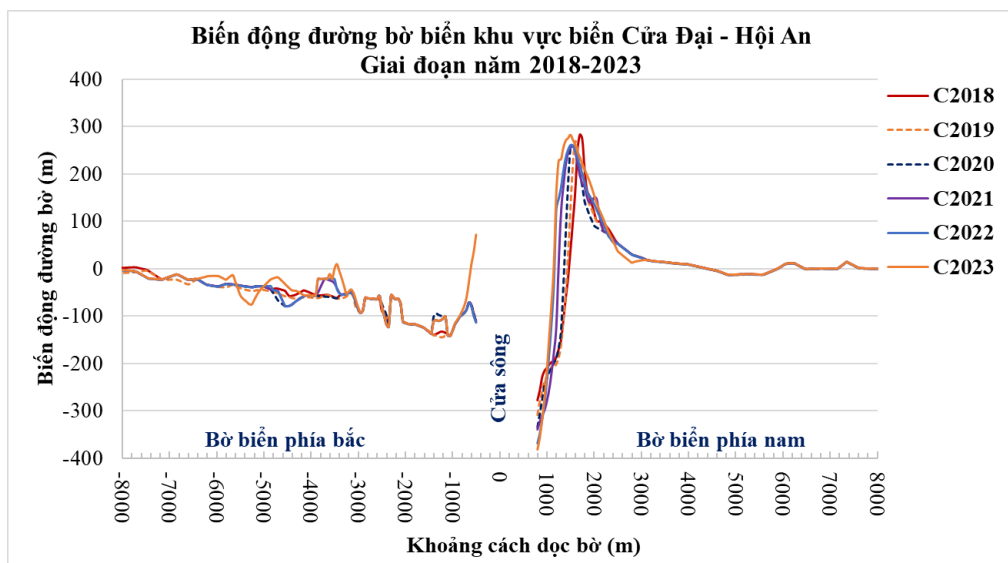
2.2.2.5. Kết quả phân tích biến động đường bờ giai đoạn 2018-2023

Trong giai đoạn này nổi bật là sự xuất hiện của đảo cát nổi phía trước của sông. Sau tác động của lũ lớn tháng 11 năm 2017, một khu vực cồn cát nổi dần hình thành và sang năm 2018 dưới tác động của các yếu tố thủy lực, cồn cát đã tăng chiều cao và nổi lên thành đảo cát. Đảo cát tiếp tục di chuyển dần vào phía cửa sông và lớn dần về kích thước. Khu vực bờ biển phía bắc tiếp tục bị xói lở có nơi đến vài chục mét,

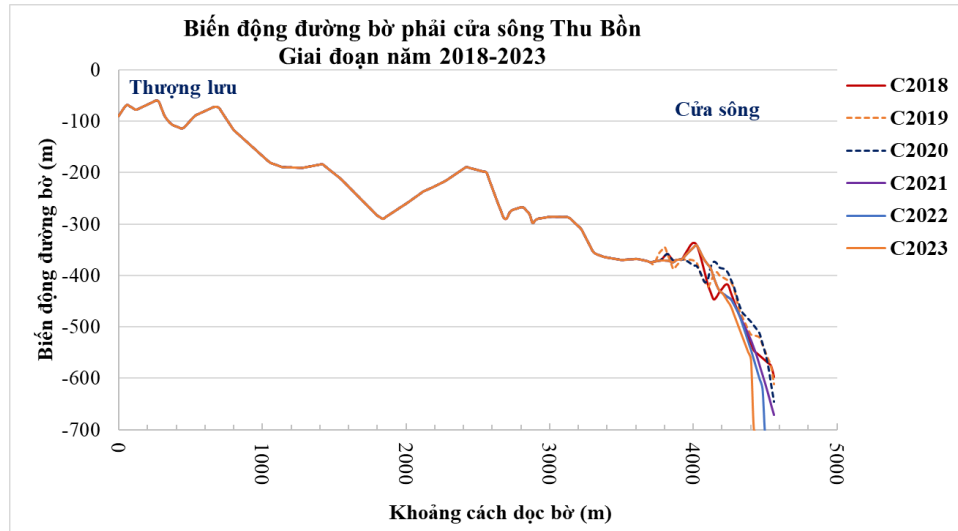
tuy nhiên, trong giai đoạn này giải pháp kè chống xói lở đã được thành phố Hội An tiến hành xây dựng, do đó kết quả chỉ thể hiện được với các khu vực bờ tự nhiên. Tại khu vực cửa sông có diễn biến khá trái ngược, khu vực phía bắc có sự bồi tụ doi cát, trong khi khu vực mũi phía nam bị xói lở nghiêm trọng (Hình 2.13÷2.15).



Hình 2.13. Diễn biến đường bờ khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn giai đoạn 2018-2023



Hình 2.14. Mức độ biến động đường bờ biển giai đoạn 2018-2023



Hình 2.15. Mức độ dịch chuyển bờ phải sông Thu Bồn giai đoạn 2018-2023

Từ kết quả phân tích biến động đường bờ dựa trên phân tích ảnh vệ tinh có thể thấy rằng:

- Khu vực bờ biển phía bắc có sự biến động khá mạnh, xu thế chủ đạo là xói lở bãi biển. Đường bờ biển bị xói lở so với thời điểm bồi cực đại có dao động từ 300 m - 500 m. Trong những năm gần đây quá trình xói lở tại khu vực này vẫn diễn ra tương đối phức tạp.

- Khu vực cửa sông có diễn biến tương đối phức tạp do có sự xuất hiện đảo cát nổi trong các giai đoạn năm 1988 và 2018. Quá trình tiến triển của đảo cát và phân phối bùn cát vào phía bờ cũng phần nào gây ra hiện tượng bồi lắng trong một số thời đoạn.

- Đối với khu vực bờ nam sông Thu Bồn, có sự dịch chuyển khá rõ rệt. Lượng dịch chuyển xuống phía nam trung bình đạt được từ 300 m đến 500 m tại vị trí cửa sông.

- Khu vực bờ biển phía nam khá ổn định trong cả giai đoạn nghiên cứu. Lượng bồi xói trong cả chu kỳ khá nhỏ, xu thế bãi biển bồi lắng chiếm ưu thế.

- Trong những năm gần đây, dưới sự phát triển của các công trình khách sạn du lịch và các công trình chỉnh trị khắc phục xói lở được xây dựng trên phần bãi biển phía bắc, dẫn tới việc giải đoạn bằng ảnh vệ tinh tại các vị trí này không còn hiệu quả. Quá trình xói lở phần bãi phía dưới nước có thể vẫn diễn ra làm thay đổi độ dốc bãi biển dẫn tới sự cố trượt chân công trình. Do đó để đánh giá được vấn đề này cần thiết phải sử dụng phương pháp giải đoạn độ sâu địa hình đáy biển. Nổi bật trong các phương pháp hiện tại là giải đoán địa hình đáy biển sử dụng ảnh vệ tinh và dữ liệu đo đạc.

2.3. Giải đoán địa hình đáy biển từ ảnh vệ tinh và dữ liệu đo đạc

2.3.1. Phương pháp giải đoán địa hình đáy biển từ ảnh vệ tinh

Lý thuyết phương pháp được phát triển bởi Lyzenga (1978, 1981) [69] và được mở rộng phát triển bởi Philpot (1989) và Maritorena et al. (1994) đã chứng minh việc sử dụng các ảnh viễn thám dạng thụ động vào giải đoán địa hình đáy biển khu vực nước nông. Việc sử dụng hai hay nhiều dải tần số có thể bóc tách độ sâu nước khỏi các tác nhân phản xạ do nền đáy, tuy nhiên độ đục của nước có một ảnh hưởng nhất định và cần có những giải pháp.

Phương pháp giải đoán độ sâu nước sử dụng độ phản xạ của từng dải tần của vệ tinh được tính toán với ảnh vệ tinh, tập số liệu hiệu chỉnh và các hiệu chỉnh ảnh hưởng của khí quyển. Độ phản xạ của nước R_w được định nghĩa như sau [69]:

$$R_w = \frac{\pi L_w(\lambda)}{E_d(\lambda)} \quad (2.2)$$

Trong đó L_w là cường độ phản xạ ra khỏi mặt nước, E_d là cường độ đi vào mặt nước, λ là bước sóng tương ứng của tần số ảnh vệ tinh. L_w và R_w là các giá trị thu được trên bề mặt nước. Giá trị R_w tính được từ hiệu chỉnh giá trị tổng phản xạ R_T qua lớp khí quyển và độ phản xạ của bề mặt, được tính toán với các dải cận hồng ngoại với hệ số phản xạ Rayleigh R_r .

$$R_w = R_T(\lambda_i) - Y(\lambda_i)R_T(\lambda_{IR}) - R_r(\lambda_i) \quad (2.3)$$

Trong đó Y là hằng số hiệu chỉnh, chỉ số i biểu thị các kênh bước sóng nhìn thấy, chỉ số IR biểu thị cho kênh bước sóng cận hồng ngoại. R_T xác định theo phương trình sau [39]:

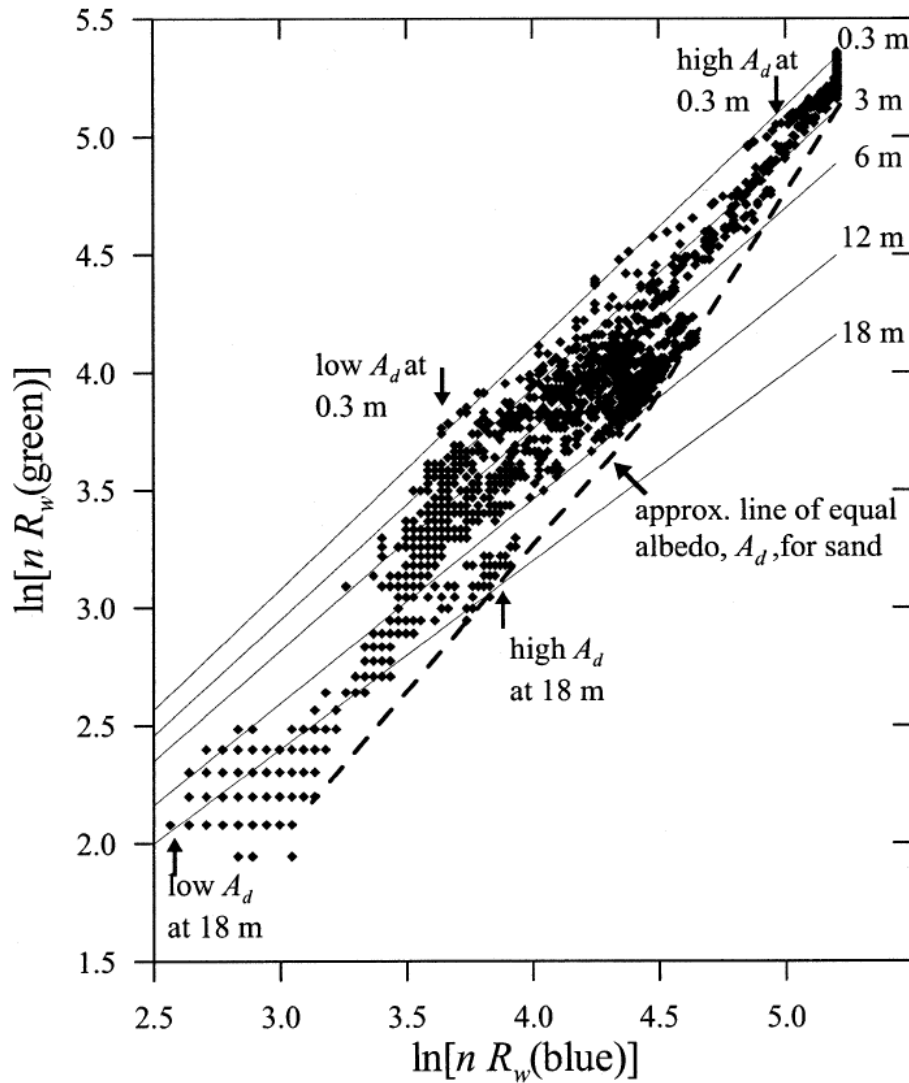
$$R_T(\lambda_i) = \frac{\pi L_T(\lambda_i)/E_0(\lambda_i)}{(1/r^2)T_0(\lambda_i)T_1(\lambda_i)\cos\theta_0} \quad (2.4)$$

Trong đó: L_T là tổng bức xạ đo được tại vệ tinh, E_0 là hệ số mặt trời, r là khoảng cách từ trái đất và mặt trời tính theo đơn vị thiên văn, θ_0 góc nghiêng của trái đất, T_0 và T_1 là hệ số chuyển đổi cho mặt trời tới trái đất và trái đất tới mặt trời.

Các hiệu chỉnh đối với ảnh hưởng của khí quyển đòi hỏi nhiều các tham số về thiên văn tại thời điểm ảnh vệ tinh được chụp cũng như các thông số về khí quyển tại cùng thời điểm. Để giải quyết vấn đề này, công cụ được cung cấp từ cơ quan vụ trụ châu Âu SNAP cho phép phân tích tính toán các hiệu ứng khí quyển đối với từng ảnh vệ tinh Sentinel-2 thông qua mô đun S Sen2Cor. Các ảnh vệ tinh chụp ở lớp trên của khí quyển (TOA) được chuyển về lớp dưới khí quyển (BOA).

- Phương pháp tỉ lệ hàm số mũ:

Phương pháp dựa trên nguyên lý cơ bản, đối với mỗi dải tần số khác nhau, độ hấp thụ của cột nước là khác nhau. Do đó, có sự khác biệt về giá trị hấp thụ của dải tần này so với dải tần khác. Sự suy giảm cường độ tuân thủ theo quy luật hàm mũ. Hình 2.16 chỉ ra các giá trị Log thay đổi theo độ sâu của dải tần số ánh sáng xanh lục (Green) và xanh lam (Blue).



Hình 2.16. Quan hệ giữa $\ln[nR_w(\text{green})]$ và $\ln[nR_w(\text{blue})]$ [69]

Khi độ sâu tăng lên, độ phản xạ của cả hai dải tần đều giảm, $\ln(R_w)$ của dải xanh lục có độ hấp thụ cao hơn sẽ giảm nhanh hơn $\ln(R_w)$ của dải xanh lam có độ hấp thụ nhỏ hơn. Theo đó, tỉ lệ giữa màu xanh lam và xanh lá sẽ tăng lên. Một tỉ lệ chuyển đổi ngầm đã được bù đắp cho các biến đổi do ảnh hưởng của lớp đáy. Sự thay đổi của lớp đáy có ảnh hưởng tương tự đến các dải tần số, nhưng những thay đổi độ sâu ảnh hưởng đến dải hấp thụ cao nhiều hơn. Do đó, sự thay đổi về độ sâu gây ảnh hưởng lớn hơn nhiều so với sự thay đổi bề mặt đáy. Đáp ứng các điều kiện trên, Phương

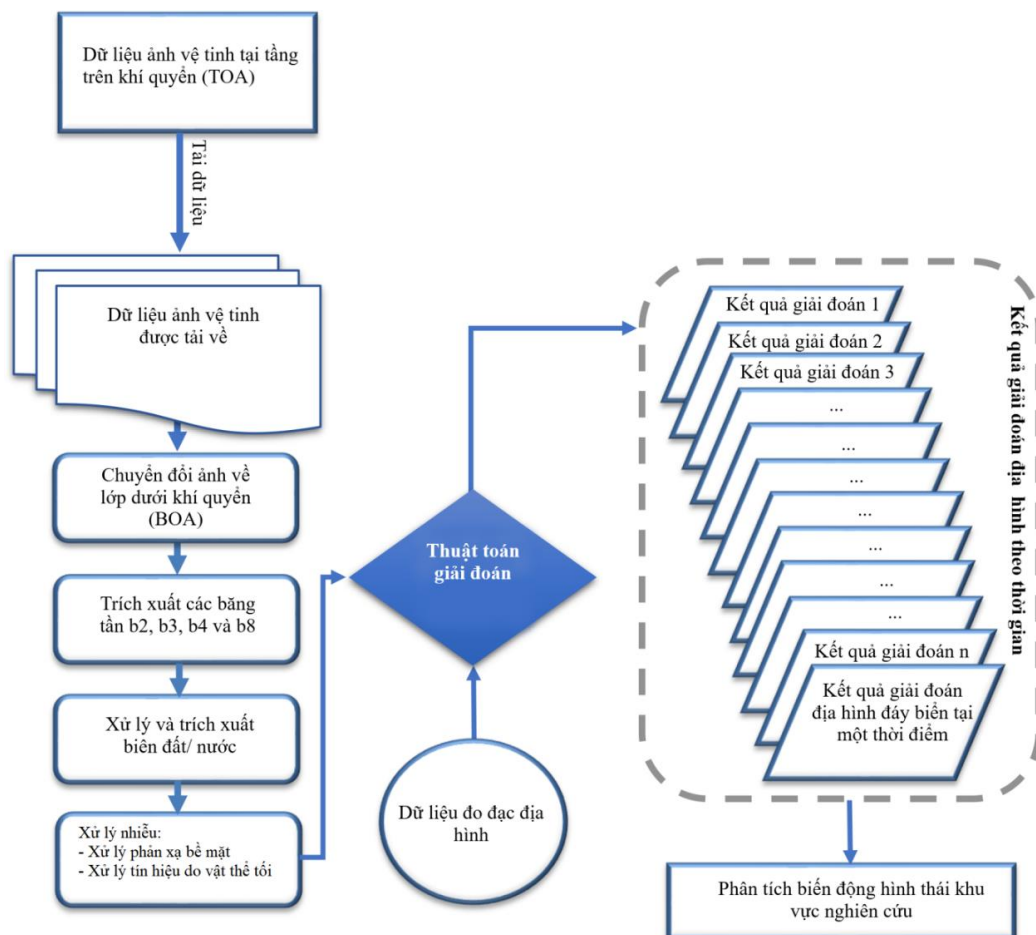
trình xác định độ sâu đáy loại trừ các ảnh hưởng của bề mặt, được xác định theo phương trình:

$$Z = m_1 \frac{\ln(nR_w(\lambda_i))}{\ln(nR_w(\lambda_j))} - m_0 \quad (2.5)$$

Trong đó λ_i tương ứng với bước sóng dải màu xanh lam, λ_j tương ứng với bước sóng màu xanh lá. m_1 hệ số thực nghiệm thu được từ phân tích hiệu chỉnh với số liệu độ sâu nước thực đo, n hằng số cố định đảm bảo cho giá trị $\ln$ sẽ dương trong bất kỳ hoàn cảnh nào (trong nghiên cứu này $n=1000$) và m_0 hệ số tương ứng tại độ sâu nước bằng 0. Tỷ lệ trên tạo ra mối quan hệ tuyến tính với độ sâu.

Trong quá trình giải đoán, cần xác định ranh giới giữa đất và nước bằng phương pháp phổ biến áp dụng đó là NDWI. Vị trí ranh giới này giúp xác định khu vực đất và nước trong quá trình giải đoán. Các điểm ảnh cũng là cơ sở để xác định hệ số m_0 đối với mỗi ảnh chụp. Hệ số m_1 sẽ được xác định thông qua dữ liệu đo đạc địa hình thực tế tại thời gian gần với ảnh chụp nhất.

Hình 2.17 đưa ra sơ đồ các bước giải đoán địa hình đáy biển từ ảnh vệ tinh Sentinel-2.



Hình 2.17. Sơ đồ các bước giải đoán độ sâu đáy biển từ ảnh vệ tinh Sentinel-2

Ảnh vệ tinh được tải về ở dưới dạng ảnh chụp tại lớp trên cùng của khí quyển (TOA). Trước khi tiến hành giải đoán, các ảnh được đưa về dạng ảnh tại lớp dưới cùng của khí quyển (BOA) bằng công cụ SNAP. Các bước đọc dữ liệu ảnh vệ tinh, phân tích và hiển thị được thực hiện trên mã nguồn mở tự phát triển bằng ngôn ngữ lập trình Matlab và Fortran.

2.3.2. Kết quả giải đoán địa hình đáy biển bằng ảnh vệ tinh và phân tích biến động đáy biển

Để kiểm chứng độ tin cậy của thuật toán giải đoán độ sâu bằng tỷ số logarit các kênh phổ, luận án đã tiến hành kiểm định chéo (cross-validation) với dữ liệu đo sâu hồi âm trực tiếp trong 4 đợt khảo sát thực địa (2016-2018).

Kết quả phân tích hồi quy cho thấy mối tương quan chặt chẽ giữa tỷ số phổ $\ln(\text{Blue})/\ln(\text{Green})$ và độ sâu thực đo, với hệ số tương quan R đạt từ 0.73 đến 0.92,. Các chỉ số sai số thống kê nằm trong giới hạn cho phép (RMSE từ 0.45m đến 0.66m), khẳng định phương pháp này đủ độ tin cậy để khôi phục lại địa hình đáy biển tại các thời điểm quá khứ thiếu số liệu đo đạc, cũng như giám sát các khu vực bãi ngầm khó tiếp cận."

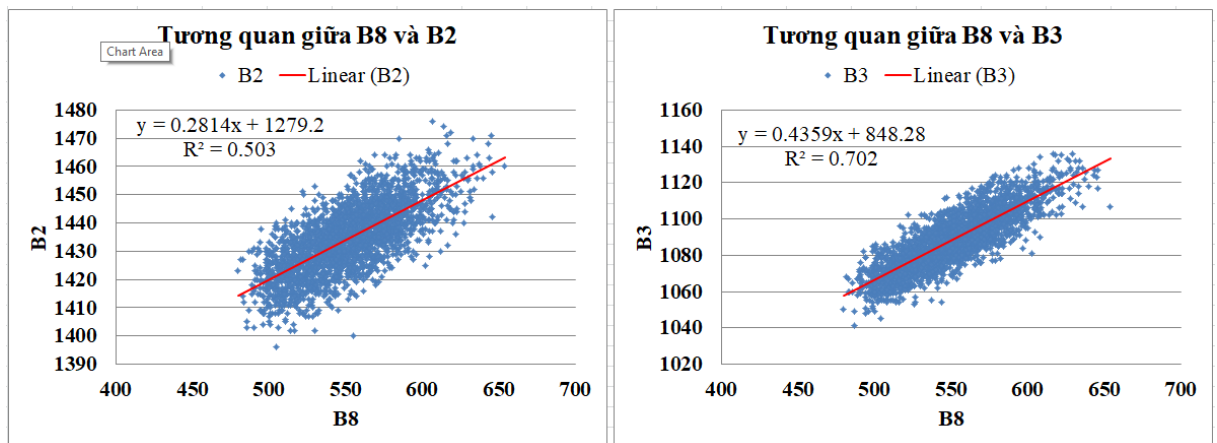
Dưới đây là các phân tích chi tiết cho từng trường hợp dữ liệu:

2.3.2.1. Kết quả kiểm định với chuỗi đo đạc tháng 3 năm 2016

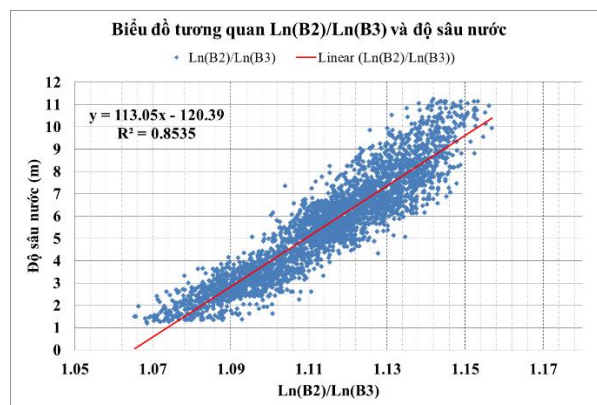
Số liệu độ sâu đáy biển được đo đạc ngày 08 tháng 3 năm 2016 bằng thiết bị đo sâu hồi âm, kết quả đo đạc được chuyển về cao độ mốc quốc gia và hiệu chỉnh thủy triều với số liệu đo đạc mực nước tự động tại trạm Hội An. Hình 2.18÷2.20 đưa ra vết đo sâu hồi âm tại khu vực ven biển Cửa Đại - Hội An.



Hình 2.18. Số liệu đo đặc độ sâu khu vực ven biển Cửa Đại - Hội An ngày 8 tháng 3 năm 2016

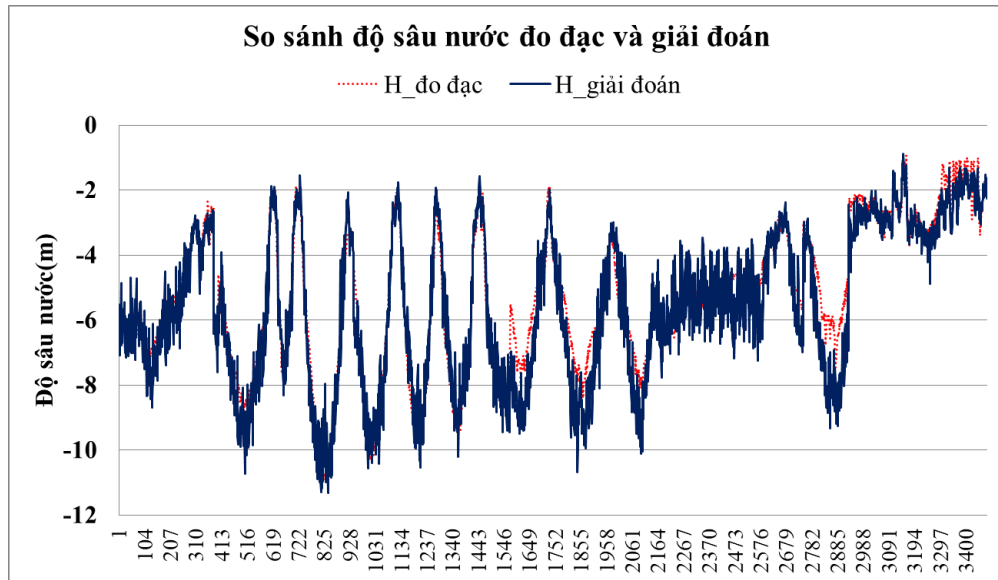


Hình 2.19. Mối quan hệ giữa bằng tần B8 với B2 và B8 với B3

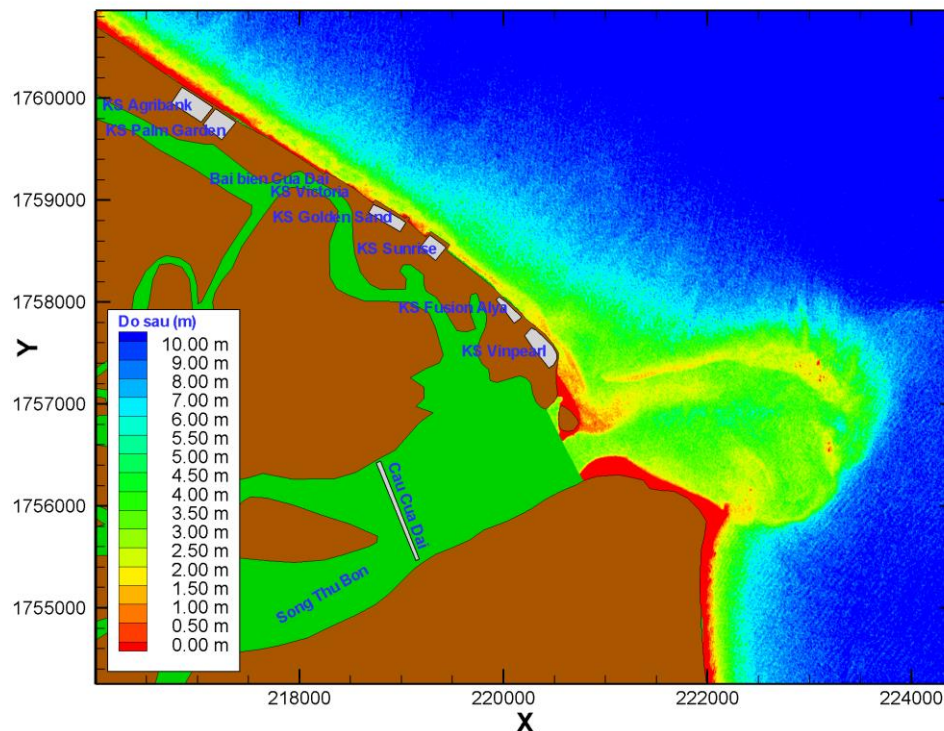


Hình 2.20. Quan hệ tuyến tính giữa độ sâu nước và $\ln(B2)/\ln(B3)$

Các hệ số của mô hình giải đoán thu được từ quan hệ tuyến tính đó là: $m_1 = 113,05$ và $m_0 = 120,39$. hệ số tương quan $R^2 = 0,8535$. Từ các hệ số tiến hành giải đoán địa hình đáy biển cho khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn trong thời điểm tháng 3 năm 2016. Hình 2.21 đưa ra so sánh độ sâu nước đo đạc và giải đoán dọc theo đường quét bằng máy đo sâu hồi âm. Hình 2.22 đưa ra kết quả giải đoán độ sâu đáy biển khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn tháng 3 năm 2016.



Hình 2.21. So sánh độ sâu nước đo đạc và giải đoán tháng 10 năm 2016



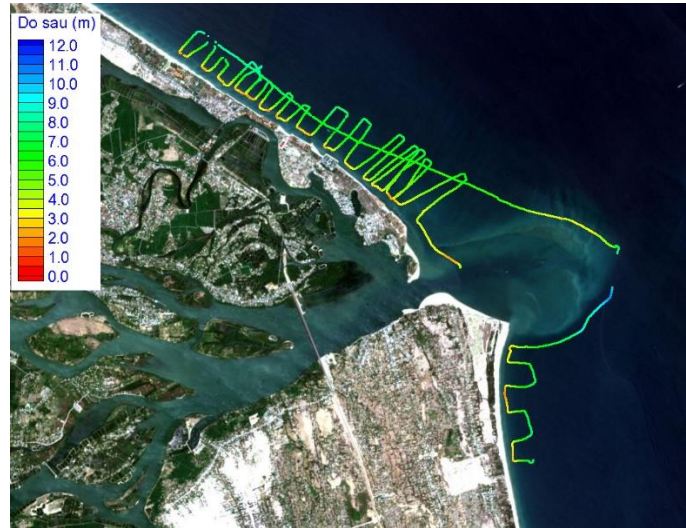
Hình 2.22. Kết quả giải đoán địa hình đáy biển khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn tháng 3 năm 2016

2.3.2.2. Kết quả kiểm định với chuỗi đo đạc tháng 10 năm 2016

Ảnh vệ tinh Sentinel-2 và số liệu đo đạc ngày 21 tháng 10 năm 2016 được sử dụng giải đoán địa hình đáy biển.

Mức nước đo đạc tại trạm Hội An tại thời điểm chụp ảnh là 0,27 m.

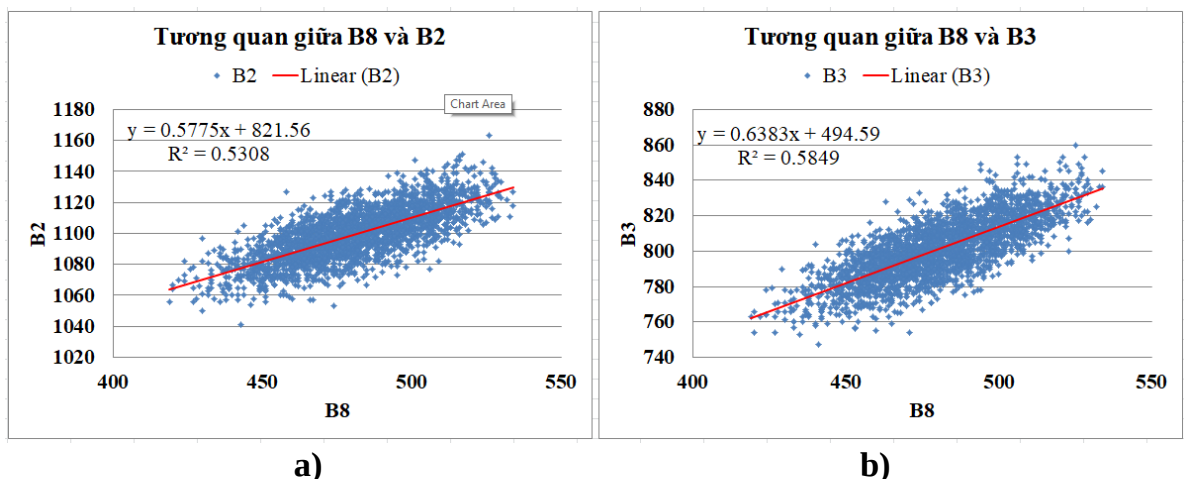
Hình 2.23 đưa ra ảnh vệ tinh và độ sâu nước đo đạc bằng máy đo sâu hồi âm khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn.



Hình 2.23. Ảnh vệ tinh và độ sâu nước đo đạc tháng 10 năm 2016

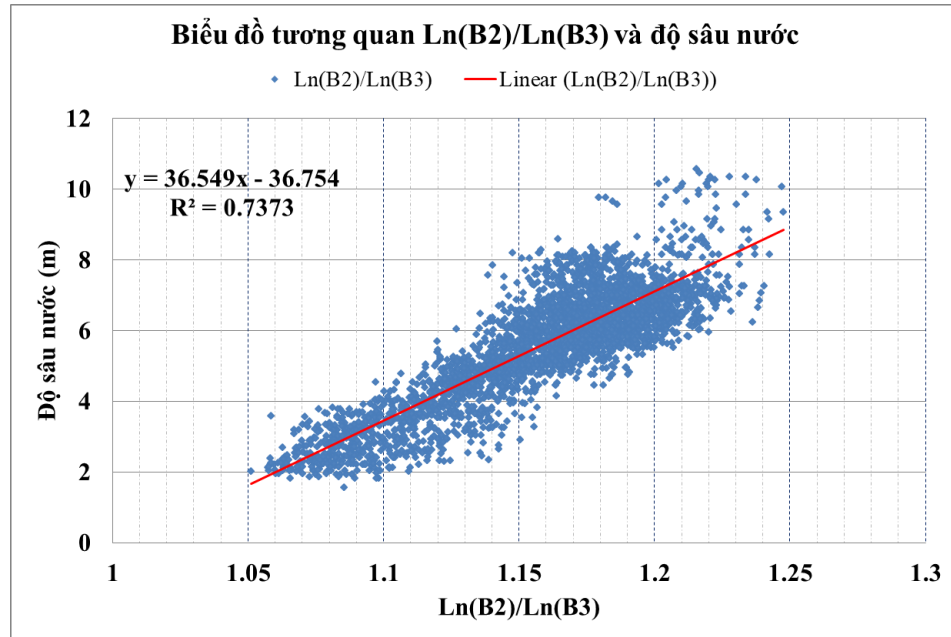
Ảnh vệ tinh được cung cấp ở dạng TOA, được chuyển về tầng dưới cùng khí quyển bằng công cụ Sen2Cor của SNAP.

Để phân tách phần đất và biển, hai dải băng tần B3 và B8 được sử dụng theo công thức (10). Để loại bỏ sự phản xạ từ bề mặt, các băng tần B2, B3, B4 và B8 được sử dụng hiệu chỉnh hiệu ứng phản xạ bề mặt do sóng gây ra. Hình 2.24 đưa ra mối quan hệ giữa băng tần B2 (màu xanh lam), B3 (màu xanh lục) và băng tần B8 (cận hồng ngoại).



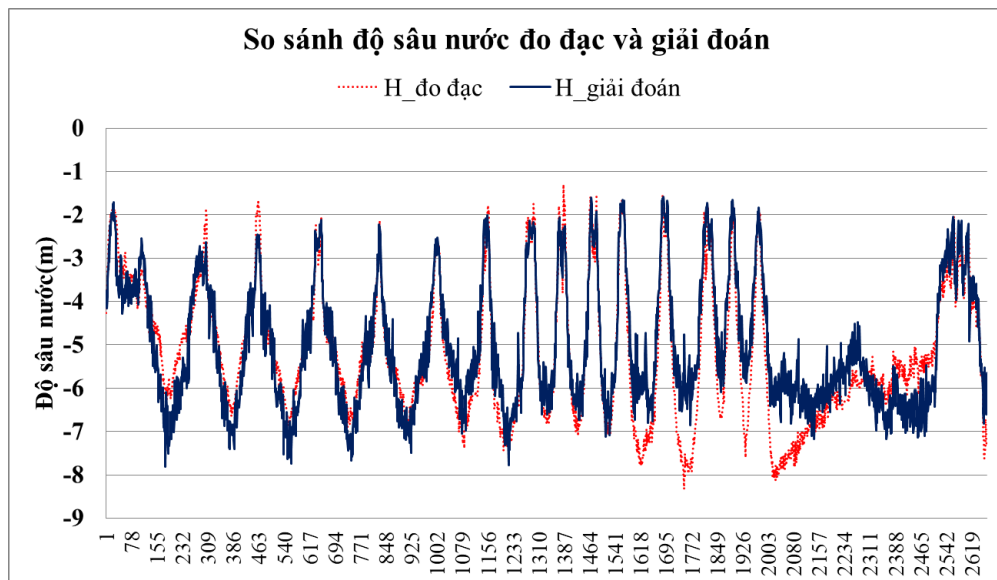
Hình 2.24. Mối quan hệ giữa băng tần B8 với B2 (a) và B8 với B3 (b)

Sử dụng số liệu đo đạc và tính toán tỉ lệ $\ln(B2)/\ln(B3)$ ta xác định được quan hệ tuyến tính. Hình 2.25 đưa ra quan hệ tuyến tính giữa độ sâu nước và tỉ số $\ln(B2)/\ln(B3)$.

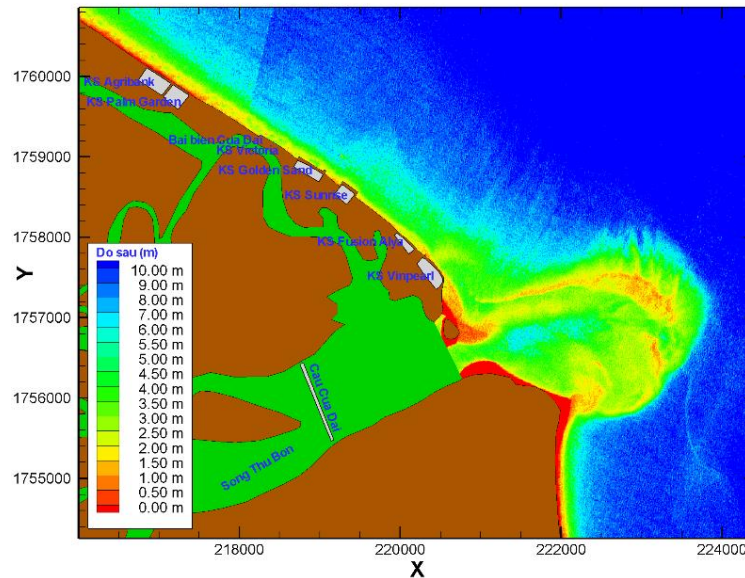


Hình 2.25. Quan hệ tuyến tính giữa độ sâu nước và $\ln(B2)/\ln(B3)$

Các hệ số của mô hình giải đoán thu được từ quan hệ tuyến tính đó là: $m_1=36,549$ và $m_0=36,754$, hệ số tương quan $R^2 = 0,737$. Từ các hệ số tiến hành giải đoán địa hình đáy biển cho khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn trong thời điểm tháng 10 năm 2016. Hình 2.26 đưa ra so sánh độ sâu nước đo đạc và giải đoán dọc theo đường quét bằng máy đo sâu hồi âm. Hình 2.27 đưa ra kết quả giải đoán độ sâu đáy biển khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn tháng 10 năm 2016.



Hình 2.26. So sánh độ sâu nước đo đạc và giải đoán tháng 10 năm 2016



Hình 2.27. Kết quả giải đoán địa hình đáy biển khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn tháng 10 năm 2016

2.3.2.3. Kiểm định với chuỗi đo đặc tháng 3 năm 2017

Dữ liệu địa hình đáy biển đo theo vệ tinh bằng máy đo sâu hồi âm ngày 21 tháng 3 năm 2017 được sử dụng kiểm định với ảnh vệ tinh chụp ngày 08 tháng 5 năm 2017. Ảnh vệ tinh Sentinel-2A chụp mang số hiệu S2A_MSIL1C_20170508T032321_N0205_R075_T49PBT_20170508T032324.SAFE. Ảnh có độ che phủ mây là 3%, tại khu vực nghiên cứu độ che phủ mây là 0%.

Mức nước đo đạc tại trạm Hội An tại thời điểm ảnh chụp là 0,1 m.

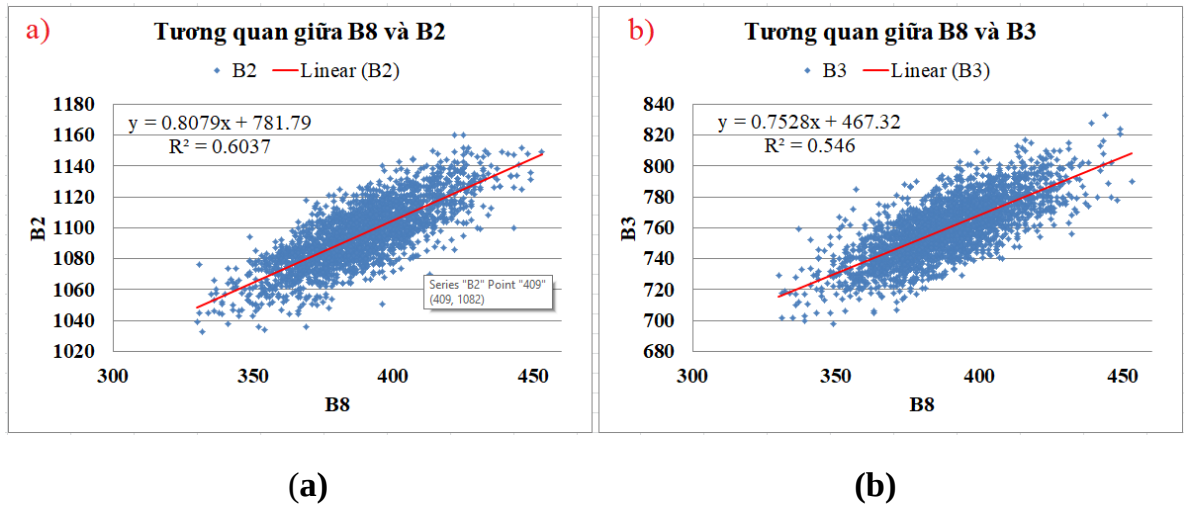
Hình 2.28 đưa ra sơ hình ảnh vệ tinh chụp khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn do vệ tinh Sentinel-2B chụp ngày 08 tháng 5 năm 2017 và vật đo đặc địa hình đáy biển bằng máy đo sâu hồi âm.



Hình 2.28. Hình ảnh khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn và vết đo sâu hồi âm

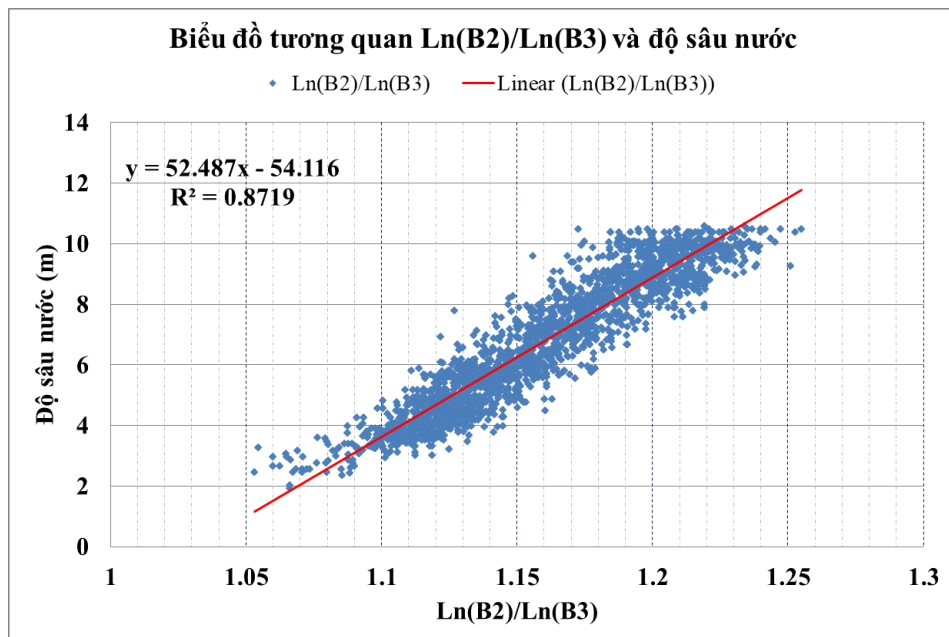
Ảnh vệ tinh tại lớp trên cùng khí quyển (TOA) được chuyển về lớp dưới cùng khí quyển (BOA) bằng công cụ hiệu chỉnh do khí quyển (Sen2Cor) của SNAP.

Để loại bỏ sự phản xạ từ bề mặt, các băng tần B2, B3, B4 và B8 được sử dụng hiệu chỉnh hiệu ứng phản xạ bề mặt do sóng gây ra. Hình 2.29 đưa ra mối quan hệ giữa băng tần B2 (màu xanh lam), B3 (màu xanh lục) và băng tần B8 (cận hồng ngoại).



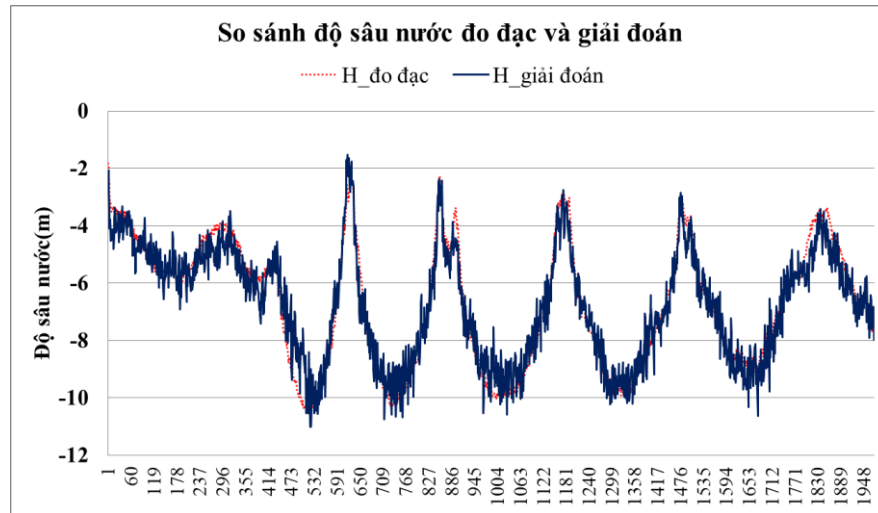
Hình 2.29. Mối quan hệ giữa băng tần B8 với B2 (a) và B8 với B3 (b)

Sử dụng số liệu đo đạc và tính toán tỉ lệ $\ln(B2)/\ln(B3)$ ta xác định được quan hệ tuyến tính. Hình 2.30 đưa ra quan hệ tuyến tính giữa độ sâu nước và tỉ số $\ln(B2)/\ln(B3)$.

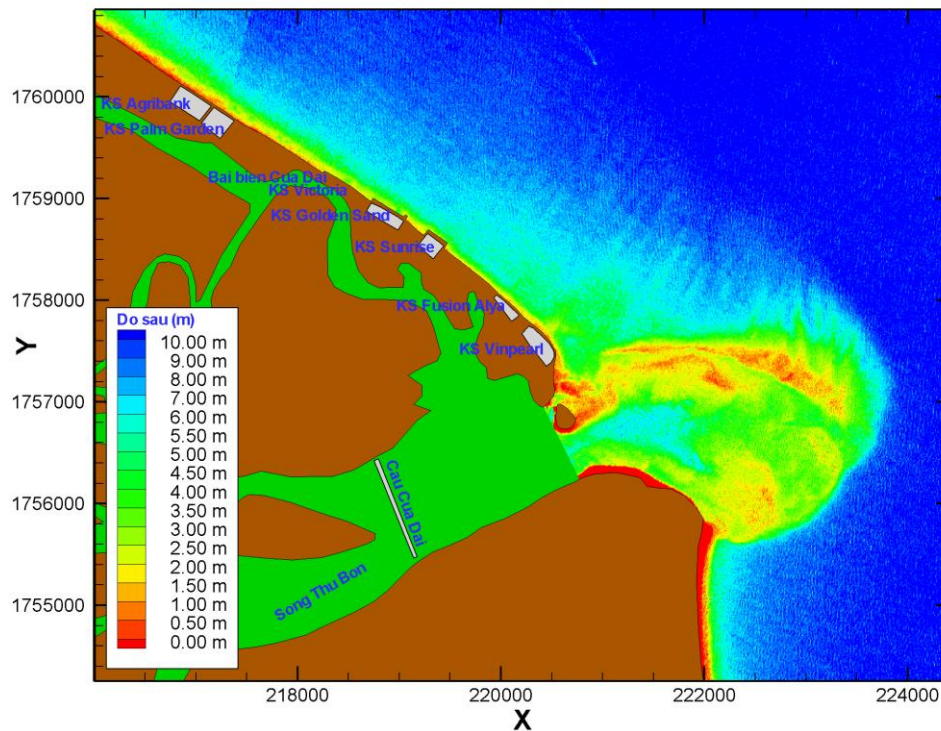


Hình 2.30. Quan hệ tuyến tính giữa độ sâu nước và $\ln(B2)/\ln(B3)$

Các hệ số của mô hình giải đoán thu được từ quan hệ tuyến tính đó là: $m_1=52,487$ và $m_0=54,116$. hệ số tương quan $R^2 = 0,872$. Từ các hệ số tiến hành giải đoán địa hình đáy biển cho khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn trong thời điểm tháng 3 năm 2017. Hình 2.31 đưa ra so sánh độ sâu nước đo đạc và giải đoán dọc theo đường quét bằng máy đo sâu hồi âm. Hình 2.32 đưa ra kết quả giải đoán độ sâu đáy biển khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn tháng 5 năm 2017.



Hình 2.31. So sánh độ sâu nước đo đạc và giải đoán tháng 5 năm 2017



Hình 2.32. Kết quả giải đoán địa hình đáy biển khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn tháng 5 năm 2017

Kết quả đánh giá sai số với hai hệ số BIAS và RMSE là: -0,032 và 0,662.

2.3.2.4. Kiểm định với chuỗi đo đặc tháng 9 năm 2018

Dữ liệu đo đặc độ sâu ngày 24 tháng 8 năm 2019 được sử dụng kiểm định đối với ảnh chụp vệ tinh ngày 25 tháng 8 năm 2018. Ảnh do vệ tinh 2B chụp với số hiệu S2B_MSIL1C_20180925T030539_N0206_R075_T49PBT_20180925T061012.SAFE, có độ che phủ mây thấp, tại khu vực nghiên cứu độ che phủ mây là 0 %.

Số liệu đo đặc mực nước tại trạm Hội An tại cùng thời điểm vệ tinh chụp ảnh được sử dụng trong mô hình giải đoán. Mực nước tại thời điểm 10 giờ 05 phút ngày 25 tháng 9 năm 2018 là 0,2 m.

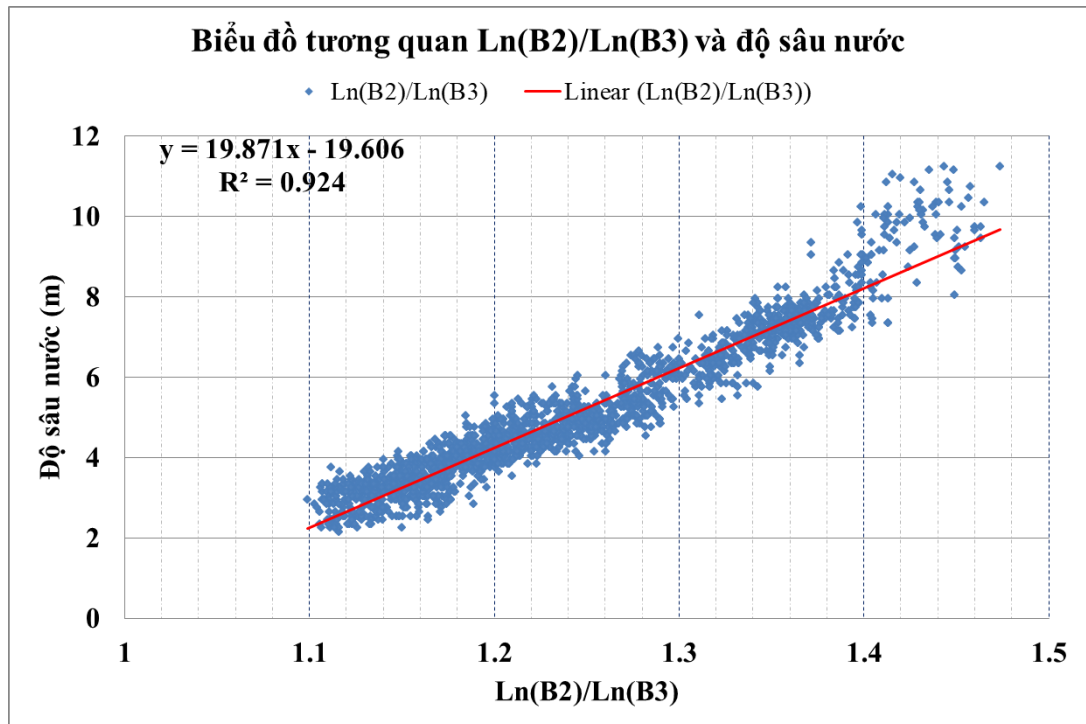
Hình 2.33 đưa ra hình ảnh khu vực ven biển và cửa sông Thu Bồn do vệ tinh Sentinel-2B chụp ngày 25 tháng 9 năm 2018 và vết đo độ sâu bằng máy hồi âm tại khu vực ven biển cửa sông Thu Bồn.



Hình 2.33. Ảnh vệ tinh Sentinel-2 và vết đo độ sâu hồi âm khu vực cửa sông Thu Bồn ngày 25 tháng 8 năm 2018

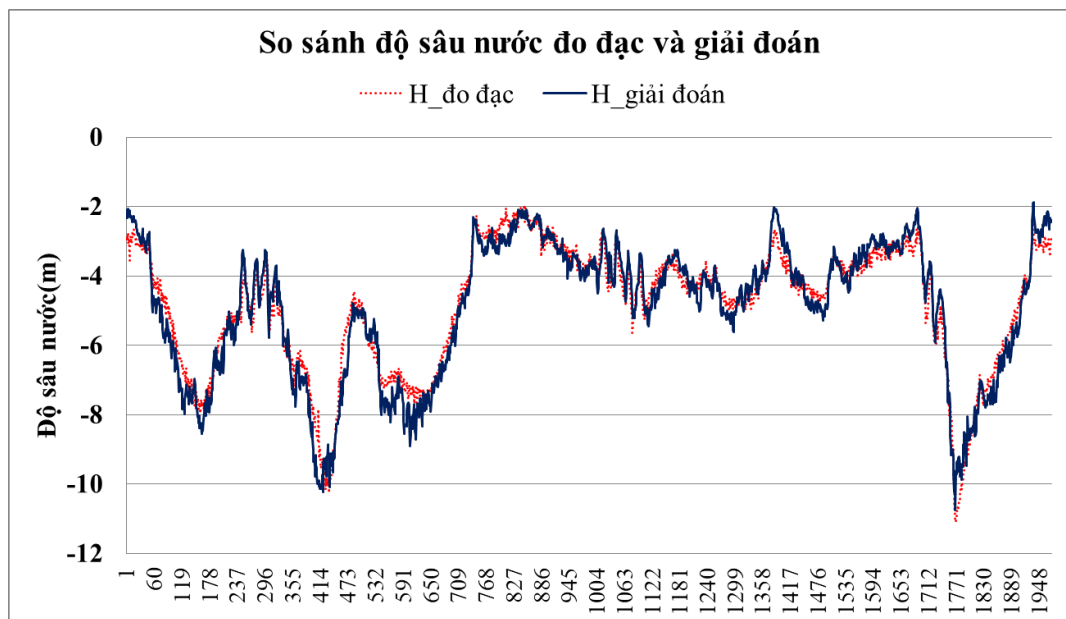
Sử dụng mô đun Sen2Cor chuyển ảnh vệ tinh chụp tại tầng trên khí quyển (TOA) về tầng dưới khí quyển (BOA). Các bước xử lý phân tách khu vực nước-biển, xử lý tín hiệu phản xạ do bề mặt và các vật thể tối dưới đáy được tiến hành.

Hình 2.34 đưa ra sơ đồ tương quan tỉ lệ $\ln(B)/\ln(G)$.



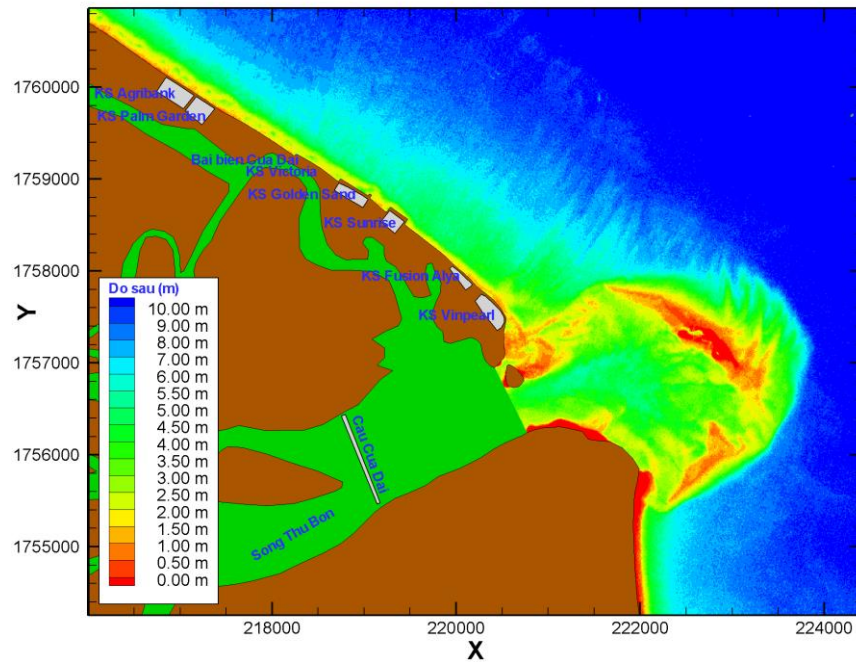
Hình 2.34. Sơ đồ tương quan tỉ lệ $\ln(B)/\ln(G)$ và độ sâu nước

Trên hình 2.34 cho thấy mối tương quan giữa tỉ số $\ln(B)/\ln(G)$ và độ sâu nước thời gian đo đạc ngày 25 tháng 9 năm 2018 là khá tốt với hệ số tương quan $R=0,924$. Từ phương trình xác định tương quan tuyến tính có thể xác định được hệ số $m_1 = 19,871$ và $m_0 = 19,606$. Tỉ số $\ln(B)/\ln(G)$ tại vị trí độ sâu nước bằng 0 m xấp xỉ bằng 0,9867. Hình 2.35 đưa ra biểu đồ so sánh kết quả giải đoán địa hình đo đạc và giải đoán dọc theo vết đo sâu hồi âm.



Hình 2.35. So sánh kết quả giải đoán và đo đạc địa hình đáy biển dọc theo vết đo hồi âm ngày 25 tháng 9 năm 2018

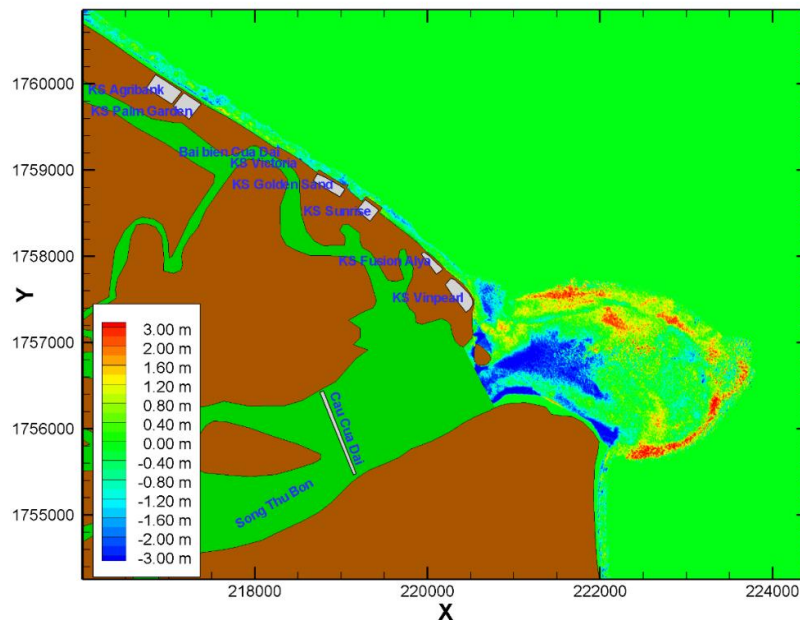
Kết quả giải đoán địa hình với ảnh vệ tinh ngày 25 tháng 9 năm 2018 với hai chỉ số BIAS và RMSE: BIAS= -0,088 và RMSE = 0,459 thể hiện trên Hình 2.36.



Hình 2.36. Hình Bản đồ địa hình đáy biển khu vực ven biển Cửa Đại giải đoán từ ảnh Sentinel-2 ngày 25 tháng 9 năm 2018

2.3.2.5. Kết quả phân tích biến động bãi biển khu vực Cửa Đại Hội An

- Biến động hình thái giai đoạn tháng 3 năm 2016 đến tháng 3 năm 2017 (Hình 2.37):

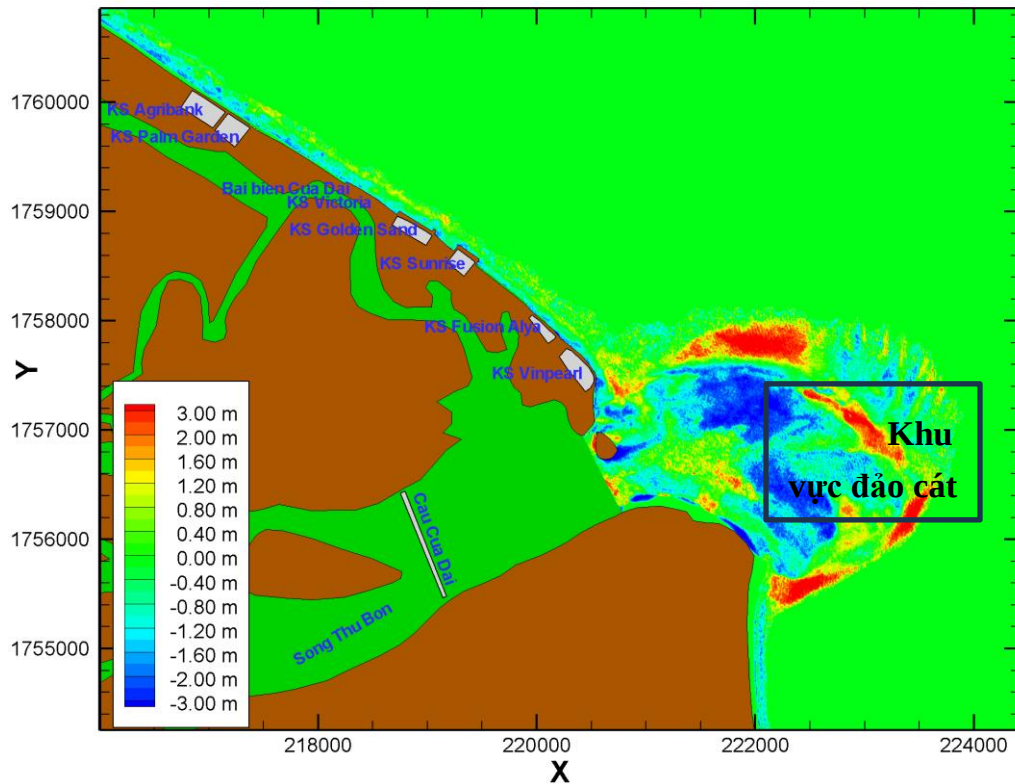


Hình 2.37. Bản đồ biến động bãi biển của sông Thu Bồn từ tháng 3 năm 2016 đến tháng 3 năm 2017.

Kết quả giải đoán địa hình đáy biển cho thấy rằng, xuất hiện các khu vực xói dọc theo phía trước bãi biển như khu vực khách sạn Sunrise, Golden sand, bãi Cửa Đại... Khu vực có lượng bồi tụ lớn là vị trí các cồn cát ngầm phía trước cửa sông.

2.3.2.6. Biến động hình thái dưới tác động của trận lũ tháng 11 năm 2017

Đây là giai đoạn xảy ra cơn lũ khá lớn gây ra sự biến đổi địa hình đáy biển khu vực cửa sông khá mạnh mẽ và tạo nên khu vực đảo nổi phía trước cửa sông. Kết quả (Hình 2.38) cũng cho thấy, hiện tượng xói lở tiếp tục diễn ra trước phần bãi phía bắc.



Hình 2.38. Biến động địa hình đáy biển trong giai đoạn trước và sau cơn lũ tháng 11/2017

2.4. Kết luận Chương 2

Chương 2 đã hoàn thành việc thiết lập cơ sở dữ liệu thực nghiệm và phân tích diễn biến hình thái khu vực Cửa Đại – Hội An trong giai đoạn 50 năm (1973 – 2023). Thông qua việc tích hợp nguồn dữ liệu viễn thám đa thời gian (Landsat, Sentinel-2) với số liệu khảo sát thực địa, nghiên cứu đã đạt được những kết quả định lượng và đóng góp mới về mặt phương pháp luận như sau:

Xác lập quy luật diễn biến hình thái đường bờ và cửa sông: Kết quả phân tích chuỗi ảnh vệ tinh bằng chỉ số NDWI đã định lượng rõ ràng xu thế biến động của khu vực nghiên cứu qua 3 giai đoạn động lực đặc trưng:

- Về xu thế đường bờ: Đã xác định được sự đảo chiều từ trạng thái bồi tụ mạnh (giai đoạn 1988-1998, bồi tụ cực đại tới 1,2 km) sang trạng thái xói lở nghiêm trọng (từ năm 2000 đến nay). Khu vực bãi biển phía Bắc đã bị xói lở lùi sâu vào đất liền từ 300m đến 500m so với thời điểm bồi tụ cực đại. Ngược lại, bờ biển phía Nam duy trì trạng thái tương đối ổn định.

- Về động lực cửa sông: Đã chứng minh được quy luật dịch chuyển của trục luồng cửa sông về phía Nam. Trong suốt giai đoạn nghiên cứu, bờ Nam sông Thu Bồn liên tục bị xói lở và dịch chuyển về phía Nam với khoảng cách cực đại lên tới 500m. Sự dịch chuyển này là nguyên nhân chính làm thay đổi góc tới của sóng và đẩy thêm cát ra khỏi vùng che chắn, gây thiếu hụt nguồn cát cho bờ Bắc.

- Về chu kỳ đảo cát: Phát hiện ra tính chu kỳ trong sự hình thành và tiêu biến của các đảo cát cửa sông (xuất hiện năm 1988 và tái lập năm 2018 sau trận lũ lớn 2017),. Đây là chỉ dấu quan trọng về cơ chế tự cân bằng của hệ thống sông - biển trước sự biến động của nguồn bùn cát thượng nguồn.

Đóng góp mới về phương pháp giải đoán địa hình đáy biển: Luận án đã xây dựng và kiểm chứng thành công quy trình công nghệ giải đoán độ sâu đáy biển từ ảnh vệ tinh Sentinel-2 dựa trên thuật toán tỷ số Logarit các kênh phổ.

- Độ tin cậy: Kết quả kiểm định với dữ liệu đo sâu hồi âm thực địa (2016-2018) cho thấy độ tương quan cao (R^2 từ 0,73 đến 0,92) và sai số quân phương (RMSE) thấp, dao động từ 0,45m đến 0,66m,.

- Ý nghĩa thực tiễn: Phương pháp này khắc phục được hạn chế về sự thiếu hụt số liệu đo đạc địa hình đáy biển tại Việt Nam, cung cấp một công cụ giám sát hiệu quả, chi phí thấp để theo dõi diễn biến của các bãi ngầm và thềm cát cửa sông – những khu vực tàu thuyền khó tiếp cận đo đạc trực tiếp.

Phát hiện cơ chế xói lở từ biến đổi đáy biển (3D): Kết quả giải đoán địa hình đáy biển đã chỉ ra rằng quá trình xói lở tại Cửa Đại không chỉ diễn ra trên đường bờ (2D) mà còn là sự hạ thấp đáng kể của đáy biển tại đới sóng vỡ (sâu thêm từ 0,5 - 1,0m). Sự hạ thấp này làm gia tăng độ dốc bãi biển, khiến năng lượng sóng tác động vào bờ mạnh hơn. Đây là phát hiện quan trọng giải thích cho nguyên nhân các công trình bảo vệ bờ mềm (như túi địa kỹ thuật) bị phá hủy nhanh chóng do chân công trình bị xói lở, mất ổn định trượt.

Tiền đề cho nghiên cứu mô hình toán: Bộ cơ sở dữ liệu về đường bờ và địa hình đáy biển được xây dựng trong Chương 2 đóng vai trò là dữ liệu đầu vào và dữ liệu kiểm định tin cậy cho các mô hình số trị ở Chương 3.

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG BÃI BIỂN, CỬA SÔNG CỬA ĐẠI – HỘI AN BẰNG MÔ HÌNH SỐ

3.1. Số liệu phục vụ nghiên cứu

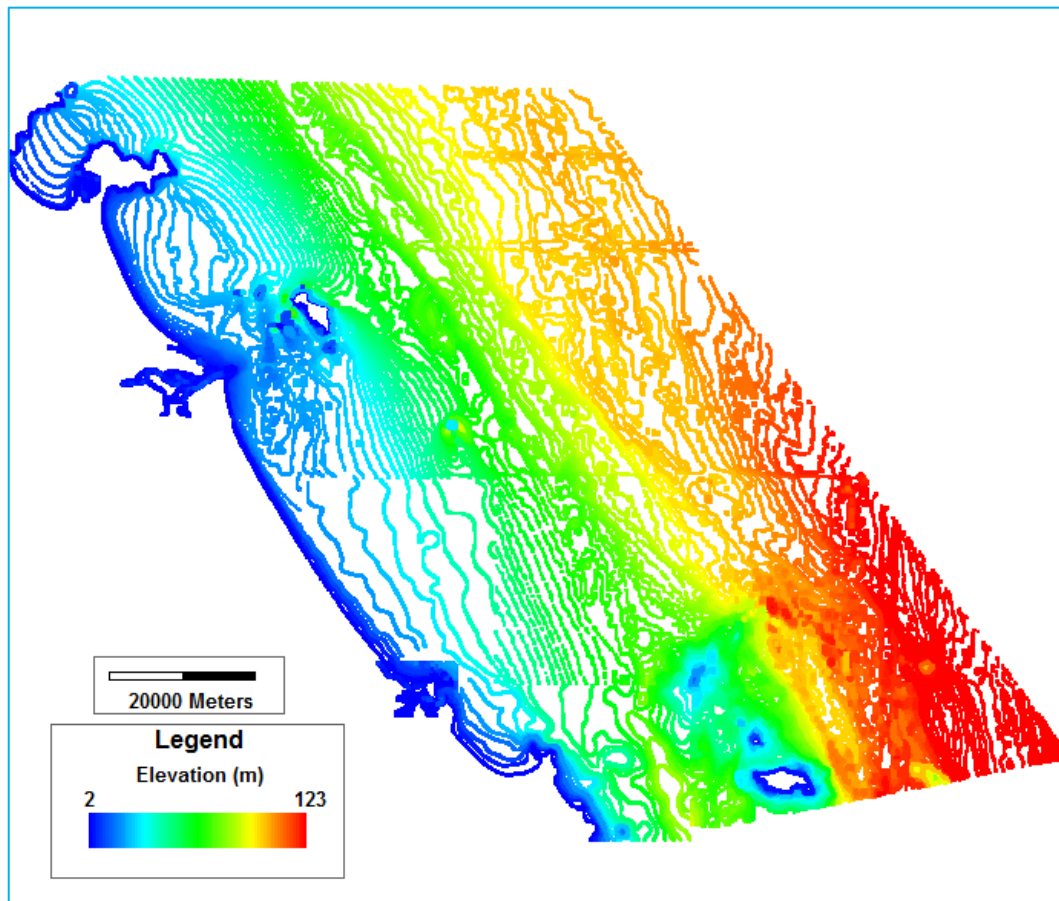
3.1.1. Số liệu phục vụ thiết lập mô hình

Đã thu thập số liệu địa hình đáy biển sau:

- Bản đồ số hóa địa hình đáy biển, tỉ lệ 1/100.000, trải dài từ mũi Sơn Trà, Đà Nẵng đến khu vực Cửa Lở, Núi Thành, Quảng Nam và mở rộng ra phía biển, cách bờ 35 km do Viện Hải Dương Nha Trang thực hiện năm 2015.

- Bình đồ chi tiết vùng nghiên cứu do dự án [66] lập tháng 10/2016: Địa hình dưới nước tỷ lệ 1/5000, đường đồng mức 2 m; Địa hình trên cạn, tỷ lệ 1/2000, đường đồng mức 1 m.

Từ các số liệu địa hình thu thập ở trên, tiến hành tổng hợp, chỉnh lý số liệu và được đưa về cùng hệ cao độ quốc gia. Dữ liệu địa hình tổng hợp sẽ được dùng trong việc thiết lập lưới tính và được nội suy vào lưới tính thông qua mô đun tích hợp sẵn trong bộ mô hình Delft3d (Hình 3.1).



Hình 3.1. Tổng hợp địa hình khu vực biển Hội An

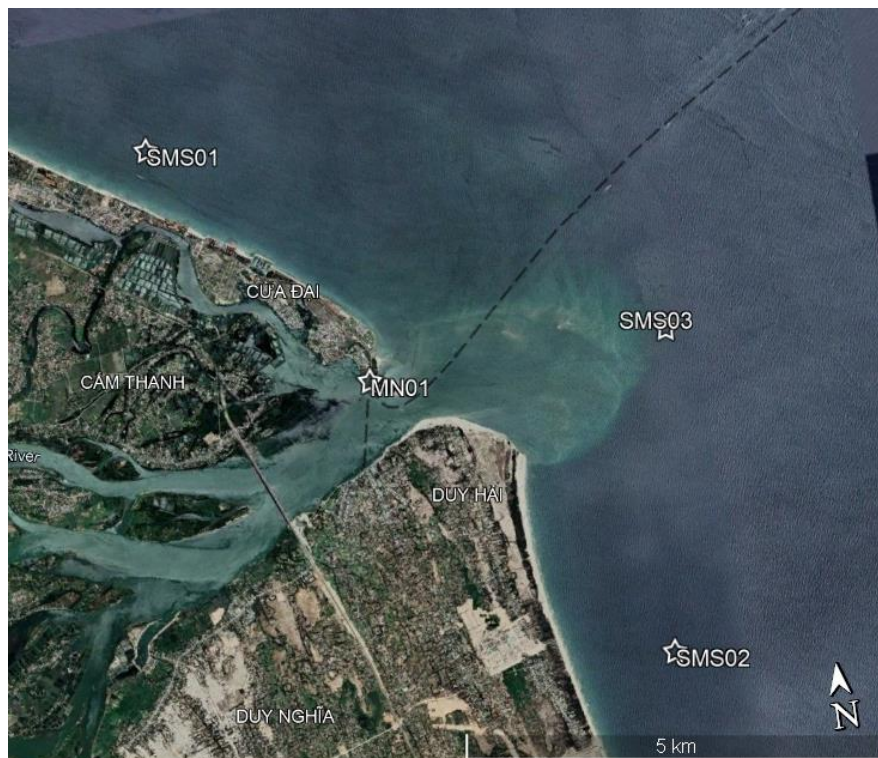
3.1.2. Số liệu phục vụ hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

- Số liệu thủy, hải văn:

Trong năm 2016, dự án [66] đã tiến hành hai đợt khảo sát thủy, hải văn vào tháng 10/2016 để thu thập được các đặc trưng sóng có tính chất của gió mùa tây nam; Trong năm 2017 tiến hành khảo sát thủy, hải văn vào tháng 3/2017 thu thập được các đặc trưng sóng có tính chất của gió mùa đông bắc.

Trong luận án, sử dụng kết quả đo đạc thủy, hải văn trong khu vực nghiên cứu của hai đợt đo đạc trên để hiệu chỉnh và kiểm định cho mô hình toán.

Vị trí, thiết bị đo đạc các trạm và các yếu tố khảo sát hải văn được thể hiện trong Hình 3.2 và thống kê trong Bảng 3.1÷3.2.



Hình 3.2. Vị trí bố trí các trạm đo đạc thủy, hải văn trong khu vực nghiên cứu

Bảng 3.1. Bảng thống kê cao độ và tọa độ các trạm đo hải văn trong tháng 10/2016 [66]

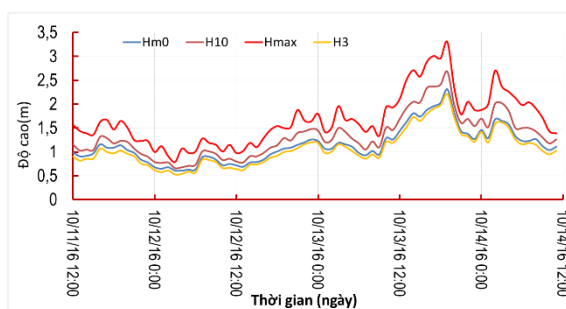
Tên trạm	Tọa độ trạm		Độ sâu (m)	Các tham số đo đạc
	Kinh độ	Vĩ độ		
SMS01	108°22'4,08"	15°54'14,80"	-8	Sóng, dòng chảy, mực nước
SMS02	108°25'5,48"	15°50'33,47"	-8	Sóng, dòng chảy, mực nước
SMS03	108°25'22,30"	15°52'37,02"	-14	Sóng, dòng chảy, mực nước
MN01	108°23'20,60"	15°52'33,08"	-3	Mực nước
ARP01	108°23'28,28"	15°52'15,98"		Lưu lượng theo mặt cắt ngang
ARP02	108°22'46,21"	15°51'57,33"		Lưu lượng theo mặt cắt ngang

Bảng 3.2. Bảng thống kê cao độ và tọa độ các trạm đo hải văn trong tháng 3/2017 [35]

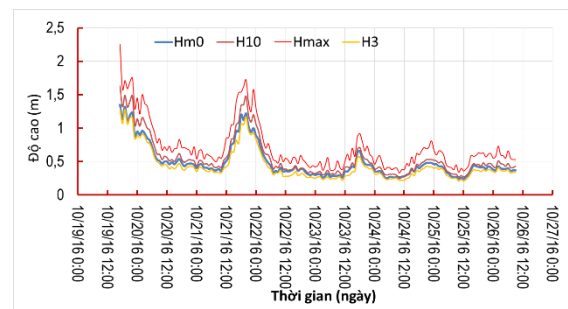
Tên trạm	Tọa độ trạm		Độ sâu (m)	Các tham số đo đạc
	Vĩ độ	Kinh độ		
SMS01	108°22'4,08"	15°54'14,80"	-8	Sóng, dòng chảy, mực nước
SMS03	108°25'22,30"	15°52'37,02"	-14	Sóng, dòng chảy, mực nước
ARP01	108°23'28,28"	15°52'15,98"		Lưu lượng theo mặt cắt ngang
MN01	108°23'20,60"	15°52'33,08"	-3	Dòng chảy

- Số liệu đo đạc sóng trong các đợt đo của dự án [35] trong đợt 1 (10/2016):

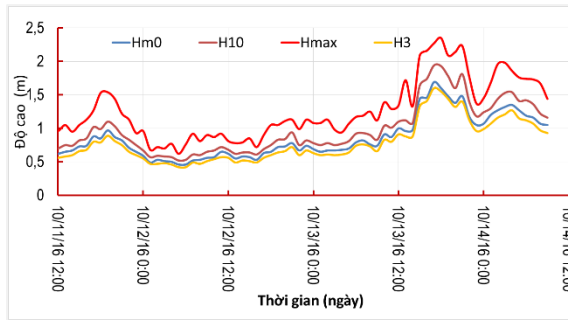
Diễn biến độ cao sóng 2 lần đo, đợt 1 (10/2016) tại hai trạm SMS01 (phía Bắc Cửa Đại), trạm SMS02 (trước cửa sông Cửa Đại) được biểu thị trong Hình 3.3.



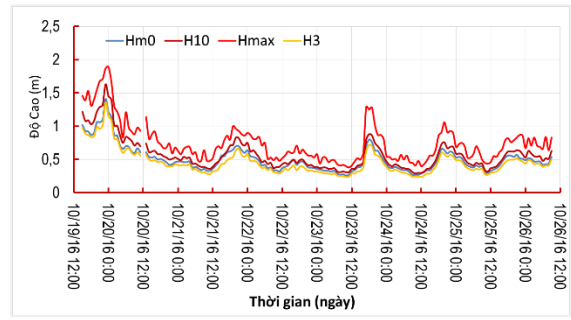
a) Trạm SMS01 - Đo lần 1



b) Trạm SMS01 - Đo lần 2



c) Trạm SMS02 - Đo lần 1



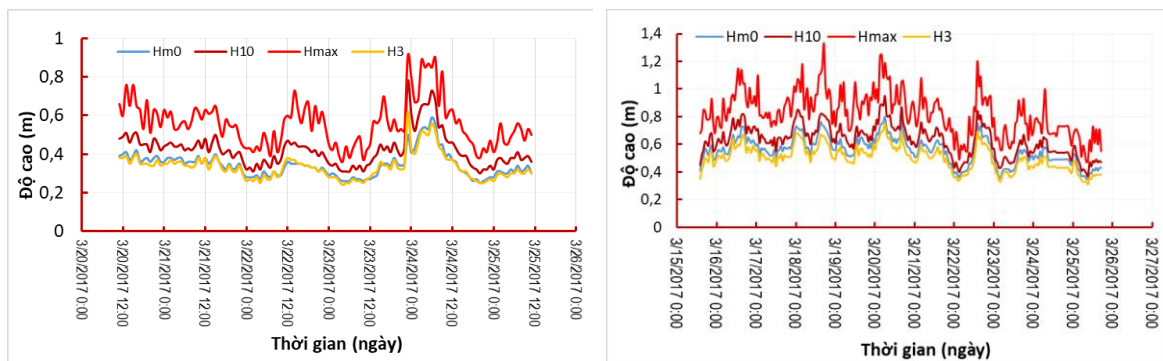
d) Trạm SMS02 - Đo lần 2

Hình 3.3. Diễn biến độ cao sóng 02 lần đo, đợt 1 tại hai trạm SMS01 (phía Bắc Cửa Đại), SMS02 (trước cửa sông Cửa Đại) [66]

Số liệu đo đặc sóng trong các đợt đo của dự án [66] đợt 2 (3/2017):

Tại hai trạm SMS sử dụng máy đo dòng chảy theo tầng và sóng, hướng sóng AWAC - đo sóng và dòng chảy theo phương pháp Dopler của hãng Nortek và cả máy AQUAPRO được sử dụng và thiết kế với giá máy đo đặc biệt. Hai trạm SMS01-1 và SMS01-2 được thả ở phía bờ Bắc Cửa Đại (trạm đầu nằm ở phía bắc cách trạm sau khoảng 500 m), trạm SMS02 được thả tại luồng ra vào của Cửa Đại. Diễn biến độ cao sóng tại hai trạm được trình bày ở Hình 3.4.

Độ cao sóng đo được trong đợt khảo sát lần thứ hai không lớn như trong đợt đầu tiên. Độ cao sóng lớn nhất đo được tại trạm SMS01 trong đợt gió mùa đông bắc là 2,24 m. Độ cao sóng tại trạm SMS02 (phía trước cửa sông Cửa Đại) luôn lớn hơn so với hai trạm còn lại với hướng sóng thịnh hành là hướng E và SE [66].



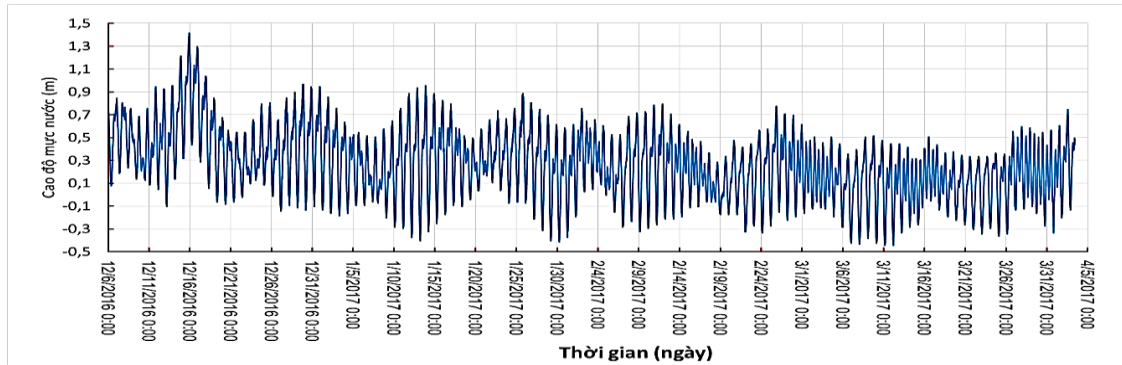
a) Trạm SMS01-01 (phía bắc Cửa Đại - khu vực trước KS Agribank)- Đo đợt 2 (AWAC)

d) Trạm SMS02 trước cửa sông Cửa Đại - Đo đợt 2 (AWAC)

Hình 3.4. Diễn biến độ cao sóng 02 lần đo, đợt 2 tại hai trạm SMS01 (phía Bắc Cửa Đại), SMS02 (trước cửa sông Cửa Đại) [66]

- Số liệu đo đặc mực nước:

Trạm quan trắc được lắp cố định đặt tại vị trí giáp cửa sông Cửa Đại, tại cầu cảng đồn biên phòng Cửa Đại có tọa độ: 15°52'33,20"N; 108°23'20,63"E. Thiết bị quan trắc mực nước biển sử dụng loại Level troll 500 do hãng sản xuất: In-Situ do Mỹ sản xuất. Số liệu mực nước được quan trắc theo tần xuất thu mẫu 10 phút/1 số liệu mực nước. Diễn biến mực nước trong thời gian 02 năm quan trắc được thể hiện trên Hình 3.5.



Hình 3.5. Diễn biến mực nước tại trạm Đồn biên phòng Cửa Đại đo từ ngày 12/1/2016 đến 4/3/2017

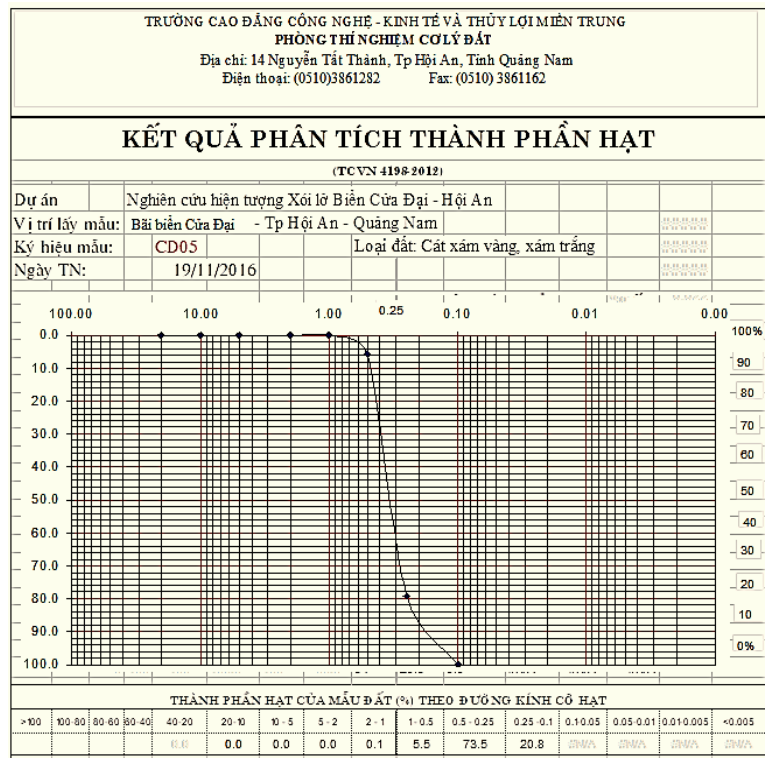
Từ chuỗi số liệu đo đạc mực nước trên dùng phân tích ra các hằng số điều hòa tại khu vực Cửa Đại, Hội An và xác định các thành phần nước dâng phục vụ nghiên cứu phân tích, đánh giá biến động MCN bãi biển Cửa Đại, Hội An.

- *Số liệu bùn cát:*

Kết quả phân tích mẫu trầm tích đáy được tổng hợp từ các đợt khảo sát năm 2016. Vị trí lấy mẫu phân tích bùn cát thể hiện trên (Hình 3.6). Các mẫu bùn cát đáy được phân tích thành phần hạt và được đưa vào mô hình toán (Hình 3.7).



Hình 3.6. Vị trí lấy mẫu bùn cát đáy [66]



Hình 3.7. Thành phần hạt đưa vào mô hình [66]

3.1.3. Số liệu phân tích điều kiện biên cho mô hình

- Số liệu thủy triều: Số liệu thủy triều được thiết lập trên biên mô hình được lấy từ bộ hằng số điều hòa thủy triều toàn cầu TPXO phiên bản 7.2 bao gồm 13 sóng thủy triều với các thành phần biên độ và pha.

- Số liệu mực nước: Số liệu mực nước tổng hợp được thu thập tại trạm hải văn Sơn Trà, Đà Nẵng từ năm 1994 đến 2023. Từ chuỗi số liệu mực nước tổng hợp, nghiên cứu sinh sử dụng chương trình phân tích điều hòa để tách ra thành phần nước dâng và các thành phần hằng số điều hòa thủy triều. Các kết quả phân tích vừa làm dữ liệu kiểm định mô hình thủy triều, đồng thời thành phần nước dâng dùng làm điều kiện đầu vào trong mô phỏng biến động hình thái trong khu vực.

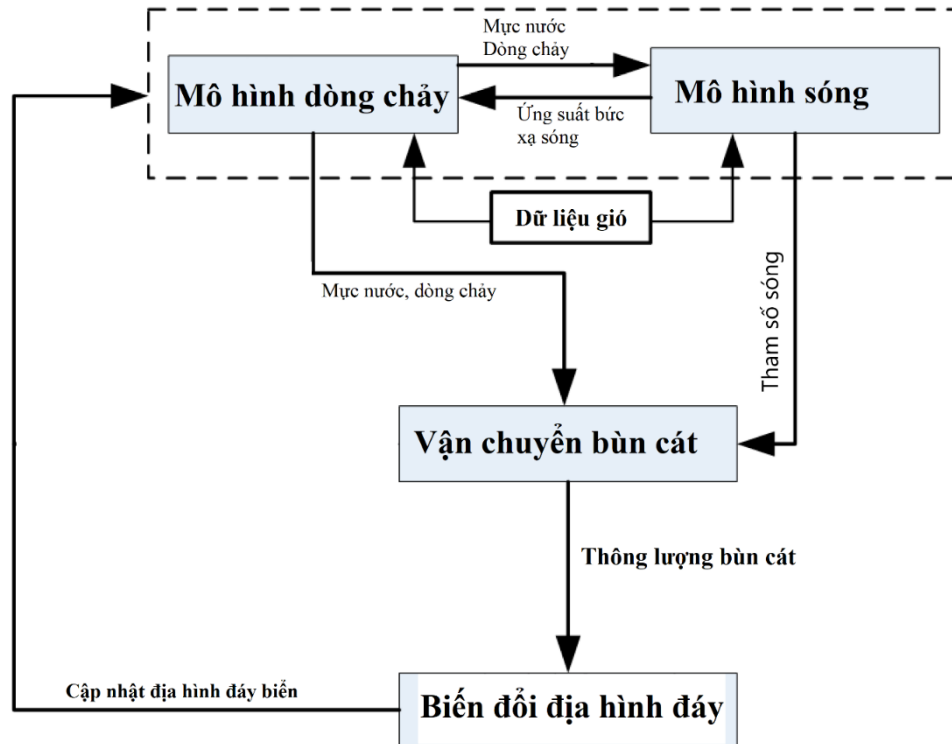
- Số liệu thủy văn: Chuỗi số liệu lưu lượng lũ dài hạn tại trạm Nông Sơn và Thành Mỹ được thu thập từ năm 1973 đến 2023. Chuỗi số liệu lũ dài hạn được sử dụng trong phân tích các đặc trưng lũ theo mùa, làm điều kiện đầu vào cho mô hình số trị.

- Số liệu sóng nước sâu: Số liệu sóng nước sâu được lấy từ chuỗi số liệu sóng dài hạn tái phân tích bằng mô hình SWAN trên toàn khu vực Biển Đông từ năm 1995 đến 2023 từ nguồn dữ liệu gió NCEP.

3.2. Cơ sở phương pháp nghiên cứu biến động bãi biển bằng mô hình số DELFT3D

Trong nghiên cứu này nghiên cứu sinh sử dụng bộ mô hình số trị DELFT3D, mô hình được xây dựng và phát triển bởi viện Khoa học thủy lực DELFT- Hà Lan. Đây là bộ mô hình mã nguồn mở cho phép mô phỏng trường thủy động lực học và vận chuyển bùn cát trong khu vực sông, cửa sông và ven biển. Trong nghiên cứu này, ba mô đun được sử dụng đó là DELFT - WAVE (tính toán sóng), DELFT - FLOW (tính toán dòng chảy) và DELFT - MOR (tính toán vận chuyển bùn cát và biến đổi đáy biển). Cơ sở lý thuyết tóm tắt được trình bày trong phụ lục 1 và 2. Trong nghiên cứu của luận án, sử dụng mô hình DELFT-WAVE trong tính toán lan truyền sóng từ vùng nước sâu vào vùng ven bờ và mô hình DELFT-FLOW tính toán trường dòng chảy do các yếu tố tác động như thủy triều, gió, sóng và dòng chảy từ sông. Hai mô hình DELFT-WAVE và DELFT - FLOW được tính toán theo cặp lồng ghép dạng hai chiều. Trong mỗi bước thời gian $t=1$ giờ, kết quả của mô hình này được trao đổi với mô hình kia và ngược lại. Kết quả từ hai mô hình DELFT-WAVE và DELFT - FLOW được sử dụng tính toán vận chuyển bùn cát và biến đổi đáy biển, kết quả đáy biển sau khi biến động được cập nhật lại cho mô hình sóng và thủy lực sau mỗi bước thời gian

$t = 1$ giờ để tính toán trong bước tiếp theo. Sơ đồ tính toán của bộ mô hình DELFT3D được trình bày trong Hình 3.8.



Hình 3.8. Sơ đồ khối quá trình mô phỏng biến đổi địa hình đáy biển trong mô hình DELFT3D.

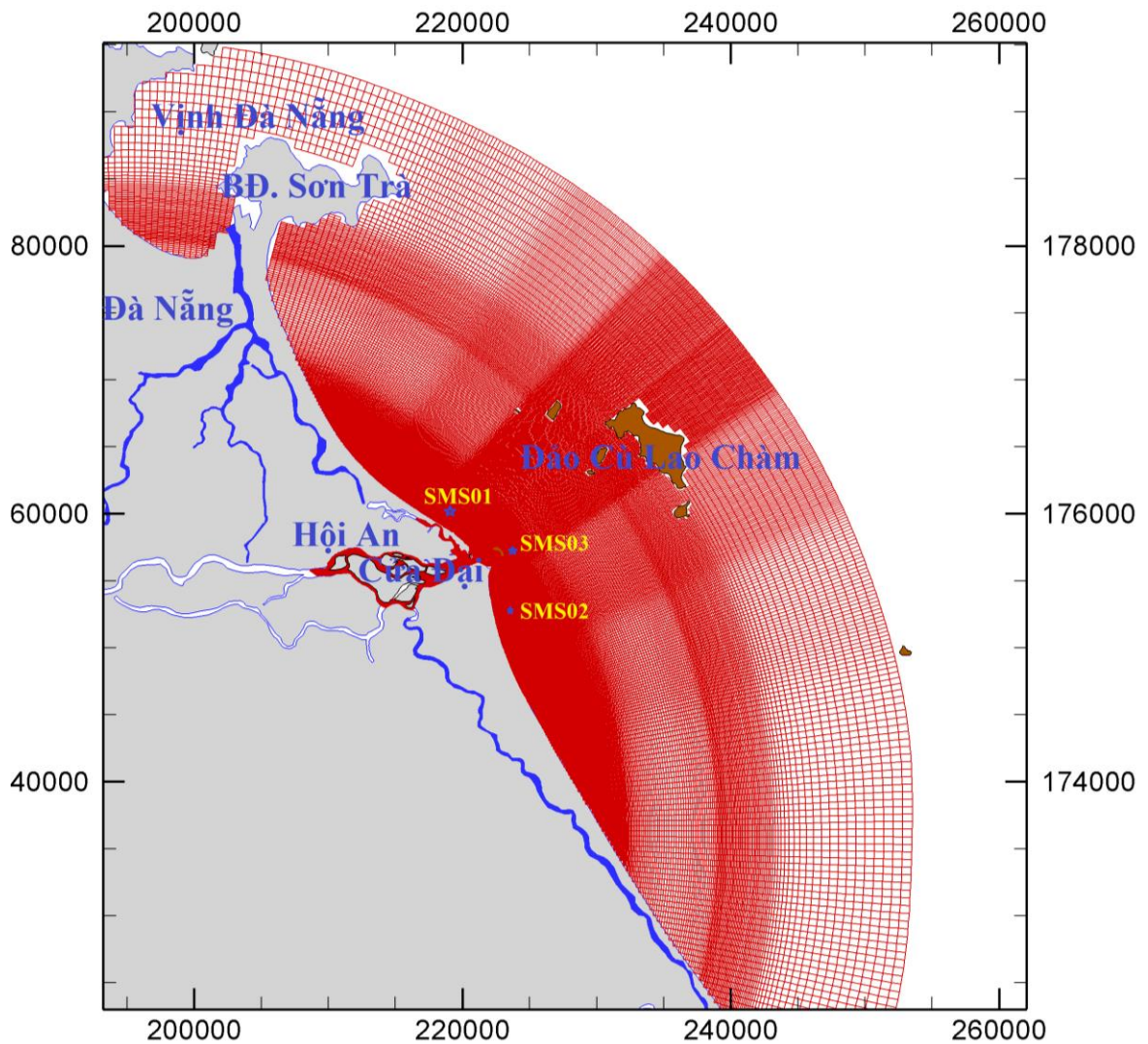
3.3. Thiết lập mô hình

3.3.1. Thiết lập vùng tính lưới tính

- Thiết lập miền tính, lưới tính:

Miền tính toán được xác định là khu vực bắt đầu từ mũi đèo Hải Vân, Đà Nẵng tới khu vực mũi Bàn Than, huyện Núi Thành, Tỉnh Quảng Nam. Chiều dài dọc bờ của miền tính là 95 km và theo chiều ngang bờ là 30 km từ vùng cửa sông ra tới ngoài khơi có độ sâu nước 100 m.

Lưới tính sóng sử dụng loại lưới cong trục giao được tạo bởi mô đun RGFGGRID tích hợp trong DELFT3D. Lưới tính được chia trong khuôn khổ miền tính với quy mô 157 x 520 ô lưới. kích thước ô lưới nhỏ nhất tại khu vực cửa sông ven bờ là 30 m và lớn nhất tại biên nước sâu là 350 m (Hình 3.9).



Hình 3.9. Lưới tính và vị trí các trạm đo đặc sóng, dòng chảy

- *Thiết lập điều kiện biên, điều kiện ban đầu:*

Trong miền tính, các điều kiện biên được thiết lập gồm: điều kiện biên lỏng, biên cứng và biên sông. Biên lỏng được xác định là biên phía biển, tại đây các điều kiện tham số sóng nước sâu được thiết lập dọc theo các điểm trên biên. Điều kiện biên cứng là phần biên tiếp giáp giữa đất và biển, điều kiện biên được thiết lập là dạng biên hấp thụ năng lượng sóng và không phản xạ. Điều kiện biên sông, là phần mặt cắt ngang sông, điều kiện biên thiết lập cho dạng biên này là biên phát xạ tự do.

Điều kiện ban đầu được áp dụng trong mô hình sóng là dạng điều kiện 0, tại thời điểm ban đầu được coi là không có sóng.

3.3.2. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

Đối với mô hình toán nói chung, các tham số thiết lập trong mô hình thường được thiết lập cho điều kiện phổ thông nhất. Tuy nhiên, với mỗi điều kiện cụ thể của khu vực nghiên cứu, các tham số này cần được hiệu chỉnh và kiểm định lại với các chuỗi đo đặc tin cây trước khi tính toán mô phỏng trong các kịch bản nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng hai chuỗi đo đặc tại ba trạm quan trắc SMS01 (trước bãi biển Cửa Đại), SMS02 (trước bãi biển phía nam Cửa Đại) và SMS03 (nằm giữa, phía trước Cửa Đại), tọa độ như trong Bảng 3.1 và vị trí các trạm đo đặc sóng, dòng chảy như trong Hình 3.9.

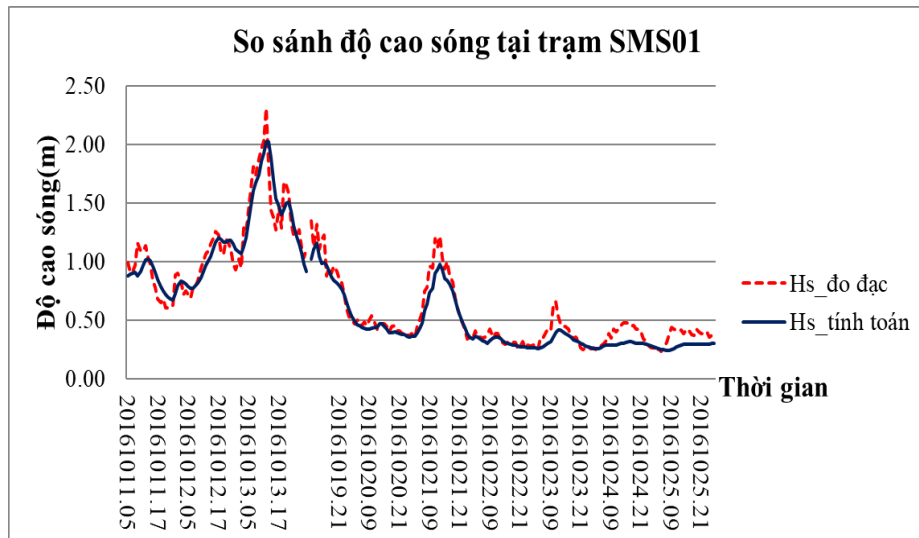
- *Hiệu chỉnh mô hình sóng:*

Chuỗi đo đặc các tham số sóng bằng máy đo sóng tự ghi AWAC trong thời gian từ ngày 11 đến ngày 26 tháng 10 năm 2016 được sử dụng để hiệu chỉnh các tham số mô hình. Bảng 3.3. đưa ra các tham số mô hình sử dụng trước và sau khi hiệu chỉnh.

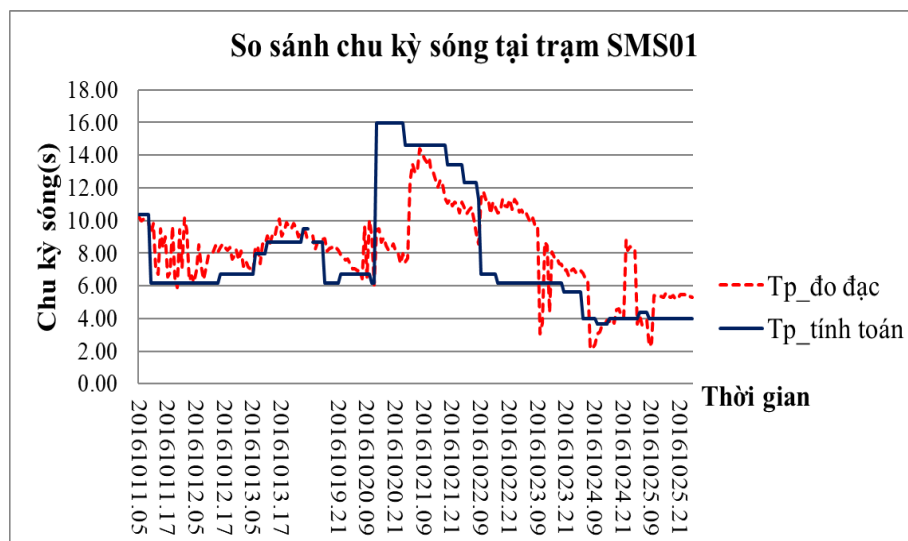
Bảng 3.3. Các tham số mô hình sử dụng trong hiệu chỉnh

TT	Tên tham số	Dải giá trị	Giá trị mặc định	Giá trị hiệu chỉnh
1	Gia tốc trọng trường G (m/s^2)	9,7 - 10	9,81	9,81
2	Trọng lượng riêng của nước (kg/m^3)	1000 - 1030	1000	1026
3	Hệ số ma sát đáy (m^2/s^3)	0 - 1,0	0,067	0,038
4	Hệ số sóng đồ	0 - 1,0	0,73	0,73
5	Hệ số nhận năng lượng gió C_{sd}	0 - 4×10^{-6}	2×10^{-6}	$1,5 \times 10^{-6}$

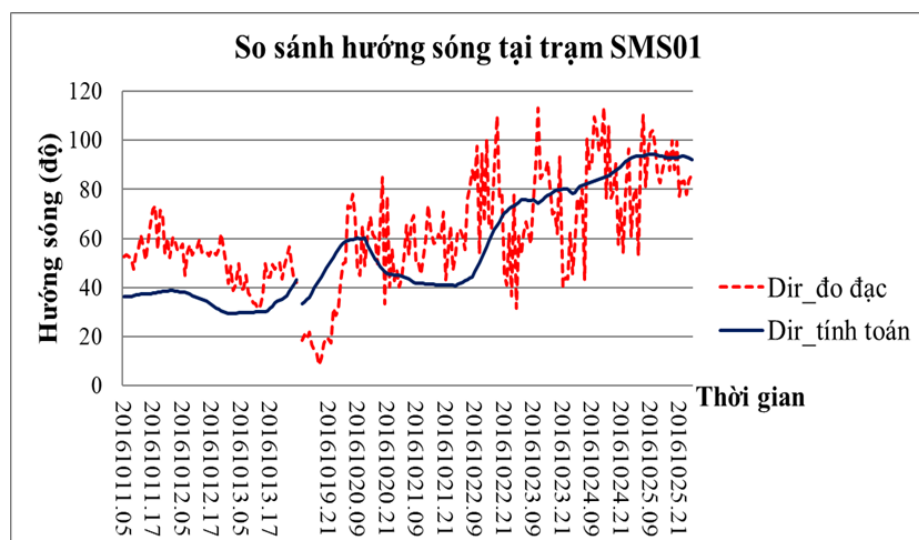
Các Hình 3.10÷3.12 đưa ra kết quả hiệu chỉnh các tham số sóng tại trạm SMS01.



Hình 3.10. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01

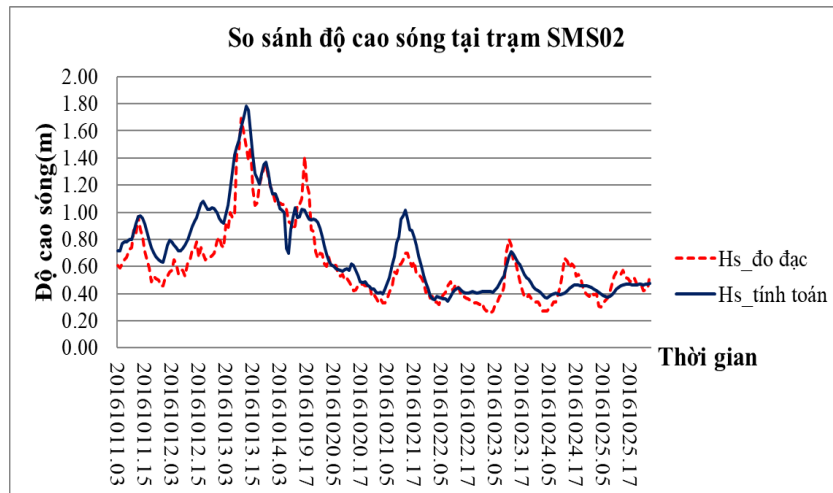


Hình 3 11. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01

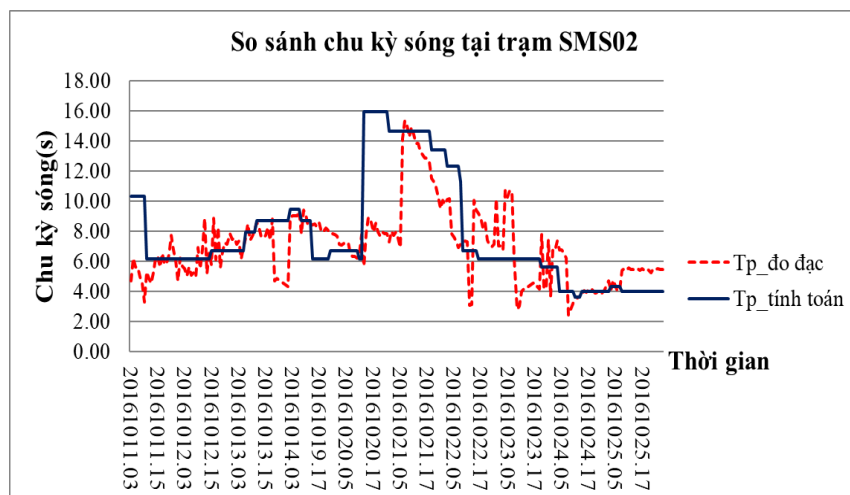


Hình 3.12. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01

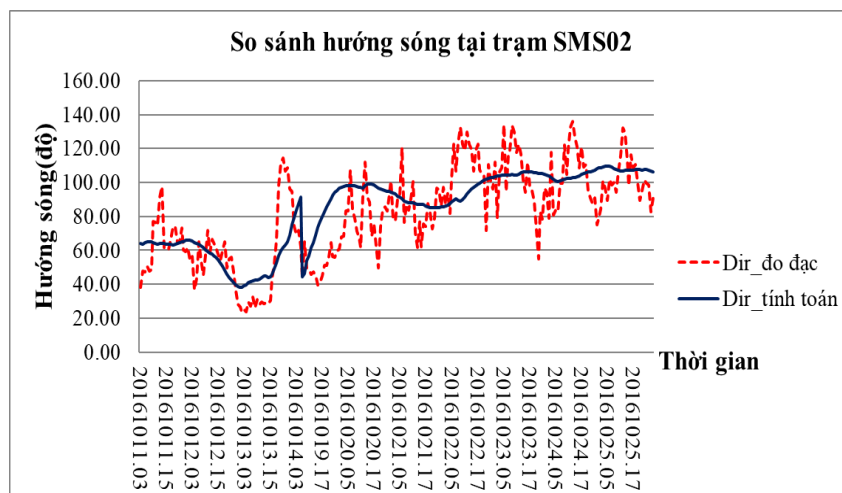
Các Hình 3.13÷3.15 đưa ra kết quả hiệu chỉnh các tham số sóng tại trạm SMS02.



Hình 3.13. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02

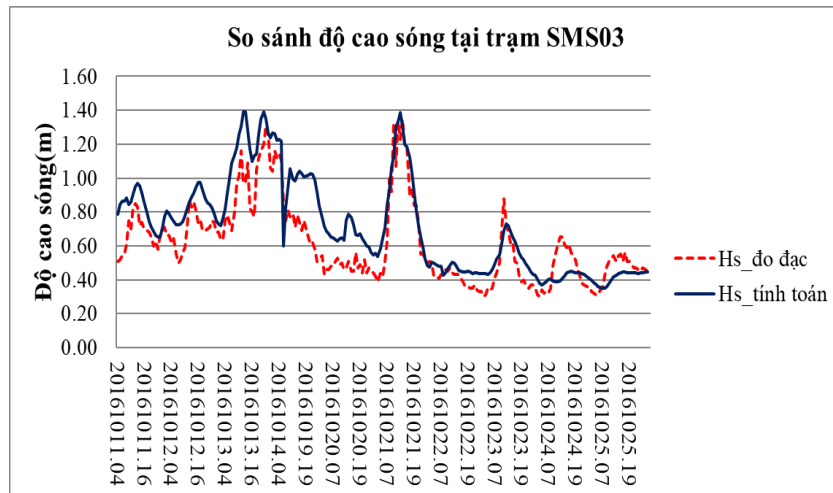


Hình 3.14. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02

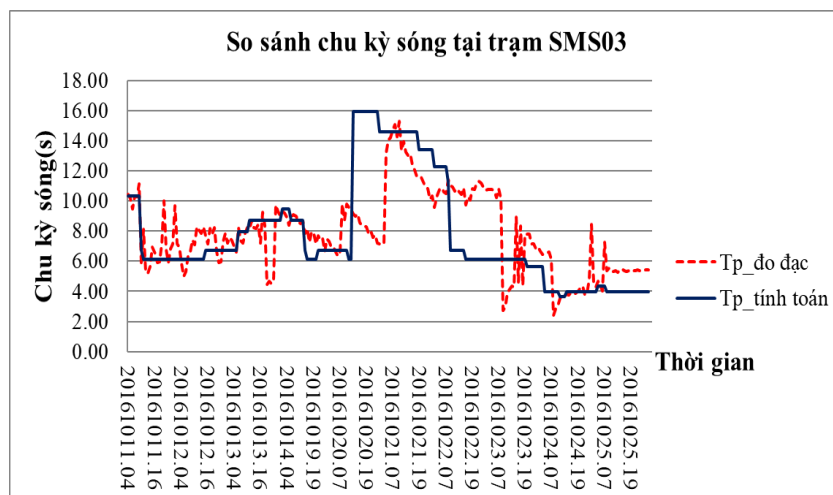


Hình 3.15. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02

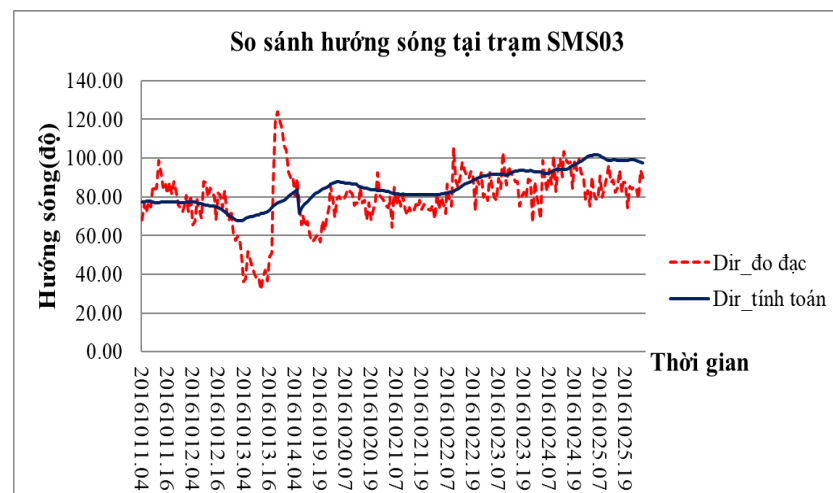
Các Hình 3.16÷3.18 đưa ra kết quả hiệu chỉnh các tham số sóng tại trạm SMS03.



Hình 3.16. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS03



Hình 3.17. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS03



Hình 3.18. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS03

Để đánh giá mức độ phù hợp giữa kết quả tính toán và thực đo về độ cao sóng, chu kỳ sóng và hướng sóng trong đợt khảo sát tháng 10/2016, tác giả sử dụng phương pháp tính toán sai số thống kê trung bình về độ lệch BIAS và sai số thống kê trung bình bình phương RMS theo các công thức sau:

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum (P_i - O_i) \quad (3.1)$$

$$\text{RMS} = \left\{ \frac{1}{N} \sum (P_i - O_i)^2 \right\}^{1/2} \quad (3.2)$$

Trong đó, N: số trường hợp tiến hành so sánh;

P_i: giá trị độ cao sóng tính toán;

O_i: giá trị độ cao sóng thực đo.

Độ lệch và sai số trung bình quân phương cho chuỗi độ cao sóng, chu kỳ sóng, hướng sóng thực đo trong tháng 10/ 2016 được thống kê trong Bảng 3.4.

Bảng 3.4. Kết quả hiệu chỉnh độ cao sóng, chu kỳ sóng, hướng sóng mô hình DELFT-WAVE

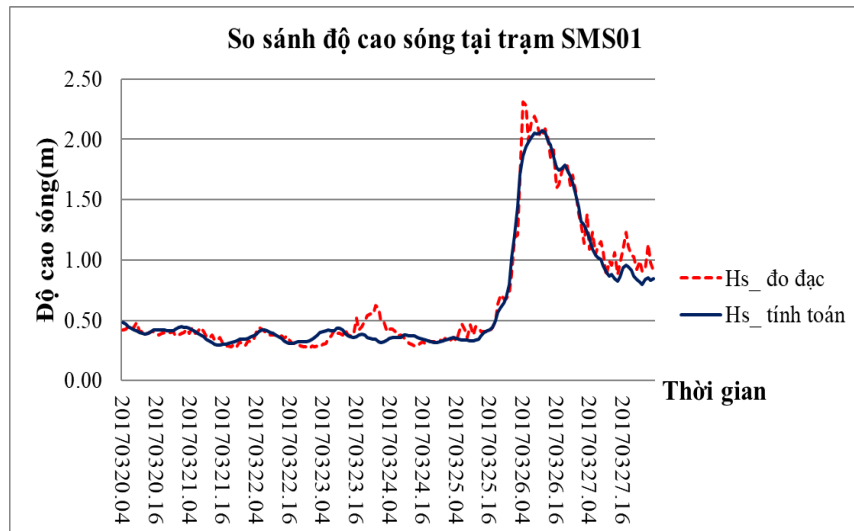
Tên trạm	Độ cao sóng (m)		Chu kỳ sóng (s)		Hướng sóng (độ)	
	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE
SMS01	-0,04	0,11	-0,5	2,8	-5	20
SMS02	0,08	0,15	0,8	2,9	3	19
SMS03	0,10	0,17	-0,1	2,8	5	14

Từ kết quả tính toán về độ lệch và sai số trung bình quân phương trong Bảng 3.4 cho thấy, giá trị độ cao sóng, chu kỳ sóng, hướng sóng trong suốt chuỗi tính toán từ mô hình và thực đo có sai lệch không đáng kể, có thể chấp nhận được. Mặt khác, kết quả mô hình mô phỏng diễn biến của độ cao sóng, chu kỳ sóng, hướng sóng khá tương đồng với số liệu thực đo. Bộ hệ số sau khi được hiệu chỉnh sẽ được dùng tính toán lại cho chuỗi đo đạc tháng 3 năm 2017.

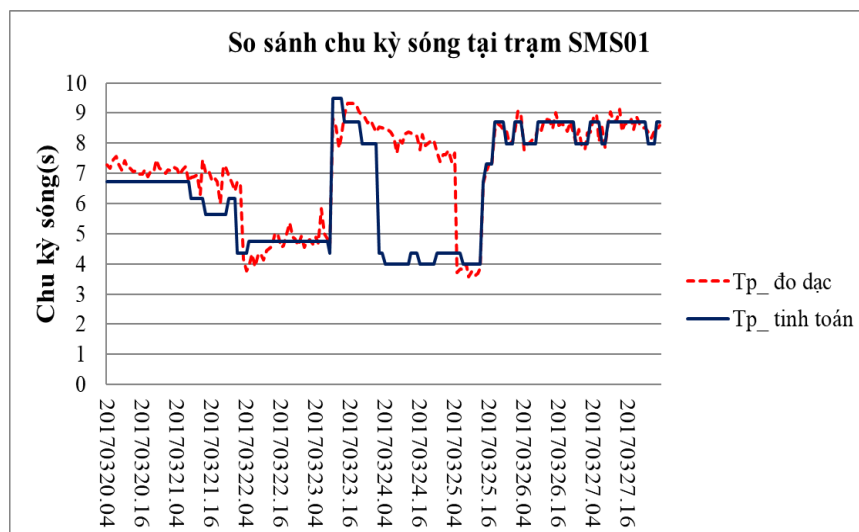
- *Kiểm định mô hình sóng:*

Chuỗi số liệu đo đạc từ ngày 20 đến 28 tháng 3 năm 2017 được sử dụng để kiểm định lại bộ các hệ số mô hình sóng đã được hiệu chỉnh trước đó.

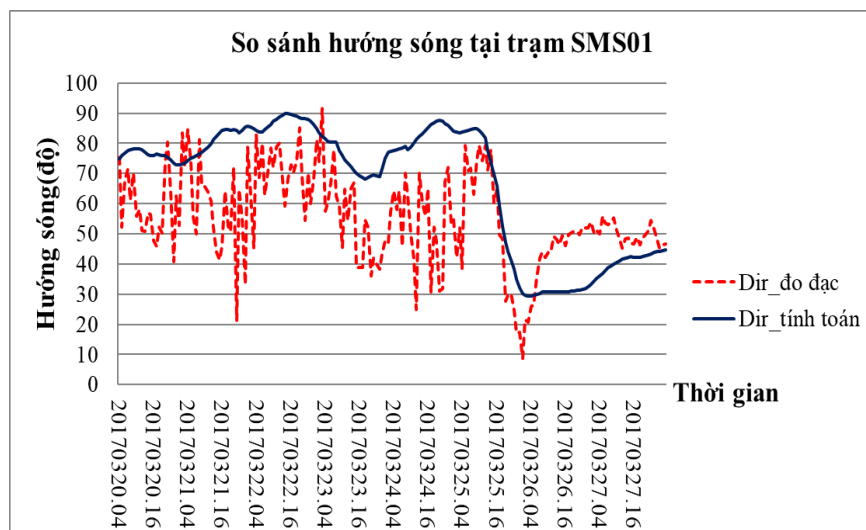
Các Hình 3.19÷3.21 đưa ra kết quả kiểm định các tham số sóng tại trạm SMS01.



Hình 3.19. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01

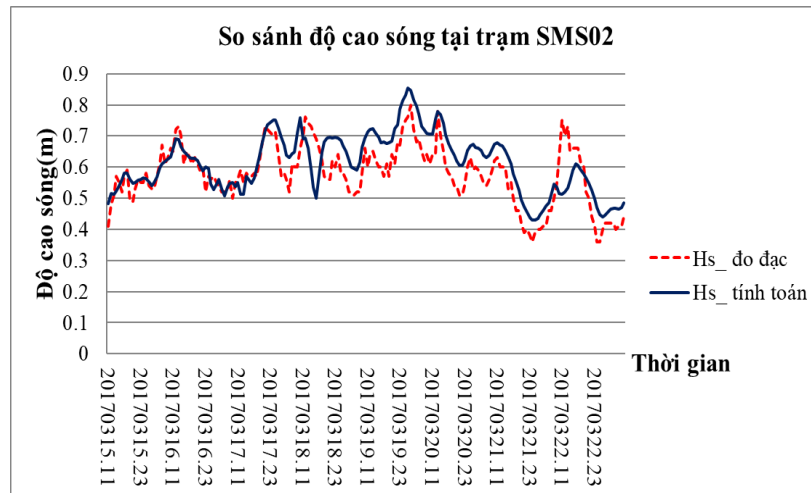


Hình 3.20. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01

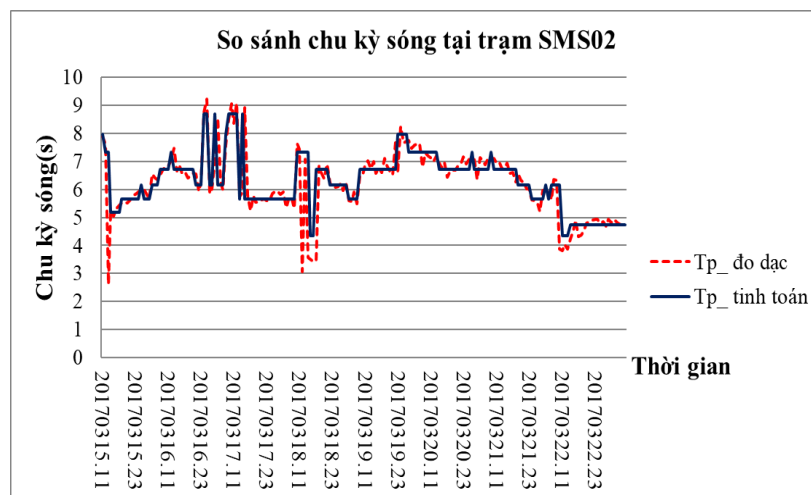


Hình 3.21. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS01

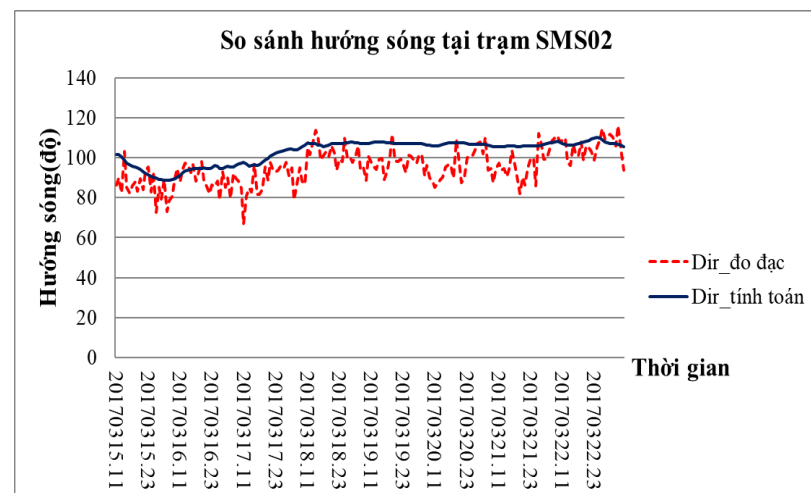
Các Hình 3.22÷3.24 đưa ra kết quả kiểm định các tham số sóng tại trạm SMS02.



Hình 3.22. So sánh độ cao sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02



Hình 3.23. So sánh chu kỳ sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02



Hình 3.24. So sánh hướng sóng tính toán và đo đạc tại trạm SMS02

Kết quả đánh giá sai số kiểm định mô hình được trình bày trong Bảng 3.5.

Bảng 3.5. Kết quả đánh giá sai số kiểm định mô hình sóng

Tên trạm	Độ cao sóng		Chu kỳ sóng			Hướng sóng
	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE
SMS01	-0,02	0,09	-0,7	1,6	12	22
SMS02	0,03	0,07	0,1	0,8	7	11

Kết quả tính độ lệch và sai số trung bình quân phương cho chuỗi độ cao sóng, chu kỳ sóng, hướng sóng thực đo trong tháng 3/2017 có sai lệch khá nhỏ ($< 10\%$) chứng tỏ mô hình hiệu chỉnh độ cao sóng, chu kỳ sóng, hướng sóng đạt độ chính xác cao.

- *Hiệu chỉnh, kiểm định mô hình tính toán thủy động lực học:*

Hiệu chỉnh mô hình: cũng giống như các mô hình số khác, mô hình thủy động lực học cũng được hiệu chỉnh trước khi sử dụng tính toán trong các kịch bản tiếp theo. Chuỗi số liệu sử dụng trong kiểm định được đo đạc từ ngày 11 đến 26 tháng 10 năm 2016 thuộc dự án “Nghiên cứu quá trình xói lở và các biện pháp bảo vệ bờ biển phòng chống xói lở Cửa Đại, Hội An, Trường Cao đẳng Công nghệ, Kinh tế và Thủy lợi miền Trung, Quảng Nam, 2016” [67].

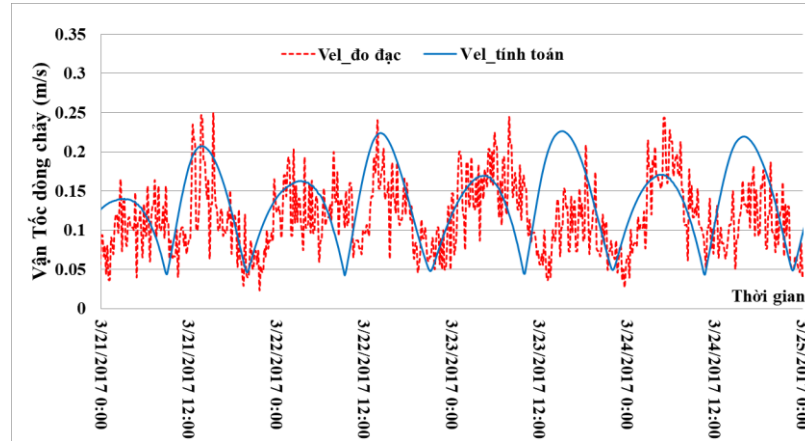
Các tham số chính của mô hình thủy lực dùng trong hiệu chỉnh được trình bày trong Bảng 3.6.

Bảng 3.6. Các tham số mô hình dùng trong hiệu chỉnh

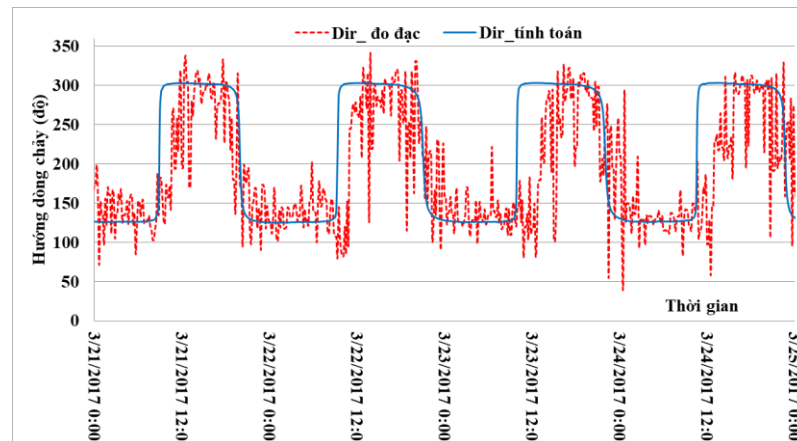
TT	Tên tham số	Khoảng giá trị lựa chọn	Tham số mặc định	Tham số hiệu chỉnh
1	Gia tốc trọng trường G (m/s^2)	9,7-10	9,81	9,81
2	Trọng lượng riêng của nước (kg/m^3)	1000-1030	1000	1026
3	Hệ số nhám manning	0 - 1,0	0,02	0,026
4	Hệ số rối ngang (m^2/s)	0-100	1	1
5	Hệ số kéo của gió A	0 - 1	0,0063	0,0063
6	Hệ số kéo của gió B	0- 1	0,00723	0,0063
7	Hệ số kéo của gió C	0 - 1	0,00723	0,0063

- *Kiểm định mô hình thủy lực:*

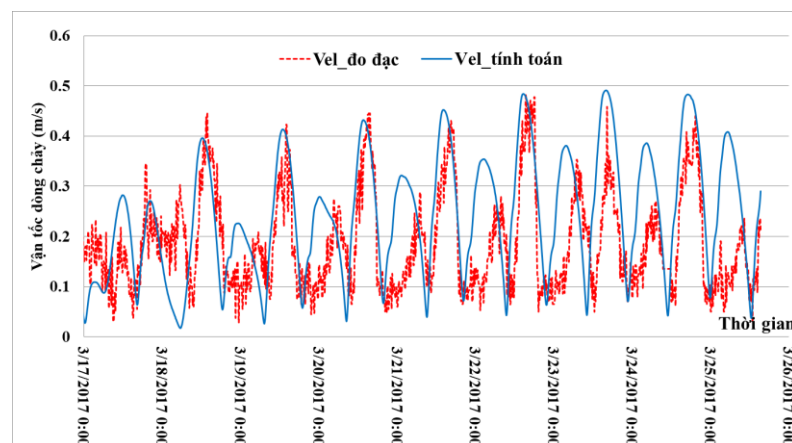
Sau khi có được bộ các tham số mô hình, mô hình toán được kiểm định với chuỗi đo đặc thủy lực thứ ba từ ngày 17 tháng 3 đến 26 tháng 3 năm 2017 tại hai trạm SMS01 và SMS03. Kết quả kiểm định với vận tốc và hướng dòng chảy được trình bày trong các Hình 3.25÷3.28.



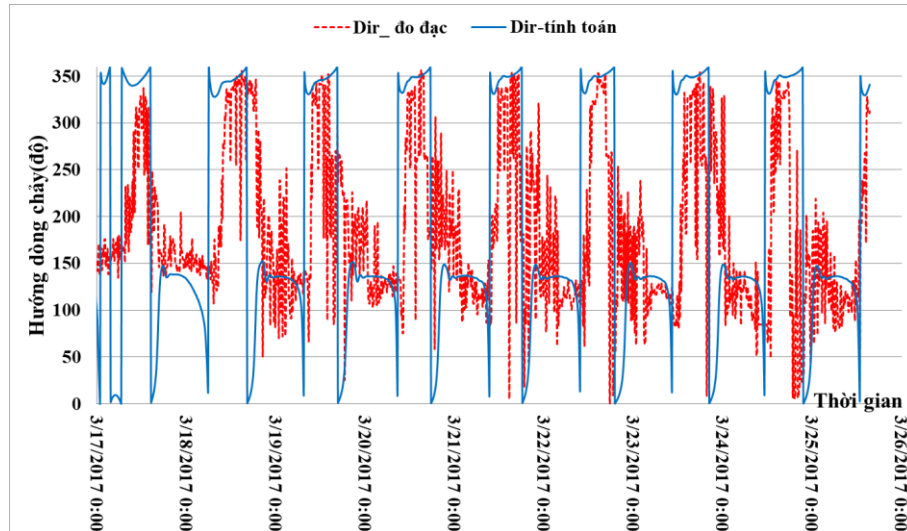
Hình 3.25. Kết quả kiểm định vận tốc dòng chảy tại trạm SMS01



Hình 3.26. Kết quả kiểm định hướng dòng chảy tại trạm SMS01



Hình 3.27. Kết quả kiểm định vận tốc dòng chảy tại trạm SMS03



Hình 3.28. Kết quả kiểm định hướng dòng chảy tại trạm SMS03

Kết quả đánh giá sai số kiểm định mô hình được trình bày tại Bảng 3.7.

Bảng 3.7. Bảng kết quả đánh giá sai số kiểm định mô hình

Tên trạm	Vận tốc dòng chảy		Hướng dòng chảy	
	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE
SMS01	0,021	0,05	16,50	20,3
SMS03	0,039	0,119	21,1	25,4

Từ các kết quả trên Hình 2.26÷2.29 và Bảng 3.7 đánh giá sai số cho thấy, kết quả mô phỏng của mô hình đạt độ chính xác khá cao. Về độ lớn dòng chảy, cho sai số thấp, các đường quá trình phù hợp với dữ liệu đo cả về các đỉnh cực trị và pha. Về hướng dòng chảy đạt được sự phù hợp khá cao khi mô phỏng chính xác hướng chủ đạo trong từng pha dòng chảy. Từ kết quả trên một lần nữa cho thấy, bộ các tham số mô hình có thể ứng dụng trong các tính toán kịch bản nghiên cứu đề ra.

3.4. Phương pháp mô phỏng biến động hình thái bãi biển dài hạn

Để đạt được mục tiêu mô phỏng biến động hình thái dài hạn bằng mô hình số cho khu vực cửa sông Cửa Đại, cần áp dụng cả kỹ thuật giảm tải các dữ liệu đầu vào và tăng tốc quá trình tính toán. Giảm đầu vào được thực hiện thông qua việc phát triển các phương thức phù hợp đối với các điều kiện đầu vào như dòng triều, sóng, gió và lưu lượng sông. Các phương thức đầu vào của các lực tác động nên tính đến sự biến đổi theo mùa của khí hậu sóng, gió và lưu lượng sông cũng như sự biến động

theo chu kỳ của thủy triều. Một khía cạnh quan trọng đầu tiên cần phải xem xét đến đó là tần suất sóng và lưu lượng sông có tính chất rất điển hình, điều này gây nên các biến hình thái theo mùa hết sức rõ rệt. Khía cạnh thứ hai, các kỹ thuật tăng tốc cần được áp dụng trong mô hình hình thái học dài hạn để nối liền khoảng cách giữa các thang thời gian của quá trình thủy động lực học và hình thái học và tận dụng thời gian tính toán.

3.4.1. Phân tích thủy triều hình thái học

Một trong các ý tưởng chính để giảm đầu vào tính toán đo là phân tích các tham số đầu vào thủy triều. Việc giảm đầu vào của thủy triều thay thế chuỗi mực nước thủy triều biến đổi theo thời gian phức tạp và biến động dòng chảy do thủy triều bằng một thủy triều đơn giản (Gelfenbaum và cộng sự, 2002; Grunnet, 2004; Lesser, 2004 và Lesser, 2009) và dựa trên nguyên lý của Latteux (1995). Latteux khẳng định rằng một thủy triều hình thái học có thể được chọn sao cho việc vận chuyển bùn cát (hoặc thay đổi hình thái) tương đồng nhất với việc vận chuyển bùn cát cho toàn bộ chu kỳ thủy triều kiệt và triều cường. Điều này cho phép giảm chu kỳ thủy triều từ triều cường tới triều kiệt thành một tín hiệu hàng ngày duy nhất. Lesser (2009) nêu rõ rằng trong quá trình mô phỏng hình thái học, mỗi điều kiện sóng được chọn nên được mô phỏng trong thời gian kéo dài của thủy triều hình thái học đầy đủ để tính đến sự thay đổi pha ngẫu nhiên giữa sóng và thủy triều xảy ra trong tự nhiên. Việc tính đến sự pha ngẫu nhiên này đặc biệt quan trọng trong việc áp dụng một thủy triều hình thái học với hệ số tăng tốc hình thái học (Lesser, 2004). Việc áp dụng một thủy triều hình thái học và mô phỏng điều kiện sóng qua một chu kỳ thủy triều hình thái học đầy đủ kết hợp với các hệ số tăng tốc hình thái học mang lại lợi ích mạnh mẽ cho thời gian tính toán tổng cộng của mô phỏng hình thái học dài hạn. Trong quá trình làm như vậy, các mô phỏng hình thái học dài hạn có thể được thực hiện bằng cách sử dụng các mô phỏng động học của chỉ một phần nhỏ của thời gian được mô phỏng.

Việc thiết lập thủy triều hình thái học tuân theo các yếu tố thủy triều được áp dụng vào mô hình gần thời gian thực của khu vực biển Cửa Đại, Hội An. Biên thủy triều là phần biên hờ ngoài biển trong mô hình này được tạo lực bởi 8 yếu tố thủy triều chính cho mức nước của phía tây Biển Đông để tạo ra sự điều chỉnh thủy triều. Biên độ và pha thủy triều của các yếu tố thủy triều khác nhau được cho trong Bảng 3.8.

*Bảng 3.8. Bộ hằng số thủy triều trên biên mô hình cho khu vực Cửa Đại, Hội An
(nguồn: Thủy triều toàn cầu TPXO)*

Sóng triều	Điểm biên NW		Điểm biên SE	
	Biên độ (m)	Pha (độ)	Biên độ (m)	Pha (độ)
M2	0,179	102,64	0,194	92,49
S2	0,052	133,45	0,068	125,48
N2	0,027	86,70	0,035	73,05
K2	0,015	111,30	0,022	110,94
K1	0,147	174,68	0,262	171,73
O1	0,086	147,95	0,226	131,32
P1	0,044	166,83	0,081	163,76
Q1	0,033	226,25	0,026	154,29

NW: là điểm biên trên cùng phía tây bắc;

SE: là điểm biên cuối cùng phía đông nam.

Việc giảm đầu vào thủy triều trong nghiên cứu này dựa trên công trình của Lesser (2009), được xây dựng trên công trình trước đó của Hoitink và cộng sự (2003). Theo Lesser giảm các thành phần thủy triều tổng cộng xuống chỉ còn một sự kết hợp của hai yếu tố: M_2 và C_1 là sóng triều tổng hợp từ hai sóng K_1 và O_1 . Biên độ và pha được tổng hợp theo công thức:

$$C_1 = \sqrt{2O_1K_1} \quad (3.3)$$

$$\phi_{C1} = \frac{\phi_{C1} - \phi_{K1}}{2} \quad (3.4)$$

Sự tương tác giữa các thành phần M_2 , O_1 và K_1 trong khu vực đường như rất quan trọng trong các kịch bản vận chuyển bùn cát. Hoitink chỉ ra rằng vận chuyển bùn cát do sự tương tác của ba yếu tố này quan trọng hơn so với vận chuyển bùn cát do tương tác phi tuyến của thủy triều M_2 và M_4 nếu: $2O_1K_1 > M_2M_4$. Điều này sẽ xảy ra ở hầu hết các vị trí trên bờ biển thế giới nói chung và Việt Nam nói riêng, thành phần thủy triều ngày $O1$ và $K1$ đều đáng kể. Các thành phần thủy triều đại diện cho thủy triều hình thái học cụ thể trong nghiên cứu này sẽ phụ thuộc vào các thành phần

M2 và C1. Thành phần thủy triều C_1 với chu kỳ bằng hai lần M_2 tạo ra các tương tác trong vận chuyển bùn cát giống như sự kết hợp của ba thành phần M_2 , O_1 và K_1 .

Lesser (2009) cũng chỉ ra rằng một hệ số tỉ lệ nên được áp dụng cho các yếu tố thủy triều của thủy triều hình thái học để bảo tồn tổng năng lượng thủy triều. Hệ số tỉ lệ tối ưu có thể được xác định thông qua thử và so sánh của vận chuyển bùn cát giữa một mô phỏng thủy triều hình thái học và một mô phỏng với thủy triều đầy đủ. Để thủy triều hình thái học tạo ra cùng một lượng vận chuyển bùn cát và các mẫu thay đổi hình thái học như thủy triều thiên văn đầy đủ, thủy triều hình thái học được chọn thường lớn hơn khoảng 7-20% so với thủy triều thiên văn đầy đủ (Lesser, 2009). Lesser đã xác định hệ số tỉ lệ này là 1,08 cho một số khu vực trên thế giới. Các biên độ thủy triều hình thái học trong nghiên cứu này cũng được sử dụng với hệ số $1,08 \cdot (M_2 + C_1)$.

Các tần số của các thành phần M_2 và C_1 đã được điều chỉnh một chút để làm cho chu kỳ của thủy triều hình thái học chính xác là 1490 phút, với thành phần M_2 đã được điều chỉnh có chu kỳ chính xác là 745 phút. Các điều kiện biên thủy triều mới theo phương pháp trên được cho trong Bảng 3.9.

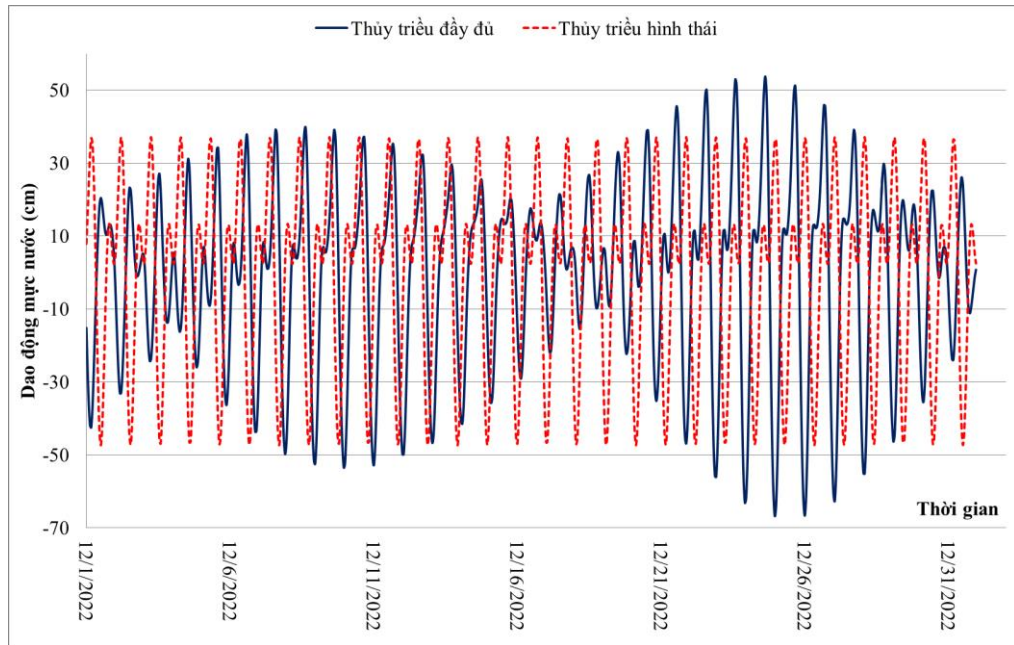
Bảng 3.9. Tổng hợp các thành phần thủy triều hình thái cho khu vực Cửa Đại, Hội An

Sóng triều	Tần số (°/giờ)	Điểm biên NW		Điểm biên SE	
		Biên độ (m)	Pha (độ)	Biên độ (m)	Pha (độ)
C1	14,496644	0,159	161,31	0,344	151,5
M2	28,993288	0,179	102,64	0,194	92,49

Hình 3.29 đưa ra so sánh giao động mực nước thủy triều dạng đầy đủ và dạng thủy triều hình thái học tại khu vực Cửa Đại.

Ngoài các thành phần thủy triều hình thái, khu vực Cửa Đại cần thiết hiệu chỉnh mực nước dâng theo mùa với sóng SA và SSA có biên độ tổng cộng 0,4 m (kết quả phân tích thủy triều từ chuỗi đo đạc tại trạm Sơn Trà và Trạm Hội An). Như vậy, trong các tháng mùa hè, mực nước tĩnh sẽ được thêm vào thành phần nước rút là -

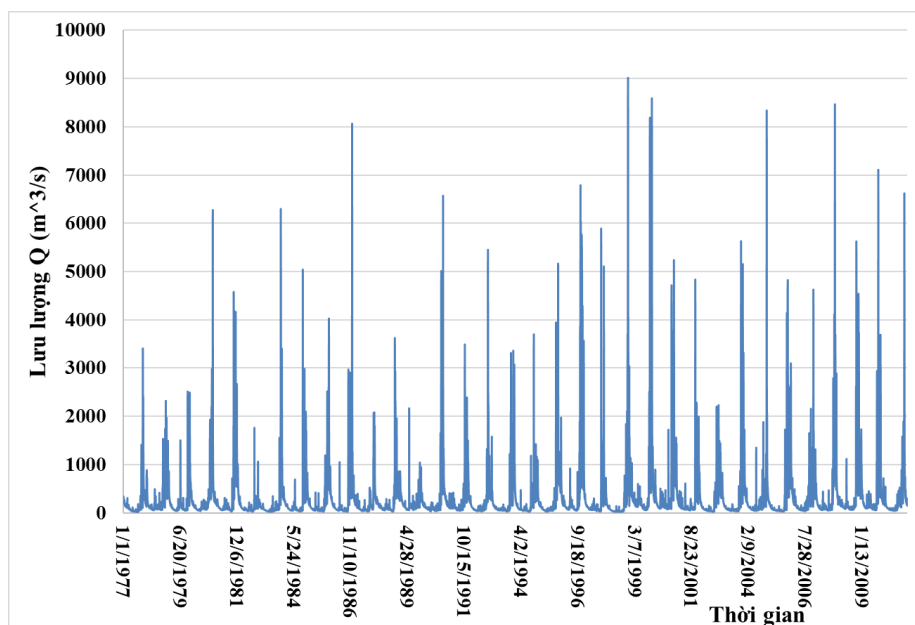
0,2 m và mùa đông mực nước dâng là 0,2 m.



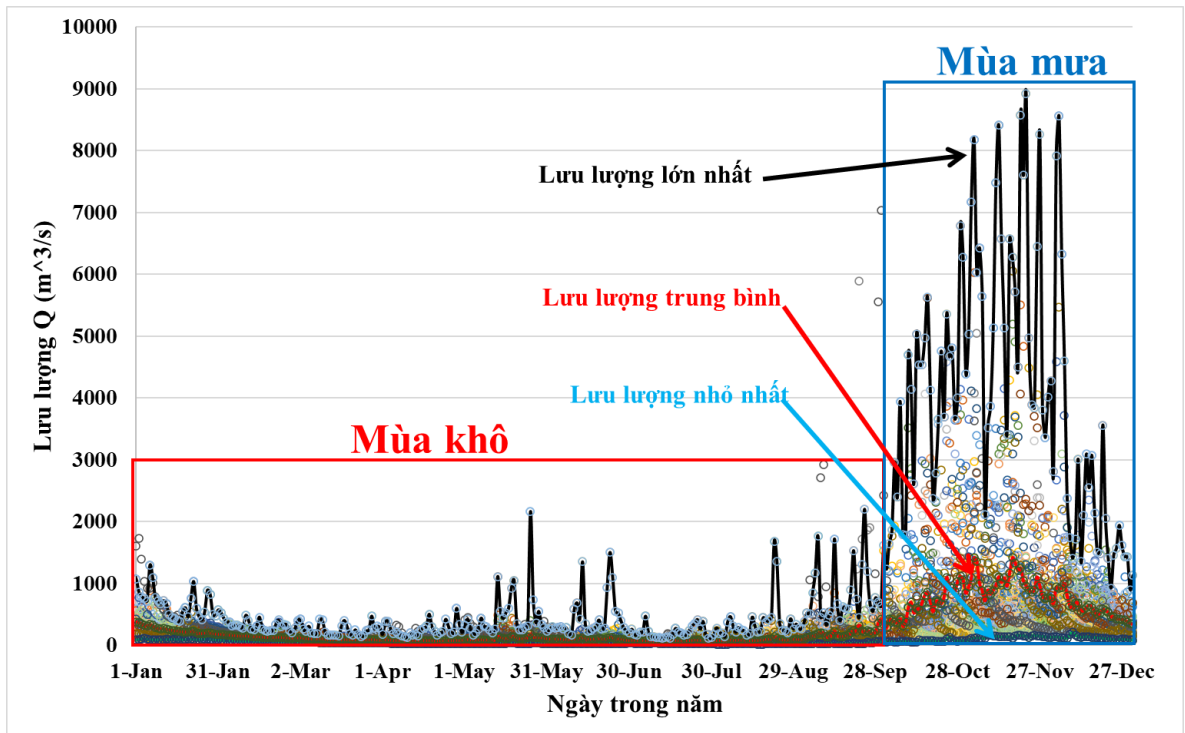
Hình 3.29. Dao động mực nước thủy triều trong trường hợp đầy đủ hằng số (nét liền, màu xanh đậm) và với các hằng số triều hình thái học (nét đứt, màu đỏ).

3.4.2. Phân tích lưu lượng sông theo hình thái học

Lưu lượng sông được thiết lập tại biên khu vực cầu Câu Lâu. Dữ liệu lưu lượng được thu thập và phân tích từ các trạm thủy văn Nông Sơn và Thành Mỹ trong khoảng thời gian nhiều năm từ 1977 đến năm 2023. Lưu lượng trong lưu vực đổ ra Cửa Đại Hội An chủ yếu từ trạm Nông Sơn, Trạm Thành Mỹ đổ về hệ thống sông Vu Gia và thoát ra biển qua Sông Hàn (Hình 3.30÷3.31).



Hình 3.30. Diễn biến lưu lượng tại trạm thủy văn Nông Sơn từ năm 1977-2010



Hình 3.31. Sơ đồ diễn biến lưu lượng trung bình ngày trong năm

Hệ thống sông Vu Gia - Thu Bồn nằm trong địa phận tỉnh Quảng Nam, nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa, lượng mưa trung bình đạt khoảng 2000 đến 2500 mm với hơn 70% tập trung vào các tháng mùa mưa (tháng 10, 11 và 12). Theo kết quả trình bày tại hình trên cho thấy, lưu lượng tại trạm Nông Sơn có thể chia ra làm hai giai đoạn tương ứng với hai mùa: mùa mưa (tháng 10, 11 và 12) mùa khô là các tháng còn lại trong năm. Lưu lượng lớn nhất trong giai đoạn thống kê là 8920 m³/s và lưu lượng trung bình là 283 m³/s. Bảng 3.10 đưa ra thống kê các mức lưu lượng trong phân đoạn mùa trong năm.

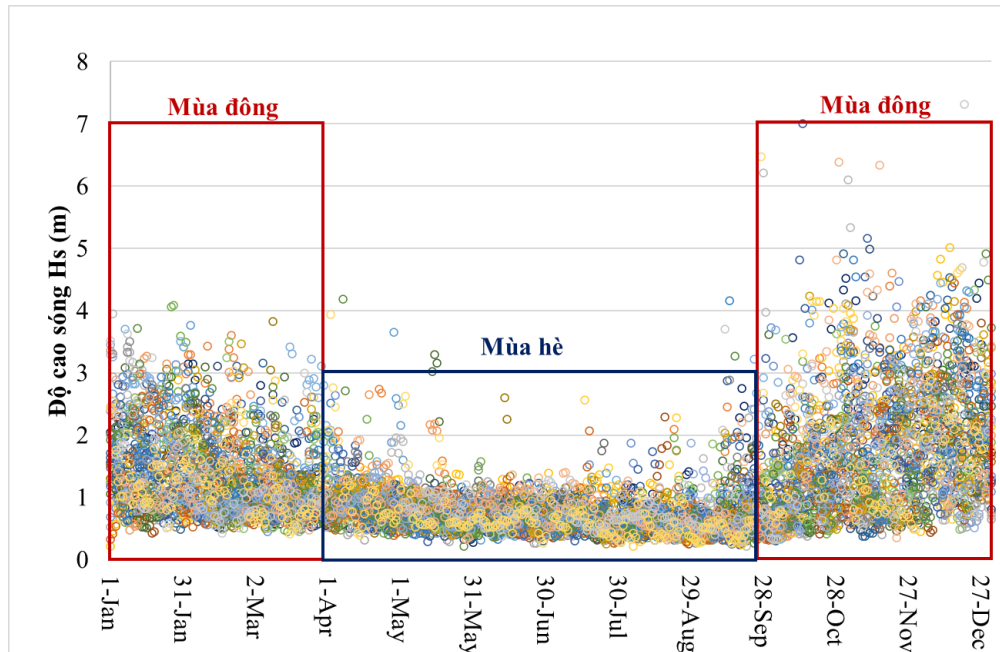
Bảng 3.10. Các giá trị thống kê lưu lượng trên hệ thống sông Thu Bồn

Lưu lượng (m ³ /s)	Mùa mưa	Mùa khô
Giá trị cực đại	8920	2200
Giá trị trung bình	758	123
Giá trị nhỏ nhất	50	15,8

Như vậy, bằng sơ đồ phân loại lưu lượng theo hai mùa như trên, các tham số sóng tương ứng được tổng hợp trong cùng hình thể khi tính toán.

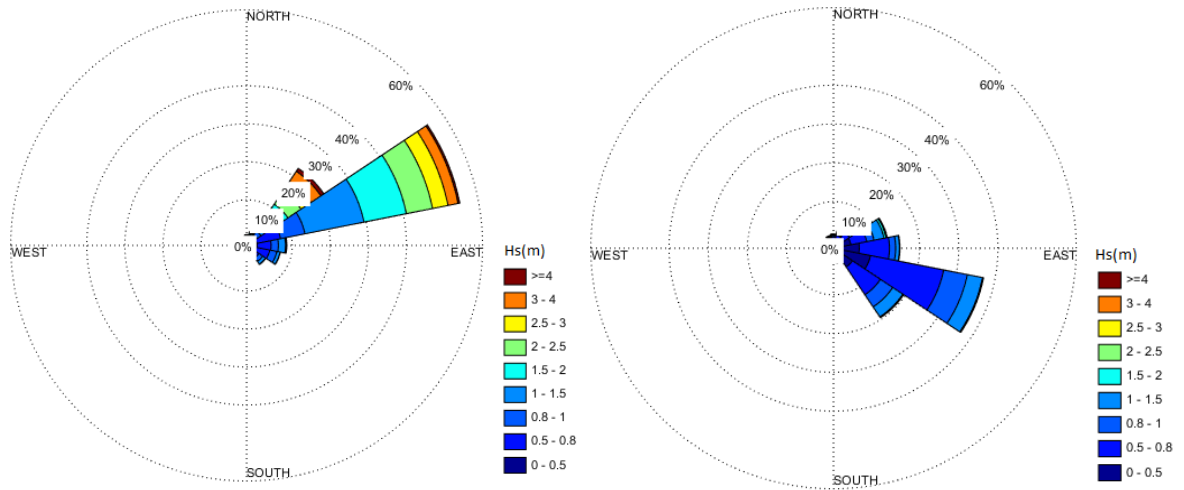
3.4.3. Phân tích năng lượng sóng theo hình thái học

Chuỗi dữ liệu sóng nước sâu từng giờ tái phân tích từ gió NCEP tại trạm ngoài khơi đảo Cù Lao Chàm (tọa độ: 16° 0'0,00"N, 108°37'30,00"E) từ năm 1995 đến 2023 [34] được thu thập và phân tích các chế độ theo các hình thái trong nghiên cứu biến động hình thái. Từ chuỗi dữ liệu dài hạn, tác giả tiến hành phân tích diễn biến các tham số sóng trung bình theo ngày. Hình 3.32 đưa ra diễn biến độ cao sóng trung bình theo ngày tại vị trí sóng nước sâu.



Hình 3.32. Phân bố độ cao sóng theo trung bình ngày (chuỗi số liệu 1995 -2022)

Kết quả phân tích hoa sóng và tần suất sóng nước sâu khu vực biển Cửa Đại, Hội An thể hiện trong Hình 3.33 và Bảng 3.11 cho thấy, những con sóng trong giai đoạn mùa đông đạt giá trị cao đáng kể hơn so với giai đoạn mùa hè. Chiều cao sóng trong giai đoạn mùa đông có thể lên đến 7 m. Trong giai đoạn này, chiều cao sóng quan trọng trung bình là khoảng 1,56 m. Những con sóng trong giai đoạn mùa chủ yếu đến từ hướng đông bắc - đông, với hai hướng sóng chủ đạo là đông bắc và đông đông bắc. Ngược lại, Giai đoạn mùa hè có giá trị chiều cao sóng tối đa dưới 3 m, với giá trị chiều cao sóng quan trọng trung bình là 0,74 m. Trong giai đoạn này, sóng cũng chủ yếu đến từ hướng đông-đông nam, với hướng sóng chủ đạo là đông nam.



Hình 3.33. Hoa sóng cực đại trong hai mùa: Mùa đông và Mùa hè

Bảng 3.11. Tần suất sóng nước sâu khu vực biển Cửa Đại, Hội An

Hs/Dir	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tổng %
0.25-0.50	0.20	0.37	0.69	1.78	2.86	4.44	2.11	0.51	0.23	0.15	0.09	0.03	0.02	0.04	0.08	0.14	13.74
0.50-1.00	0.56	0.73	2.67	9.50	7.31	15.19	7.60	0.40	0.15	0.10	0.05	0.01	0.03	0.07	0.18	0.45	44.99
1.00-1.50	0.19	0.35	2.68	9.10	1.36	2.28	1.94	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.19	18.18
1.50-2.00	0.11	0.24	2.39	5.86	0.15	0.14	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	9.10
2.00-2.50	0.10	0.17	2.22	3.54	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	6.13
2.50-3.00	0.05	0.08	1.61	2.05	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	3.83
3.00-3.50	0.03	0.06	1.01	0.94	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.05
3.50-4.00	0.01	0.04	0.59	0.41	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05
4.00-5.00	0.00	0.02	0.43	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64
5.00-6.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
....>6.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
Lặng sóng	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.18
Tổng %	1.25	2.08	14.35	33.42	11.78	22.14	11.86	0.94	0.39	0.25	0.15	0.05	0.05	0.12	0.32	0.85	100.00

Để phục vụ cho mô hình tính toán biến động hình thái dài hạn, năng lượng sóng cần thiết phải đưa về dạng các hình thể sóng đặc trưng. Phương pháp tổng hợp các hình thể sóng đặc trưng theo năng lượng được sử dụng theo nghiên cứu của Dano Roelvink như sau:

- Độ cao sóng:

$$H_{s,mor} = \left(\frac{\sum_i [p_i H_{s,i}^{2,5}]}{\sum_i (p_i)} \right)^{1/2,5} \quad (3.5)$$

Chu kỳ sóng: T_{mor} = chu kỳ trung bình;

Hướng sóng: Dir_{mor} = Hướng sóng trung bình;

Trong đó: i là chỉ số tương ứng của thành phần sóng;

P là tần suất của sóng thành phần.

Do những tính chất chung và riêng của khu vực nghiên cứu, trong quá trình xây dựng mô hình hình thái dài hạn, tác giả sử dụng hai giai đoạn mô phỏng. Giai đoạn 1, quá trình cung cấp trầm tích từ sông ra khu vực cửa sông và lân cận. Giai đoạn 2, giai đoạn phân bố lại lượng bùn cát đã được sông đưa ra trong giai đoạn trước.

Trong giai đoạn đầu: Do tính chất rất đặc thù trong chế độ lũ tại khu vực nghiên cứu là dạng lũ lớn xảy ra trong khoảng thời gian rất ngắn (3-7 ngày) và đem lượng bùn cát rất lớn từ trong sông ra khu vực cửa. Theo các phân tích cho thấy, một trận lũ lớn tại khu vực sông Thu Bồn chiếm đến 70% lượng nước trong toàn năm và % bùn cát trong tổng lượng bùn cát trong. Do đó giai đoạn này cần tách ra mô phỏng riêng theo mô hình thời gian thực.

Trong giai đoạn 2: Giai đoạn này là giai đoạn lượng bùn cát được đưa từ sông ra khu vực trước cửa sông được tái phân bố lại dưới tác động tổng hợp của các yếu tố thủy động lực học của sông, biển và sóng. Trong giai đoạn này, tác giả sử dụng phương pháp tổng hợp của các hình thể sóng khí hậu theo hai mùa đông và mùa hè kết hợp với lưu lượng trung bình trong hai mùa tương ứng để mô phỏng dài hạn với hệ số tăng tốc tương ứng. Ngoài ra, để kết quả mô phỏng sát với thực tế, mực nước dâng theo mùa (rất đáng kể) được cộng thêm vào mực nước trung bình tương ứng với các mùa (Bảng 3.12).

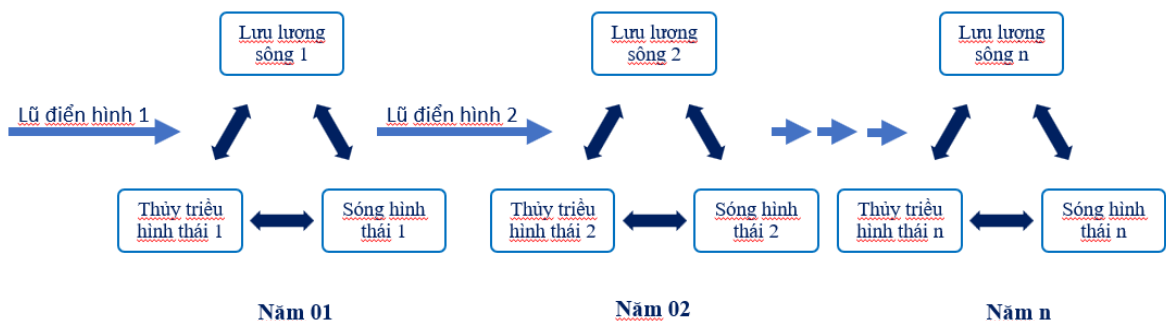
Bảng 3.12. Các hình thể sóng khí hậu theo mùa tại khu vực nghiên cứu

TT	Hình thể sóng	Độ cao sóng (m)	Chu kỳ sóng (s)	Hướng sóng (độ)	Hệ số tăng tốc tính toán (morfac)
1	SCN1	0,76	4,71	0,00	3,22
2	SCN2	2,37	9,32	0,00	1,35
3	SCN3	0,74	5,11	22,50	4,63
4	SCN4	2,46	9,81	22,50	2,94
5	SCN5	0,84	5,10	45,00	16,11
6	SCN6	2,55	9,36	45,00	36,22
7	SCN7	0,86	5,12	67,50	56,41
8	SCN8	2,15	9,57	67,50	65,54

TT	Hình thể sóng	Độ cao sóng (m)	Chu kỳ sóng (s)	Hướng sóng (độ)	Hệ số tăng tốc tính toán (morfac)
9	SCN9	0,70	4,76	90,00	40,33
10	SCN10	1,65	6,03	90,00	2,57
11	SCN11	0,60	4,14	112,50	57,42
12	SCN12	1,23	7,22	112,50	23,25
13	SCN13	0,56	4,32	135,00	26,59
14	SCN14	1,21	5,42	135,00	16,57

3.4.4. Tổng hợp nghiên cứu mô phỏng biến động hình thái dài hạn theo phương pháp hình thái học

Điều kiện biên cho mô hình số trị mô phỏng biến động hình thái được tổng hợp từ số liệu thủy triều hình thái, lũ trung bình mùa và sóng hình thái. Dựa trên đặc điểm riêng của chế độ thủy văn tại khu vực nghiên cứu, lưu lượng lũ được tách riêng coi như một thành phần độc lập được tính toán trước các điều kiện tổ hợp hình thái khác. Một chu kỳ năm ở đây được coi là thời gian mô phỏng cho lũ điển hình + tổ hợp các điều kiện hình thái. Hình 3.34 đưa ra sơ đồ mô tả điều kiện biên đầu vào cho mô hình số trị mô phỏng biến động hình thái trong dài hạn.

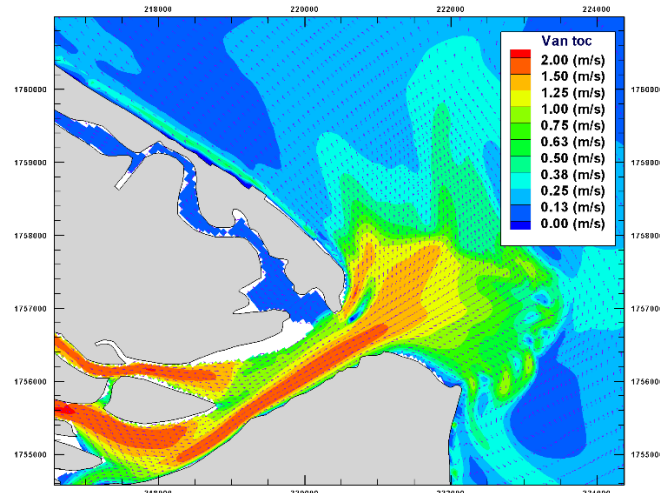


Hình 3.34. Sơ đồ tổng hợp điều kiện biên mô phỏng biến động hình thái dài hạn theo phương pháp hình thái học

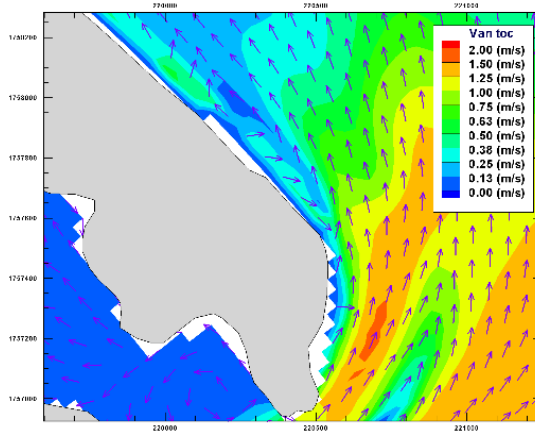
3.5. Kết quả mô phỏng biến động bãi biển, cửa sông khu vực Cửa Đại - Hội An

3.5.1. Kết quả mô phỏng trường thủy động lực học

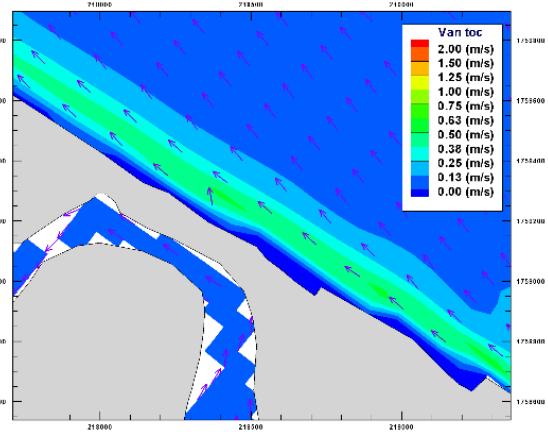
Kết quả mô phỏng trường dòng chảy khu vực Cửa Đại - Hội An được thể hiện trên các Hình 3.35÷3.37.



Hình 3.35. Trường dòng chảy trong khoảng thời gian lưu lượng cao



Hình 3.36. Trường dòng chảy tại khu vực phân kỳ



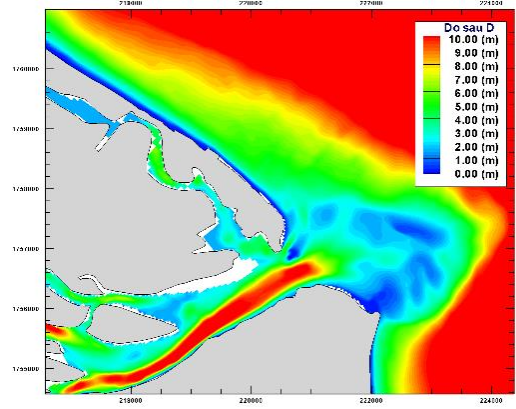
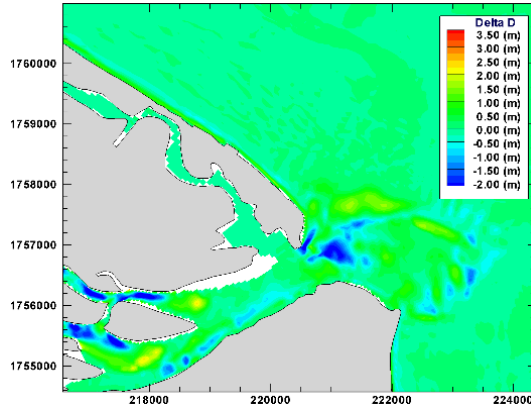
Hình 3.37. Trường dòng chảy trước bãi Cửa Đại

Nhận xét: Phần lớn dòng chảy phân tán xuống phía nam khi ra khỏi cửa sông. Phía bờ bắc, dòng chảy chủ yếu là dòng do sóng tại sát bờ biển và có sự phân kỳ dòng chảy tại khu trước khách sạn Victorya tạo ra hai dòng trái ngược nhau. Trong sông, dòng chảy có cường độ mạnh bám sát khu vực bờ nam với vận tốc tại thời điểm có lưu lượng lớn như lũ là 1,8 m/s. Kết quả tính toán cho thấy vị trí điểm phân kỳ tương đối khác so với kết quả đánh giá trước đó của GS. Stive. Điểm phân kỳ dòng chảy nằm tại KS Fusion Alya. Dòng chảy sát bờ có hướng bắc - nam từ khách sạn Fusion Alya đến Cửa Đại và bị chặn lại bởi dòng từ sông ra tại cửa sông. Ngược lại từ KS Fusion Alya về phía bắc có dòng chảy nam - bắc. Tại khu vực bãi Cửa Đại, dòng chảy

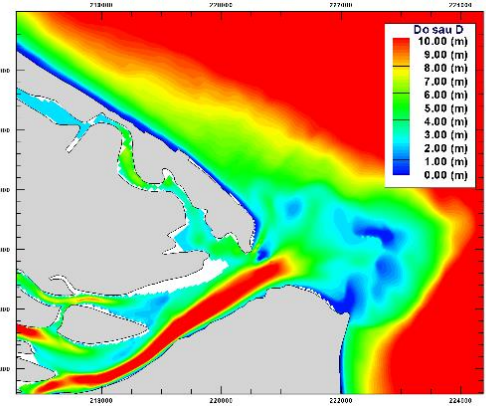
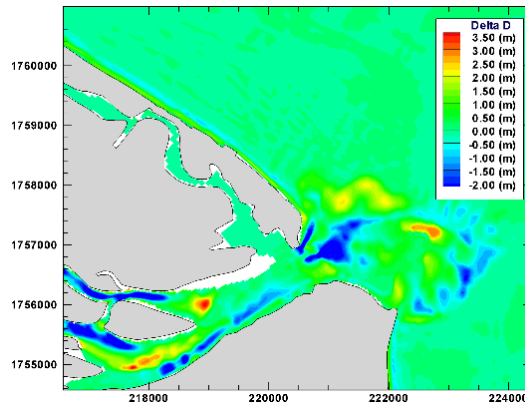
chủ yếu gây ra do sóng. Dòng chảy từ sông ra chủ yếu đi thẳng ra phía biển và một phần lệch xuống phía bờ nam.

3.5.2. Kết quả mô phỏng biến đổi hình thái và đáy biển

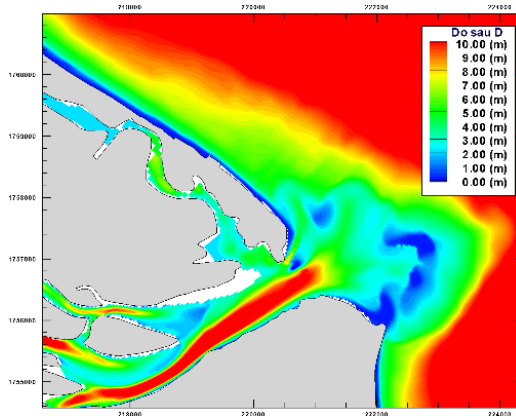
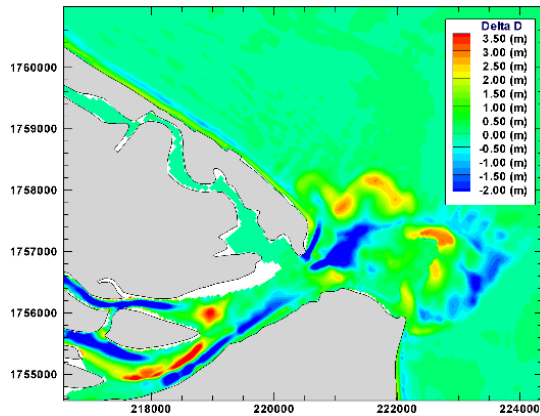
Mô phỏng hình thái được tính toán cho kịch bản hiện trạng (1 chu kỳ hình thái học) và diễn biến tiếp theo cho 5 chu kỳ hình thái học tiếp theo để có thể ước lượng sự tiến triển của địa hình đáy biển (các Hình 3.38÷3.47).



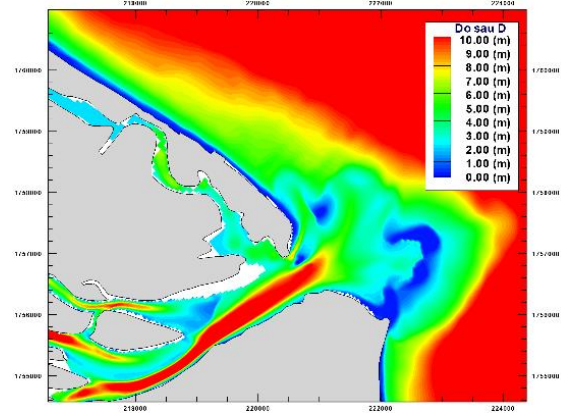
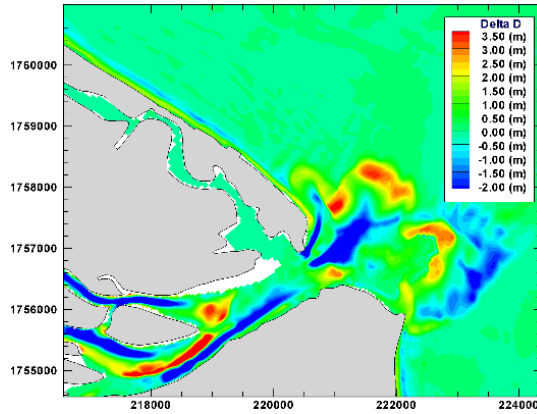
Hình 3.38. Biến động địa hình đáy sau 1 năm Hình 3.39. Cao độ đáy biển sau 1 năm



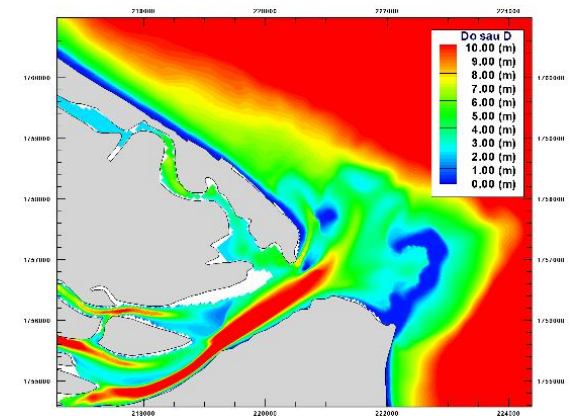
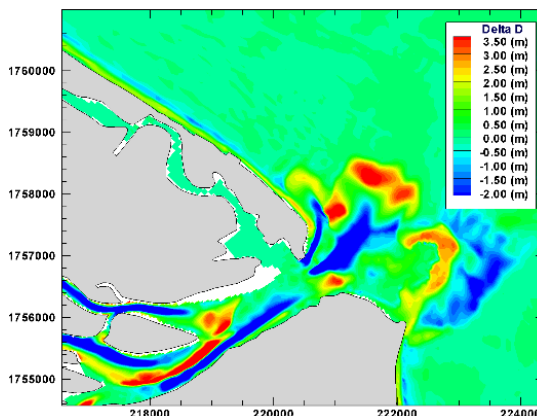
Hình 3.40. Biến động địa hình đáy sau 2 năm Hình 3.41. Cao độ đáy biển sau 2 năm



Hình 3.42. Biến động địa hình đáy sau 3 năm Hình 3.43. Cao độ đáy biển sau 3 năm



Hình 3.44. Biến động địa hình đáy sau 4 năm Hình 3.45. Cao độ đáy biển sau 4 năm



Hình 3.46. Biến động địa hình đáy sau 5 năm Hình 3.47. Cao độ đáy biển sau 5 năm

Bùn cát từ sông chủ yếu phân phối cho cồn cát trước cửa và di chuyển dần xuống phía nam. Kết quả sau 5 năm cồn cát phải ngoài nối liền với phần doi cát phải bờ nam. Một phần bùn cát từ cồn được phân phối cho bờ phía bắc ngay tại mũi cát cửa sông và dần hòa nhập vào với doi cát này tạo ra doi kéo dài tuy nhiên nhỏ hơn so với doi phía nam.

Đối với bãi biển phía bắc (bãi Cửa Đại), bãi biển trở lên dốc hơn do xói lở diễn ra mạnh tại đới sóng đổ và dòng dọc bờ đem bùn cát lên phía bắc.

Đối với khu vực trong sông: Luồng chính dần dịch chuyển sang bờ phía nam và lấn vào phía bờ.

3.6. Kết quả mô phỏng biến động đáy biển, cửa sông khu vực Cửa Đại-Hội An trong điều kiện bản biến đổi khí hậu

3.6.1. Các thiết lập kịch bản tính toán nước biển dâng do biến đổi khí hậu

- Kịch bản biến đổi khí hậu R4.5 và 8.5

Theo báo cáo kết quả nghiên cứu tổng hợp về biến đổi khí hậu do bộ tài nguyên và môi trường công bố trong [41]. Kịch bản nước biển dâng cho Việt Nam năm 2020 được cập nhật theo kết quả mới nhất về kịch bản nước biển dâng toàn cầu của IPCC, báo cáo SROCC 2019[42], Kịch bản nước biển dâng do biến đổi khí hậu tại khu vực Biển Đông như sau:

Bảng 3.13. Kịch bản nước dâng do biến đổi khí hậu khu vực biển Việt Nam

Kịch bản	Các mốc thời gian của thế kỷ 21							
	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
RCP4.5	12 (8 ÷ 18)	18 (11 ÷ 25)	23 (14 ÷ 33)	29 (18 ÷ 42)	35 (22 ÷ 51)	42 (26 ÷ 61)	48 (30 ÷ 71)	55 (34 ÷ 81)
RCP8.5	14 (10÷19)	20 (14÷27)	28 (20÷37)	34 (23 ÷ 47)	43 (28 ÷ 59)	52 (35 ÷ 72)	64 (42 ÷ 88)	77 (51÷106)

Trong nghiên cứu này, tác giả lựa chọn hai kịch bản nước dâng do biến đổi khí hậu RCP4.5 và RCP8.5 tại năm 2100 làm dữ liệu nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng tới bãi biển khu vực Cửa Đại

Để thuận tiện cho việc đánh giá kết quả, tác giả tiến hành trích xuất kết quả tính toán trên 08 mặt cắt ngang bãi biển dọc theo khu vực biển Cửa Đại. Vị trí các mặt cắt ngang được trình bày trong bảng 3.5.2.

Bảng 3.14. Bảng mặt cắt bãi biển dùng trích xuất dữ liệu

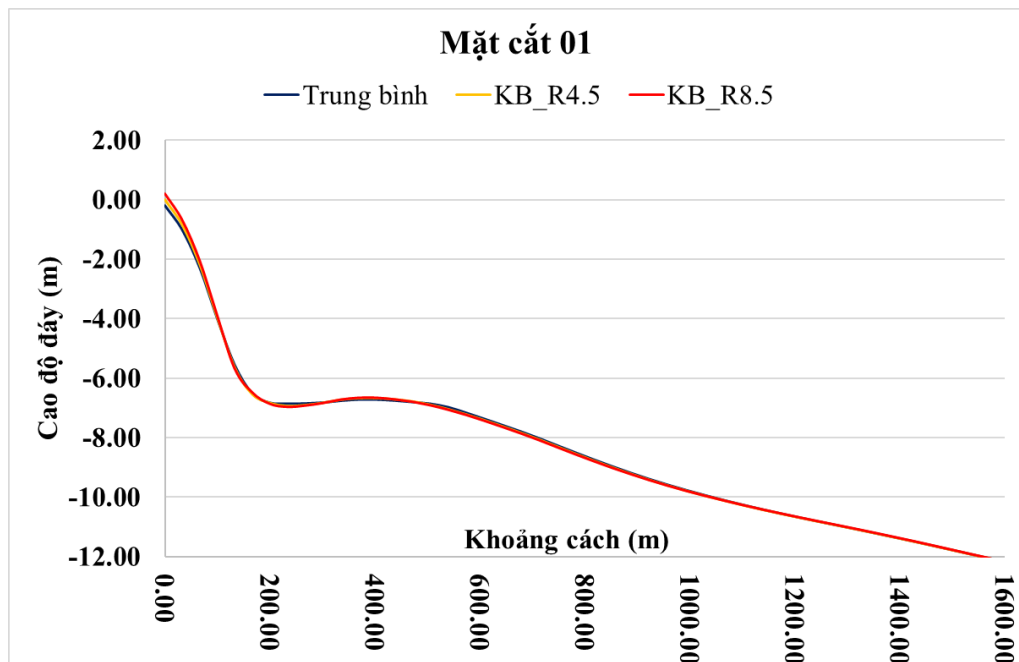
TT	Tên mặt cắt	Vị trí mặt cắt ngang
1	MC01	Bãi biển Tân Mỹ
2	MC02	Bãi biển Cửa Đại
3	MC03	Khách sạn Gold sand
4	MC04	Khách sạn Sunrie
5	MC05	Khách sạn Vinpearl
6	MCBB	Bờ bắc sông Cửa Đại
7	MCBN	Bờ bắc Nam Cửa Đại

8	MCMD	Mặt cắt giữa Cửa Đại
---	------	----------------------

3.6.2. Kết quả mô phỏng cho kịch bản R4.5 và R8.5

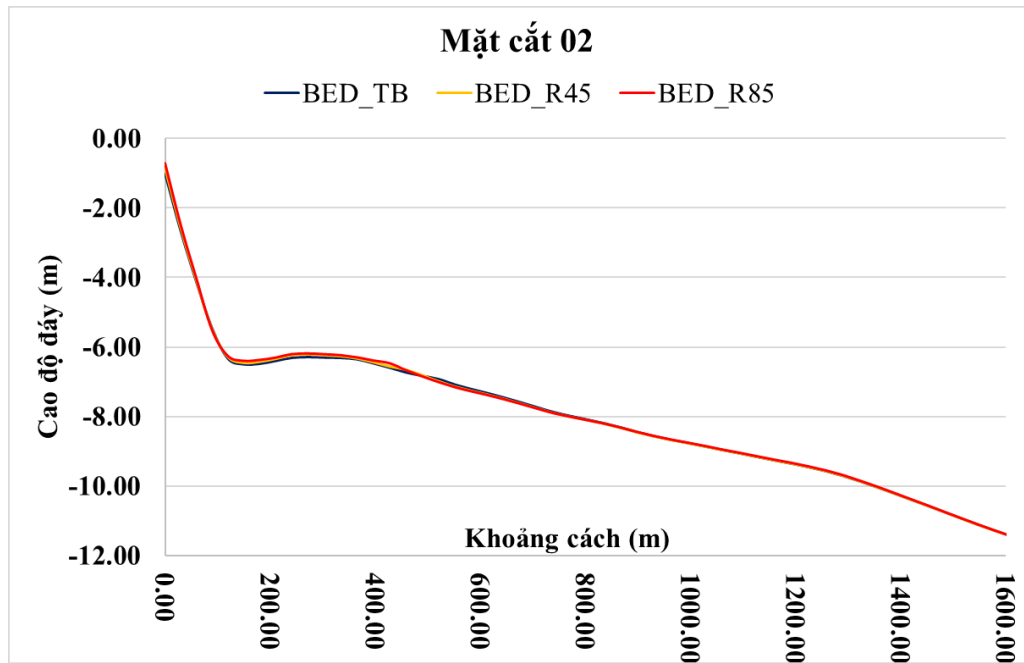
Các kết quả sau khi tính toán đối với kịch bản hiện trạng và hai kịch bản nước dâng do biến đổi khí hậu RCP4.5 và RCP8.5 được trích xuất và phân tích trên 08 mặt cắt ngang.

- Kết quả mô phỏng kết quả tính toán trên mặt cắt 01 (Bãi biển Tân Mỹ)



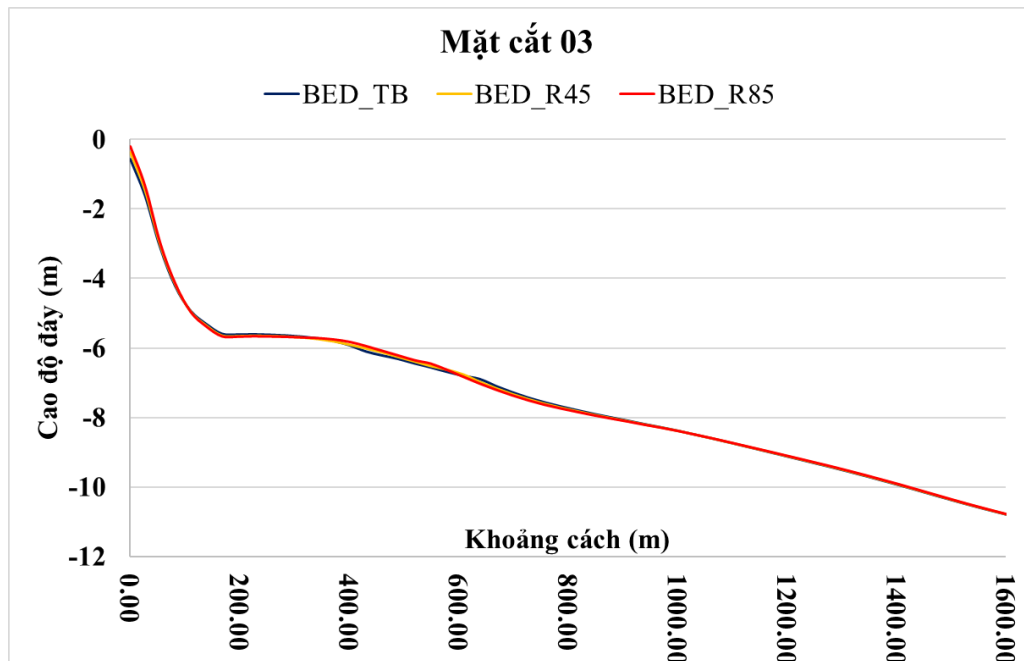
Hình 3.51. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 01 (Bãi biển Tân Mỹ)

Kết quả mô phỏng kết quả tính toán trên mặt cắt 02 (Bãi biển Cửa Đại)



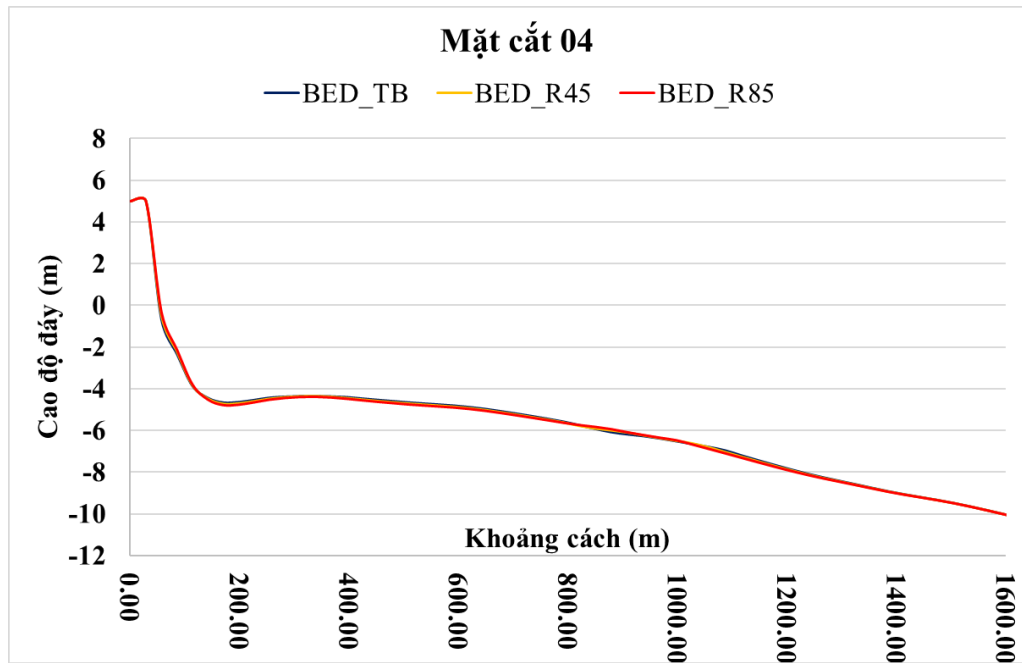
Hình 3.52. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 02 (Bãi biển Cửa Đại)

Kết quả mô phỏng kết quả tính toán trên mặt cắt 03 (Bãi biển KS Gold Sand)



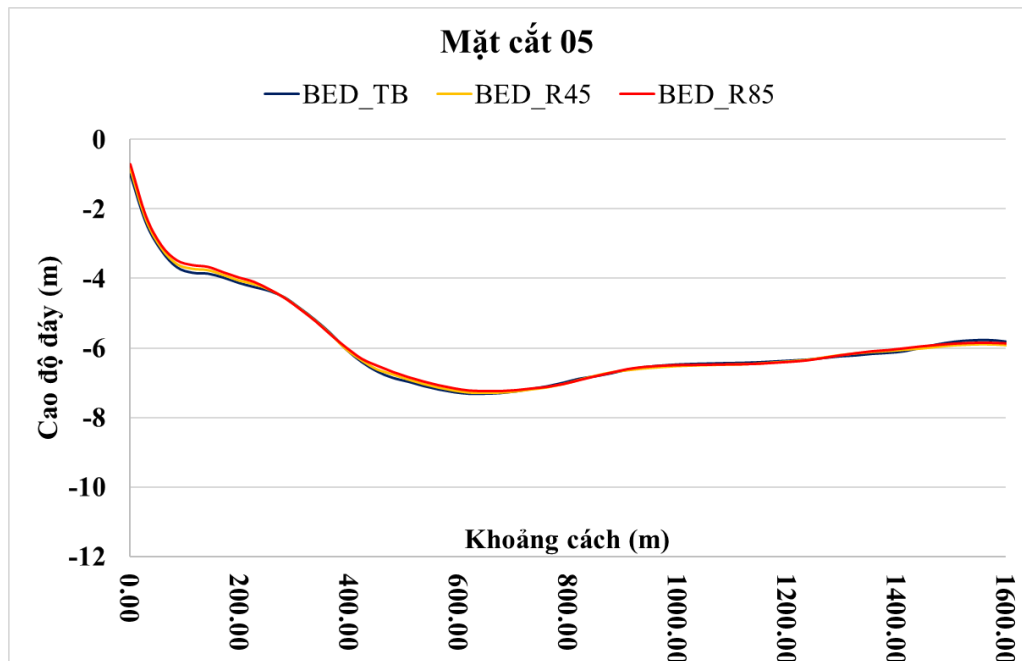
Hình 3.53. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 03 (Bãi biển KS Gold Sand)

Kết quả mô phỏng kết quả tính toán trên mặt cắt 04 (Bãi biển KS Sunrise)



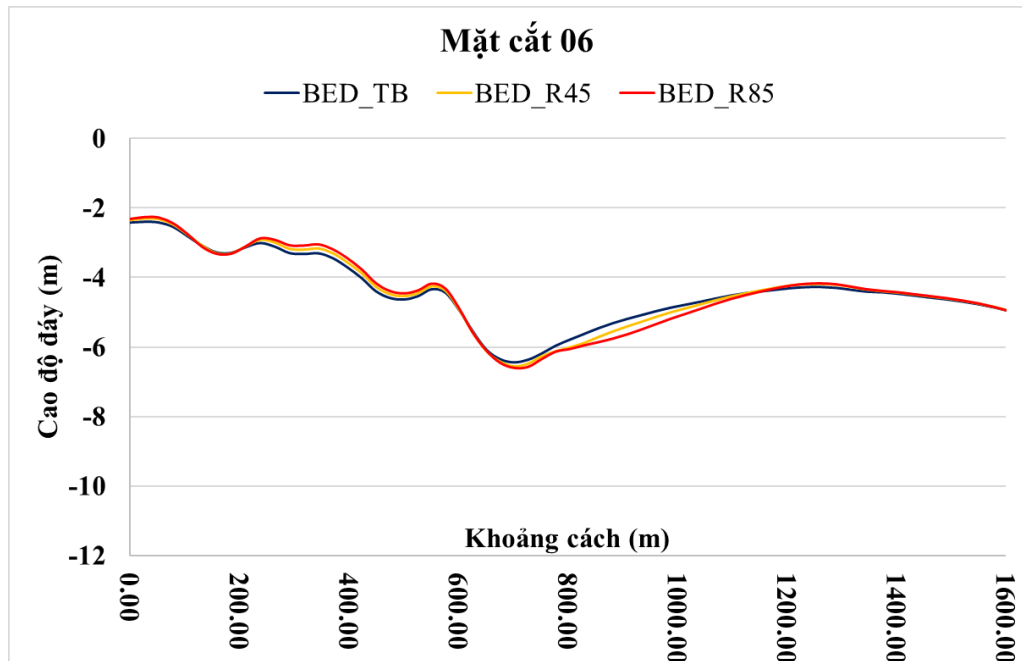
Hình3.54. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 04 (Bãi biển KS Sunrise)

Kết quả mô phỏng kết quả tính toán trên mặt cắt 05 (Bãi biển KS Vinpeal)



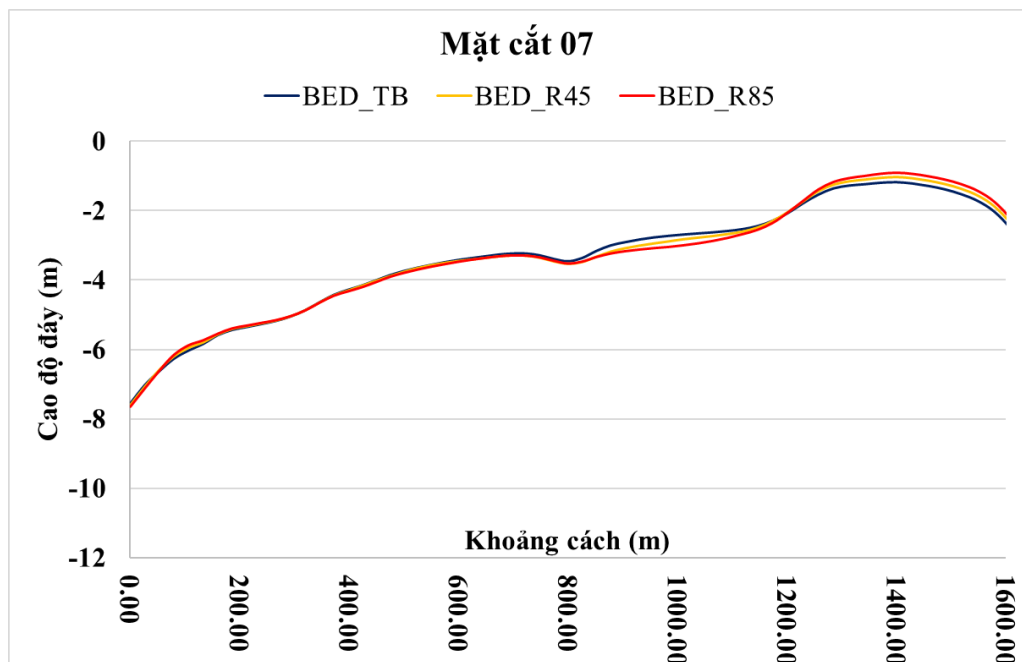
Hình 3.55. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 05 (Bãi biển KS Vinpeal)

Kết quả mô phỏng kết quả tính toán trên mặt cắt 06 (Bờ sông phía bắc Cửa Đại)



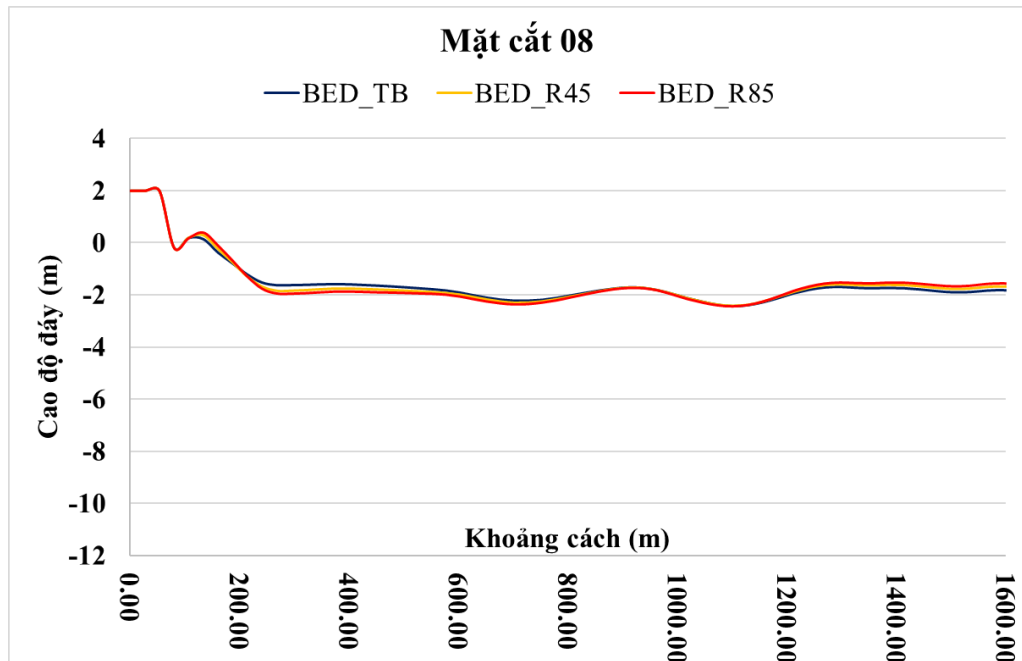
Hình 3.56. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 06 (Bờ sông phía bắc Cửa Đại)

Kết quả mô phỏng kết quả tính toán trên mặt cắt 07 (Mặt cắt trung tâm sông Cửa Đại)



Hình 3.57. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 06 (Mặt cắt trung tâm sông Cửa Đại)

Kết quả mô phỏng kết quả tính toán trên mặt cắt 08 ((Bờ sông phía nam Cửa Đại)



Hình 3.58. So sánh địa hình đáy biển giữa các kịch bản nước dâng tại mặt cắt số 06 (Bờ sông phía nam Cửa Đại)

Trên đây là kết quả mô phỏng và so sánh các kết quả biến đổi hình thái bãi biển đối với ba kịch bản bình thường, kịch bản R4.5 và kịch bản R8.5 cho 08 mặt cắt ngang khu vực biển Cửa Đại. Các kết quả cho thấy không có sự khác biệt quá lớn về biến động hình thái giữa các kịch bản. Đối với bãi biển hiện trạng vẫn tương đối tự nhiên như bãi biển Tân Mỹ và bãi biển Cửa Đại, có sự khác biệt nhỏ tại các vị trí trên cao của bãi như trên dune cát, có sự bồi lắng mạnh hơn đối với các kịch bản nước dâng cao hơn như kịch bản R8.5. Các bãi biển còn đã có sự can thiệp bởi các công trình bảo vệ như kè cứng, các kết quả đối với các kịch bản là không có sự khác biệt.

3.7. Kết luận Chương 3

Trong chương này cơ bản đã làm rõ được các vấn đề sau:

Trong chương này nghiên cứu sinh đã giới thiệu mô hình mô phỏng biến động hình thái Delft3d và ứng dụng thành công cho nghiên cứu tại khu vực Cửa Đại – Hội An. Mô hình Delft3d là mô hình tính toán mô phỏng các yếu tố thủy thạch động lực học và vận chuyển bùn cát, biến động đáy biển trên quy mô thời gian ngắn và trung bình giao động từ đơn vị ngày, tuần và tháng cho độ chính xác cao. Tuy nhiên, với yêu cầu nghiên cứu cần thiết các tính toán mô phỏng trong quy mô thời gian dài hơn tới quy mô mùa, năm và nhiều năm, việc áp dụng mô hình trở lên khó khăn do tài

nguyên máy tính và quá trình phát sinh trong sai số tính toán. Do đó, trong nghiên cứu này nghiên cứu sinh đã giới thiệu phương pháp phân tích dữ liệu điều kiện biên và đầu vào để có thể áp dụng tính toán mô phỏng mô hình trong dài hạn.

Để có thể mô phỏng hiện trạng biến động hình thái trong khu vực nghiên cứu, mô hình toán Delft3d đã được hiệu chỉnh và kiểm định kỹ lưỡng với bộ số liệu các tham số đo đạc thủy động lực học và cho độ chính xác khá tốt. Ngoài ra, mô hình còn được kiểm định so sánh kết quả biến động bãi biển với số liệu phân tích giải đoán từ ảnh vệ tinh. Đây là một trong các công đoạn rất khó tiến hành khi áp dụng mô hình số mô phỏng vận chuyển bùn cát và biến động bãi biển do rất khó tiến hành đo đạc biến động bãi biển trên diện rộng.

Kết quả tính toán hiện trạng thủy động lực học cho thấy rằng: Tại khu vực bãi biển phía bắc, dòng chảy do sóng gây ra là chính. Tồn tại dòng chảy dọc bờ có hướng nam - bắc từ KS Fusion Alya lên phía bắc và dòng chảy có hướng bắc - nam từ KS Fusion Alya về cửa sông và bị chặn lại bởi dòng từ sông ra. KS Fusion Alya là điểm phân kỳ của dòng chảy dọc bờ. Dòng chảy sông ra phía biển chủ yếu đi theo hai hướng chính là hướng thẳng ra ngoài khơi tại phần phía bắc và hướng lệch về phía nam tại phần phía nam.

Kết quả mô phỏng biến đổi hình thái hiện trạng thấy rằng: có sự xói lở lòng sông sát bờ phía nam. Lượng bùn cát trong sông được đưa ra thêm cát theo hướng thẳng góc tại phần nửa phía bắc và lệch xuống phía nam tại nửa phía nam. Hình thành bãi bồi tụ tại rìa ngoài của thêm cát.

Các giai đoạn mô phỏng với các chu kỳ tiếp theo 2, 3, 4,5 năm cho biết diễn biến tiếp theo với hiện trạng nếu không có biện pháp can thiệp thì thêm cát tiếp tục di chuyển xuống phía nam. Phần cồn cát phía ngoài dần dịch chuyển vào bờ và nhập với mũi phía nam tạo doi cát lớn. Tuy nhiên, do yếu tố động lực học khá yếu tại phần phía nam nên bùn cát không di chuyển được xa mà tập trung lại gần ngay sát cửa sông. Tại mũi phía bắc, cát được cung cấp từ thêm cát phía ngoài vào tạo nên doi cát phía trước có quy mô đến vài trăm mét. Hiện tượng hạ thấp đáy biển diễn ra dọc theo bãi biển Cửa Đại, làm cho độ dốc bãi biển khu vực này ngày càng tăng.

Việc ứng dụng thành công phương pháp phân tích hình thái học đối với các tham số đầu vào và mô phỏng thành công hiện trạng cơ chế vận chuyển bùn cát và biến động bãi biển đối với khu vực nghiên cứu là một đóng góp mới của nghiên cứu sinh đối với nghiên cứu trong khu vực.

Các kết quả mô phỏng đánh giá với hai kịch bản nước dâng do biến đổi khí hậu RCP4.5 và RCP8.5 cho thấy không có sự khác biệt lớn về biến động bãi biển dưới tác động của yếu tố nước dâng do biến đổi khí hậu.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP KỸ THUẬT ỔN ĐỊNH CỬA SÔNG VÀ BÃI BIỂN CỬA ĐẠI, HỘI AN

4.1. Hiện trạng khu vực nghiên cứu

4.1.1. Vị trí địa lý, địa hình và địa mạo khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu (Hình 4.1) nằm trong vùng cửa sông của hệ thống sông Thu Bồn, đây là hệ thống sông thuộc loại lớn trong khu vực Trung Trung Bộ. Khu vực cửa Đại nằm giữa thành phố Hội An bên bờ phía bắc có bãi biển Cửa Đại nổi tiếng và Xã Duy Xuyên ở phía nam với các khu du lịch mới nổi như khu du lịch nam Hội An. Khu vực nghiên cứu bao gồm khu vực cửa sông và vùng bãi biển lân cận.



Hình 4.1. Hình ảnh khu vực biển Cửa Đại – Hội An

Phần bãi biển cấu tạo chủ yếu là dạng cát hạt vừa và mịn được bồi tụ qua nhiều năm. Dọc theo bãi biển có hệ thống các đụn cát cao từ 5 đến 7 m. Phần cửa sông là ngã ba hợp lưu của ba con sông là sông Thu Bồn, sông Trường Giang và sông Đé Vống và đổ ra biển với tên gọi là Cửa Đại.

Khu vực nghiên cứu chịu tác động hỗn hợp của nhiều loại hình thời tiết khác nhau trong đó là loại hình thời tiết theo mùa, đặc trưng là mùa gió đông bắc (tháng 10 đến tháng 2) và mùa gió tây nam (tháng 3 đến tháng 9). Ngoài ra, khu vực thường xuyên chịu tác động bởi một số cơn bão có cường độ vừa và lớn. Các yếu tố tác động

từ sông cần kể đến đó là tác động của lũ. Do đặc trưng lưu vực sông khá dốc, do đó các trận lũ thường có lưu lượng lớn, xảy ra trong thời gian khá ngắn. Tuy nhiên, mỗi trận lũ lớn có thể đem một lượng bùn cát cũng như nước khổng lồ chiếm tỉ trọng lớn trong tổng lượng hàng năm (từ 50 đến 70%). Lượng bùn cát được sông đưa ra phía biển thông qua các trận lũ và thời điểm có lưu lượng lớn. Tiếp tục của các quá trình thủy động lực học biển phân phối lượng bùn cát tại vị trí trước cửa sông sang hai phía bãi biển.

Một trong các thành phần địa mạo cần kể đến trong khu vực nghiên cứu đó là hệ thống đảo Cù Lao Chàm. Hệ thống đảo nằm cách cửa Đại khoảng 20 km về phía đông, như một khiên chắn tự nhiên các yếu tố sóng từ ngoài khơi trước khi vào khu vực nghiên cứu. Tuy nhiên, hệ thống đảo cũng tạo ra hiệu ứng sau công trình đặc trưng có ảnh hưởng lớn tới sự phân phối bùn cát từ cửa sông sang hai bên bờ biển. Như vậy, vị trí tương đối của cửa sông so với điểm hội tụ sóng phía sau đảo đối với các hướng sóng chủ đạo sẽ quyết định lượng bùn cát phân phối cho bờ phía bắc và phía nam.

Sự chênh lệch đáng kể của mực nước dâng theo mùa tại khu vực nghiên cứu cũng là yếu tố đáng quan tâm. Chênh lệch giữa mùa đông và mùa hè trung bình lên đến 40 cm do tác động của khí áp và gió theo mùa. Do đó trong các yếu tố đầu vào trong mô phỏng và thiết kế cần tính đến mực nước này để đảm bảo hiệu quả của công trình.

4.1.2. Hiện trạng khu vực cửa sông và bãi biển Cửa Đại, Hội An

- Bãi biển biến động theo mùa

Diễn biến bãi biển Cửa Đại, Hội An có tính chất mùa khá rõ rệt, trong thời kỳ gió đông bắc hiện tượng xói lở diễn ra liên tục với cường độ lớn và xu hướng xói lở đang lan dần lên phía bắc, thời kỳ gió mùa gió tây nam bãi biển bồi tụ nhẹ và hiện tượng xói lở chỉ xảy ra trong điều kiện thời tiết bất thường khi có bão hay gió mùa. (Bảng 4.1 và Hình 4.2).

Bảng 4.1. Kết quả đánh giá biến động bờ biển khu vực phía Bắc biển Cửa Đại, Hội An thời kỳ 1965-2014

Đoạn bờ	Bồi tụ			Xói lở			Tỷ lệ bồi/xói
	Độ dài (m)	Diện tích (ha)	Tốc độ TB (m/năm)	Độ dài (m)	Diện tích (ha)	Tốc độ TB (m/năm)	

Bắc Cửa Đại	499,6	26,11	18,75	6,559	107,6	6,25	1:4
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	------	-----



a) Bãi tắm chính Cửa Đại
thời kỳ gió mùa đông bắc



b) Bãi tắm chính Cửa Đại
thời kỳ gió mùa tây nam

Hình 4.2. Bãi biển Cửa Đại, Hội An biến động theo mùa

- Bãi biển tự nhiên bị xói lở mạnh sau khi xây dựng công trình bảo vệ bờ

Các công trình bảo vệ bờ trực tiếp của các khách sạn và của nhà nước đầu tư xây dựng tuy bảo vệ được bờ tương đối ổn định nhưng làm biến mất hoàn toàn các bãi tắm phía ngoài công trình (Hình 4.3). Mặt khác, công trình giảm sóng xa bờ, kè mỏ hàn sau khi được xây dựng sẽ có tương tác với bãi biển và các quá trình động lực ven bờ, các công trình này sẽ ảnh hưởng nhất định tới quá trình vận chuyển bùn cát dọc bờ và làm thay đổi phân bố năng lượng trường sóng tới, chi phối diễn biến xói lở, bồi tụ lân cận khu vực xây dựng công trình.



Kè mỏ hàn khu vực KS Golden Sand



Tường kè KS Palm graden

Hình 4.3. Biến đổi bãi biển khi có các công trình xây dựng ven bờ [70] [71]

- Bờ biển bị xói lở mạnh trong điều kiện sóng lớn

Giải pháp đối với tuyến kè mái nghiêng bằng các túi vải địa kỹ thuật để bảo vệ bờ chưa thực sự là giải pháp tốt cho bờ biển Cửa Đại, trong vòng hơn 2 năm kể từ khi

thi công xong đưa vào sử dụng các túi này đã bị tác động của sóng trong các đợt bão, gió mùa đông bắc phá hủy hoàn toàn, làm ảnh hưởng đến môi trường sinh thái. Tường kè BTCT của KS Fusion Alya bị sóng lớn phá hủy dẫn đến dãy nhà phía sát biển bị đổ vỡ (Hình 4.4).

Với giải pháp công trình giảm sóng ngoài khơi bằng hệ thống geotubes không có tác dụng giảm sóng, sóng lớn vẫn tràn qua đỉnh bờ hệ thống geotubes sát bờ làm mất lượng cát lớn phía trong và cũng gây xói lở phía trong của tường kè.



a) Sóng lớn trong bão tràn qua đỉnh kè tại bãi chính biển Cửa Đại



b) Sóng lớn trong bão phá hủy tường kè và cơ sở hạ tầng KS Fusion Alya

Hình 4.4. Công trình bảo vệ bờ không phát huy hiệu quả trong bão

Nguyên nhân dẫn đến tình trạng trên là do các công trình không được thiết kế để chống bão; Cao trình đỉnh công trình thấp do vậy công trình không chống được sóng bão nên khi có tổ hợp nước dâng do bão, sóng và triều cường xảy ra, sóng tràn mặt đỉnh công trình bảo vệ trực tiếp bờ gây ảnh hưởng đến cơ sở hạ tầng phía trong vùng bờ.

- *Bờ sông phía nam xói lở mạnh và cửa sông tiếp tục dịch chuyển xuống phía nam*

Qua các phân tích ảnh vệ tinh cho thấy rằng, bờ sông phía nam Cửa Đại liên tục di chuyển xuống phía nam trong suốt quá giai đoạn nghiên cứu. Khu vực bờ phía nam bị xói lở bắt đầu từ khu vực hợp lưu của các nhánh sông, phía t cầu Cửa Đại và mức độ xói lở tăng dần ra phía ngoài cửa sông. Tính từ năm 1973 cho tới 2023, vị trí có khoảng cách dịch chuyển lớn nhất lên đến 500 m (Hình 4.5).



Hình 4.5. Khu vực bờ sông bị xói lở

- Hiện trạng các công trình đã xây dựng tại bãi biển Cửa Đại, Hội An

Với chiều dài 7,6 km, bãi biển Cửa Đại, Hội An đã được địa phương cũng như chủ các khu nghỉ dưỡng, khu du lịch ven biển sử dụng đa dạng giải pháp, hình thức, kết cấu để phòng chống xói lở bờ biển trong phạm vi của mình. Các giải pháp công trình bảo vệ bờ biển Cửa Đại, Hội An bao gồm:

(1) Giải pháp "cứng" bảo vệ bờ biển Cửa Đại

Các giải pháp “cứng” phòng chống xói lở đã thực hiện khu vực biển Cửa Đại, Hội An hiện nay được chia thành 2 dạng cơ bản là:

- Kè tường đứng: công trình loại này có cấu tạo dạng tường với chức năng chắn giữ đất phía sau hoặc là bảo vệ vùng đất phía sau khỏi bị tác động của sóng lớn. Tường có kết cấu đá xây, rọ đá, tường bê tông, tường hỗn hợp bê tông và đá xây, tường bằng cọc bê tông ống buy.

Kè tường đứng được áp dụng xây dựng trong khu vực bảo vệ bờ biển của khu nghỉ dưỡng thuộc các khách sạn: KS Vinpearl, KS Fusionn, KS Sunrise, KS Victorya.

- Kè mái nghiêng: kè mái nghiêng được xây dựng nhằm chống xói mòn và bảo vệ bờ dưới tác động của sóng và dòng chảy. Kè có kết cấu chủ yếu là các cấu kiện bê tông đúc sẵn được lắp đặt trên mái dốc.

Kè mái nghiêng chủ yếu được xây dựng ở các bãi biển công cộng có quỹ đất dồi dào.

- Đê ngầm chắn sóng từ xa.

Trong khi chờ đợi giải pháp tổng thể, lâu dài, có tính khả thi cao để ổn định bờ biển, phát triển du lịch, ổn định cuộc sống dân cư trong khu vực, tỉnh Quảng Nam đã xây dựng công trình chống xói lở khẩn cấp bờ biển Cửa Đại, thành phố Hội An. Dự án được triển khai vào tháng 7/2021 và hoàn thành cuối năm 2022. Tuyến đê ngầm với thiết kế dài 1.530 m. Đê ngầm chắn sóng dạng hình thang, đỉnh đê rộng 5 mét, cao trình -0,50 mét; chân đê bằng thảm rọ đá dày 1 mét, rộng 12 mét, xếp trên đáy biển tự nhiên (Hình 4.6).



Hình 4.6. Đê ngầm chắn sóng tại bãi biển Cửa Đại [39]

(2) Các giải pháp "mềm" khu vực biển Cửa Đại

Các giải pháp kè mềm phòng chống xói lở đã thực hiện khu vực biển Cửa Đại, Hội An hiện nay được chia thành 3 dạng cơ bản là (Hình 4.7):

- Kè mềm giữ bãi: công trình này có cấu kiện gồm nhiều túi vải địa kỹ thuật (túi geobags hoặc geotubes), bên trong được bơm đầy cát hoặc đất, có hiệu quả và kinh tế trong việc đặt những túi lớn giống nhau, phục vụ cho chức năng chống xói mòn và bảo vệ bờ và khu đất phía sau kè.

Kè mềm giữ bãi được bố trí xây dựng tại khu vực bờ biển KS Victoria đến KS Palm Garden.

- Mỏ hàn mềm: có chức năng làm giảm sóng và dòng chảy dọc bờ, tạo bồi cho bờ biển. Mỏ hàn "mềm" được cấu tạo bởi các ống vải địa kỹ thuật (geotubes) được bơm đầy cát lẫn nước biển bởi hệ thống bơm thủy lực. Ống vải địa tổng hợp giữ lại cát còn nước được thấm qua lớp màng chảy ra ngoài. Geotubes giữ lại một cách thường xuyên vật liệu dạng hạt, gây bồi tạo bãi cho khu vực bị xói lở.

Kè mỏ hàn được bố trí xây dựng tại khu vực bãi biển thuộc khu vực biển thuộc KS Vinpearl, KS Victoria và khu vực biển từ KS Victoria đến KS Palm Garden.

- Đê mềm phá sóng: được cấu tạo bởi các ống vải địa kỹ thuật (geotubes) được đặt ngàm ngoài khơi song song với bờ, có chức năng phá sóng, gây bồi tạo bãi phía trước biển.

Đê mềm phá sóng được bố trí xây dựng tại khu vực bãi biển thuộc KS Vinpearl, KS Victoria và khu vực biển từ KS Victoria đến KS Palm Garden.



a) Tường đứng ống buy bảo vệ bờ KS Vinpearl



b) Kè mái nghiêng bảo vệ bờ từ KS Vinpearl - KS Fusion



c) Tường đứng bảo vệ bờ biển KS Fusion



e) Tường đứng bảo vệ bờ biển KS Sunrise



f) Kè mái nghiêng lát đá bảo vệ bờ KS Golden Sand



h) Kè mềm bao geobag bảo vệ bãi chính Cửa Đại

Hình 4.7. Hình ảnh các giải pháp công trình bảo vệ bờ biển phía Bắc Cửa Đại

Trên đây là các giải pháp và công trình đã xây dựng nhằm mục đích khắc phục khẩn cấp tình trạng xói lở khu vực bãi biển Cửa Đại. Các công trình này bước đầu đã ngăn chặn được tình trạng xói lở bãi biển do tác động của sóng. Tuy nhiên, để duy trì được lượng cát, khôi phục bãi biển vẫn cần phải có sự bồi lấp bằng một lượng cát lớn do con người tiến hành. Đây là các giải pháp mang tính ngắn hạn do nguồn bùn cát tự nhiên bồi đắp cho khu vực bãi biển Cửa Đại hiện vẫn thiếu hụt trong đó một phần do sự dịch chuyển của cửa sông về phía nam. Trong hiện tại, tại khu vực sông và cửa sông chưa có một giải pháp công trình nào nhằm khắc phục sự xói lở bờ sông phía nam và ngăn chặn cũng như điều chỉnh lại vị trí.

4.2. Mục tiêu giải pháp công trình ổn định cửa sông và bãi biển Cửa Đại, Hội An

Qua các nội dung phân tích ở trên cho thấy rằng, bãi biển phía bắc Cửa Đại đã và đang xảy ra hiện tượng xói lở nghiêm trọng, hiện tượng này ngày càng diễn ra nhanh chóng trong thời gian những năm gần đây. Dọc theo khu vực bãi biển, hệ thống các nhà hàng, khách sạn được xây dựng phục vụ phát triển du lịch địa phương. Đứng trước hiện tượng xói lở các chủ nhà hàng và địa phương đã tiến hành một số biện pháp cấp bách ngăn chặn, một loạt các giải pháp công trình, phi công trình đã được xây dựng. Tuy nhiên, qua thời gian sử dụng, công trình vẫn không giữ được bãi tắm, trong điều kiện thời tiết như gió mùa và bão, sóng lớn vẫn gây thiệt hại tới các công trình sâu phía trong và lấy đi lượng lớn cát trên bãi biển. Để duy trì được bãi tắm, bãi biển thường xuyên phải được bơm cát bù đắp lại sau mỗi năm. Song song với đó, bờ sông phía Nam Cửa Đại tiếp tục bị xói lở gây nên sự dịch chuyển dần về phía nam của cửa sông cũng như thêm cát trước cửa. Sự dịch chuyển này dẫn tới sự mất cân bằng trong lượng bùn cát tự nhiên phân phối lại từ thềm cát cho khu vực bãi biển phía bắc. Do đó, trong nghiên cứu này nghiên cứu sinh tiến hành nghiên cứu giải pháp kỹ thuật nhằm hạn chế những tồn tại nêu trên.

Mục tiêu chính của nhóm công trình được đề xuất giải pháp kỹ thuật bao gồm:

- Ổn định khu vực cửa sông, bảo vệ xói lở bờ phía nam sông Cửa Đại;
- Mục tiêu giảm thiểu xói lở bãi biển Cửa Đại mà không phải sử dụng công trình cứng bằng cách điều chỉnh lại nguồn cung cấp và phân phối lại bùn cát lên phần bãi biển phía bắc;
- Đảm bảo thoát lũ sau khi xây dựng công trình;
- Đảm bảo duy trì luồng tàu đảm bảo giao thông đường thủy.

4.3. Các căn cứ nghiên cứu đề xuất phương án bố trí công trình ổn định cửa sông và bãi biển

Từ kết quả các nghiên cứu đã thực hiện tìm hiểu nguyên nhân gây xói lở bãi biển Cửa Đại, Hội An các nhà nghiên cứu đã đưa ra các nhóm nguyên nhân chính như sau:

Thứ nhất, nguyên nhân do thiếu hụt nguồn bùn cát cung ứng từ sông cho bãi biển Cửa Đại.

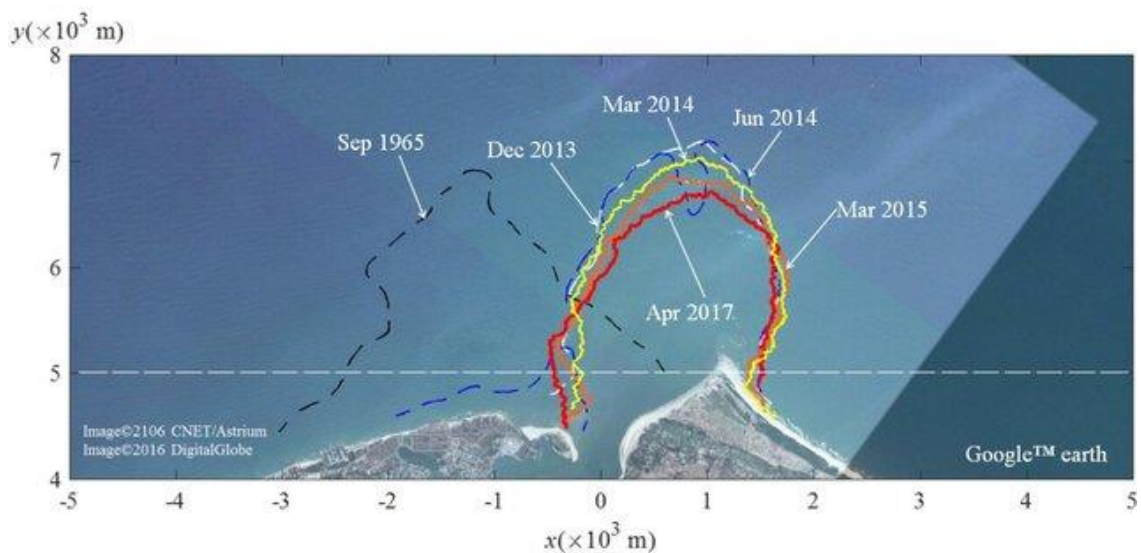
Thứ hai, nguyên nhân do các yếu tố tự nhiên như thủy động lực học, sóng và bão.

Thứ ba, nguyên nhân do các tác nhân con người bằng việc xây dựng các công trình dân sinh phục vụ du lịch, kinh tế - xã hội.

Và nguyên nhân cuối cùng là nguyên nhân có thể do biến đổi khí hậu trong đó có tác động của mực nước dâng toàn cầu.

Trong khuôn khổ nghiên cứu này, tác giả tập trung vào các nhóm nguyên nhân tự nhiên, đặc biệt là nhóm nguyên nhân một và hai. Hai nhóm nguyên nhân đầu có mối liên hệ chặt chẽ với nhau từ khâu cung ứng và phân phối bùn cát cho khu vực bãi biển Cửa Đại, Hội An. Để làm rõ điều này, tác giả đã tập trung tổng hợp các nghiên cứu của các nhà khoa học về vấn đề này như sau:

Dựa trên một số nghiên cứu đã tiến hành của tác giả Hitoshi Tanaka và Đinh Văn Duy đã tiến hành đánh giá sự dịch chuyển của cồn cát phía trước khu vực cửa sông bằng phân tích ảnh vệ tinh. Kết quả phân tích cho thấy từ năm 1965 đến nay cồn cát ngầm trước cửa sông có sự biến đổi rõ ràng cả về hình dạng và vị trí tồn tại. Sự dịch chuyển về phía nam của cồn cát cũng có kết quả giống với sự dịch chuyển của cửa sông theo phân tích tại phần trên (Hình 4.8). Do đó có thể thấy, có sự liên hệ chặt chẽ giữa sự dịch chuyển cửa sông liên đới tới dịch chuyển cồn cát trước cửa và ảnh hưởng tới nguồn phân phối cát lên khu vực bãi biển phía bắc.



Hình 4.8. Sự dịch chuyển cồn cát trước cửa sông Cửa Đại từ năm 1965 đến 2017

Một nghiên cứu cơ chế xói lở do sóng đối với bãi biển khu vực Cửa Đại, Hội An bằng mô hình một chiều. Dòng vận chuyển bùn cát dọc bờ gây ra xói lở trung bình từ 37 m/năm [45]. Dòng chảy do sóng gây ra tại khu vực bãi biển Cửa Đại là khá mạnh mẽ, dòng bùn cát được luân chuyển theo hướng nam lên bắc. Khi đó, nếu không có

sự bù đắp lượng bùn cát được đem đi thì bãi biển sẽ bị thiếu hụt và kết quả là xói lở vùng bờ.

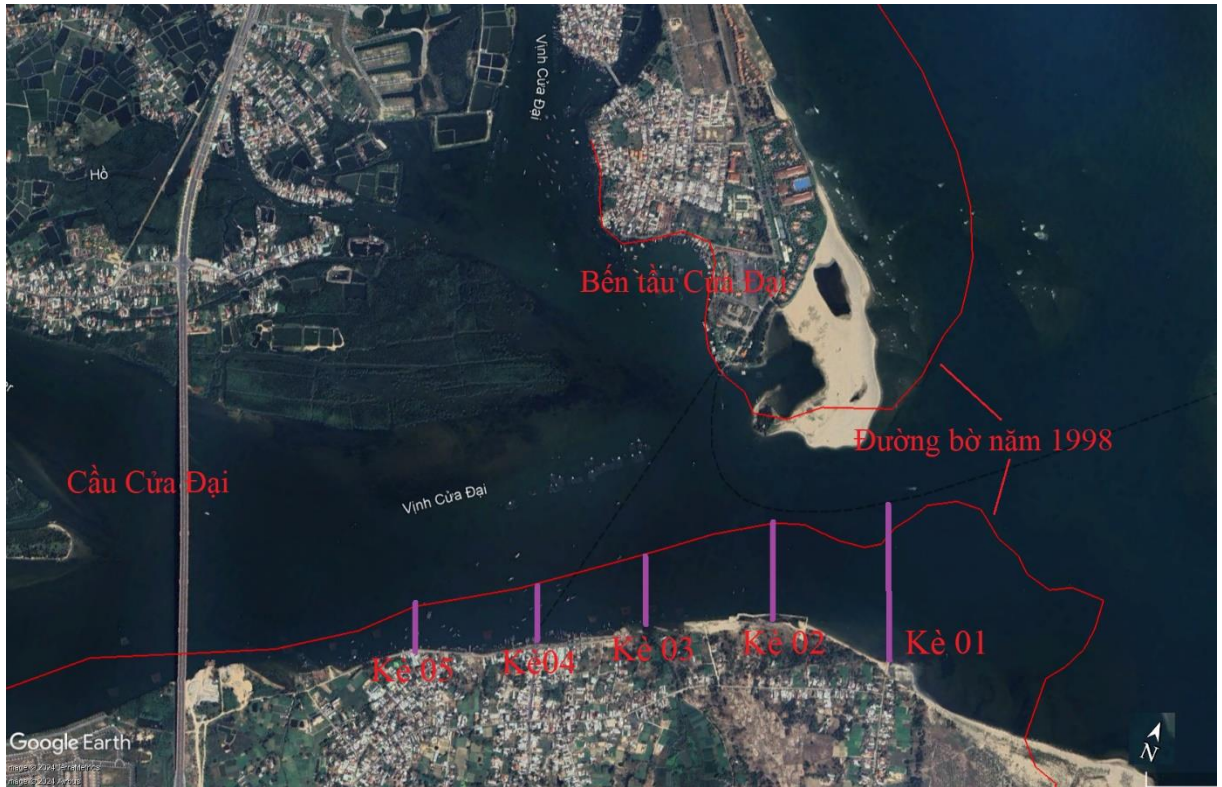
Một nghiên cứu nữa của tác giả Hitoshi Tanaka khẳng định, hiện tại gần 85% lượng bùn cát từ sông ra cung cấp cho phía bờ phải, phần còn lại cung cấp cho bờ trái (khu vực bãi biển Cửa Đại).

Kết hợp các nguyên nhân trên có thể thấy, tình trạng thiếu hụt bùn cát cung cấp cho bãi biển Cửa Đại là khá nghiêm trọng. Kết quả này đồng thời cũng chỉ ra rằng, sự dịch chuyển của cửa sông là một trong các yếu tố gây ra vấn đề trên. Tuy nhiên, đối với các vùng cửa sông không giống như khu vực Cửa Đại có sự che chắn phía trước bởi đảo Cù Lao Chàm, sự dịch chuyển này không ảnh hưởng nhiều đến quá trình phân phối bùn cát cho hai phía bờ biển. Do hệ thống đảo Cù Lao Chàm như một tấm khiên tự nhiên che chắn trường sóng lan truyền từ vùng nước sâu vào khu vực cửa sông, phía sau đảo hình thành khu vực che khuất và giao thoa giữa hai hướng sóng tạo nên điểm hội tụ. Vị trí cửa dịch chuyển xuống phía nam lấn sâu vào khu vực khuất sóng gây nên thiếu hụt năng lượng để vận chuyển bùn cát từ ngoài trở vào khu vực bãi biển phía bắc.

Từ các kết quả trên, căn cứ để đưa ra giải pháp công trình được tác giả đưa ra đó là đưa cửa sông trở lại vị trí phía bắc ra ngoài rìa vùng khuất sóng. Giải pháp công trình giải quyết được các mục đích: ổn định khu vực cửa sông chống xói lở bờ sông phía nam. Giảm thiểu xói lở khu vực bãi biển Cửa Đại mà không phải xây dựng công trình cứng. Giải pháp này ngay lập tức có thể chưa có kết quả tốt trong một đến hai chu kỳ hình thái học đầu do cần lượng bùn cát tái tạo lại thêm cát trước cửa do thay đổi vị trí cửa sông. Kết quả sẽ hữu hiệu tại các chu kỳ tiếp theo khi nguồn bùn cát đưa ra không phải tái tạo thêm cát mà trực tiếp được cung cấp cho các khu vực bãi biển.

4.4. Phương án bố trí công trình kè mở hàn tại bờ nam cửa sông Thu Bồn.

Trong nghiên cứu này, tác giả đề xuất giải pháp kỹ thuật bằng cách xây dựng tuyến 05 mở hàn tại phía bờ nam Cửa Đại (Hình 4.9). Thông số kè mở hàn được đề xuất trình bày trong Bảng 4.2. Vị trí gốc kè nằm tại vị trí đường bờ hiện tại và vị trí đỉnh kè nằm tại vị trí đường bờ năm 1998. Hệ thống mở hàn này cho phép đưa tuyến luồng chính của cửa sông về giống với tuyến luồng năm 1998.



Hình 4.9. Phương án đề xuất bố trí kè mỏ hàn tại khu vực bờ phía nam sông Cửa Đại

Bảng 4,2, Thông số kè mỏ hàn được đề xuất cho khu vực bờ nam sông Cửa Đại

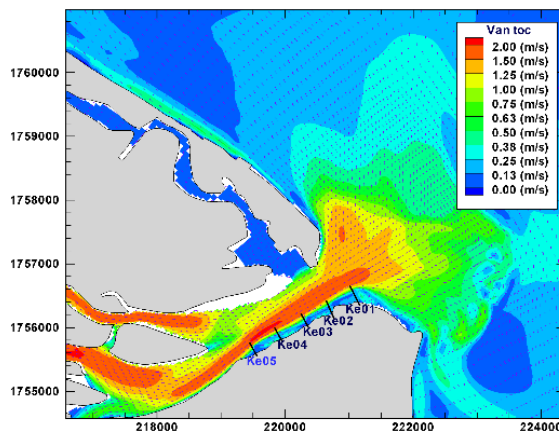
TT	Tên kè	Tọa độ X	Tọa độ Y	Chiều dài kè (m)
1	Kè 01	15°52'11,32"N	108°23'49,13"E	500
2	Kè 02	15°52'11,28"N	108°23'35,75"E	300
3	Kè 03	15°52'5,42"N	108°23'24,07"E	240
4	Kè 04	15°51'59,74"N	108°23'14,00"E	195
5	Kè 05	15°51'54,78"N	108°23'2,17"E	145

Để đảm bảo việc thoát lũ và giao thông đường thủy, phương án kỹ thuật này khi áp dụng phải đảm bảo bảo toàn về bề rộng và địa hình đáy cửa sông. Do đó, trong nghiên cứu này, nghiên cứu sinh giả định có phần nạo vét phá bỏ phần đảo cát nằm giữa cửa sông để mở rộng cửa sông về phía bắc. Ngoài ra tại phía bờ bắc, cần thiết có các công trình bảo vệ khỏi xói lở do dòng chảy sông bằng các giải pháp kè cứng. Các giải pháp cụ thể cho bờ kè phía bắc không được nghiên cứu trong luận án này.

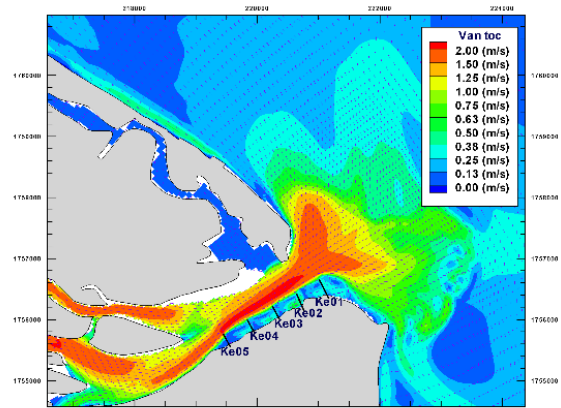
4.5. Đánh giá hiệu quả kỹ thuật của các phương án bố trí công trình

Để phù hợp với thực tế thi công và chi phí đầu tư hệ thống kè cửa sông được chia làm hai phương án: phương án thứ nhất xây dựng hệ thống kè với một nửa chiều dài thiết kế (Phương án $d = 1/2$), phương án thứ hai xây dựng hệ thống kè với đầy đủ chiều dài thiết kế (phương án $d = 1,0$) (các Hình 4.10÷4.21). Kết quả đánh giá giữa hai phương án sẽ tối ưu hóa giữa nghiên cứu kỹ thuật và thực tiễn.

4.5.1. Kết quả mô phỏng trường thủy động lực học

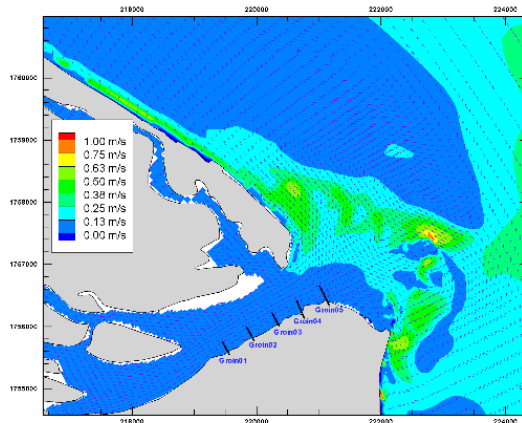


a) Phương án $d = 1/2$

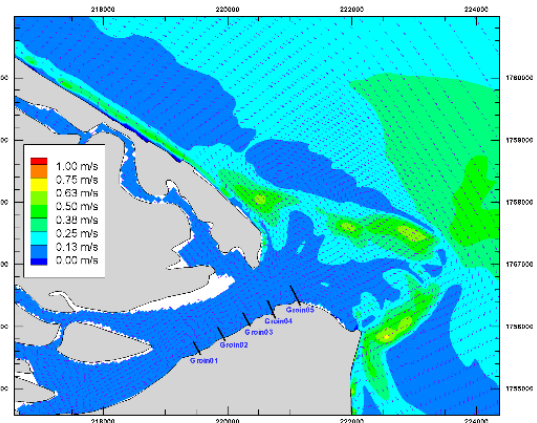


b) Phương án $d = 1,0$

Hình 4.10. Trường dòng vận tốc dòng chảy trong lũ



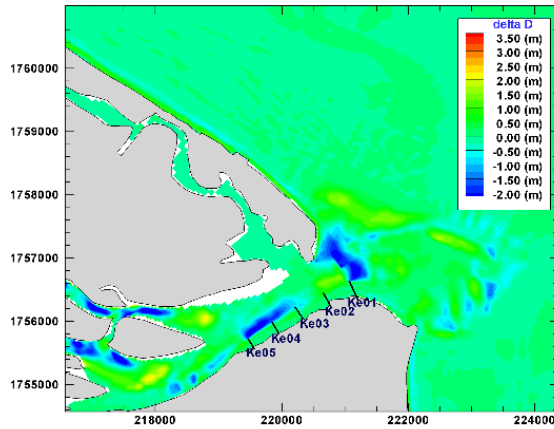
a) Phương án $d = 1/2$



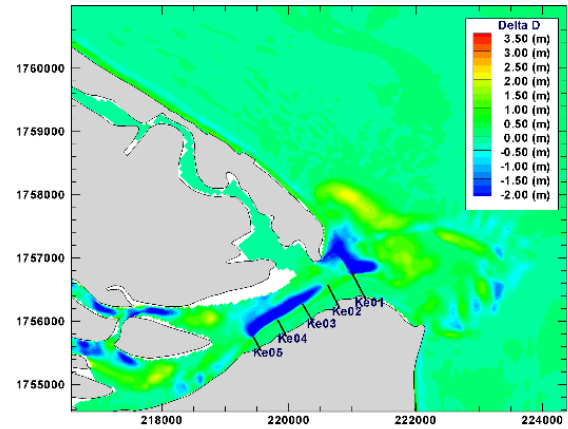
b) Phương án $d = 1,0$

Hình 4.11. Trường dòng vận tốc dòng chảy dưới tác động của sóng

4.5.2. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ

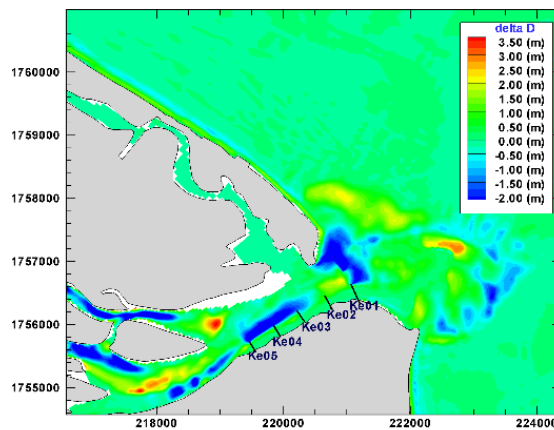


Phương án d = 1/2

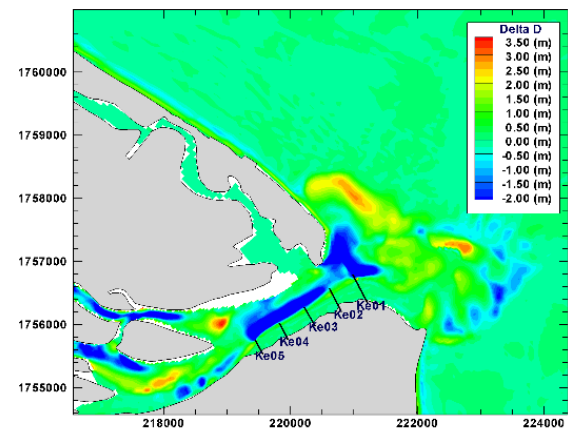


Phương án d = 1,0

Hình 4.12. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 1 năm

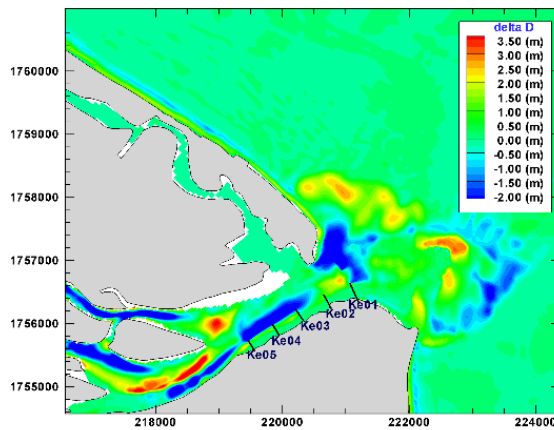


Phương án d = 1/2

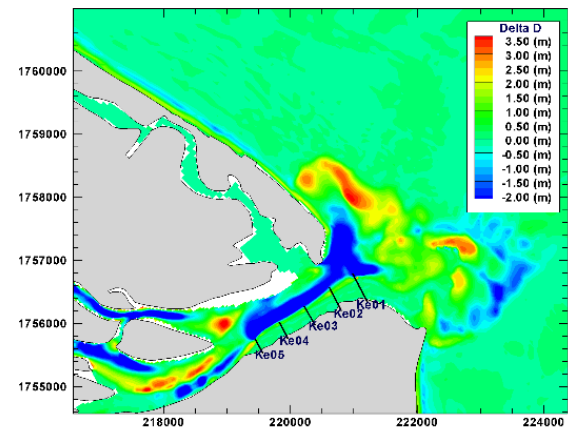


Phương án d = 1,0

Hình 4.13. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 2 năm

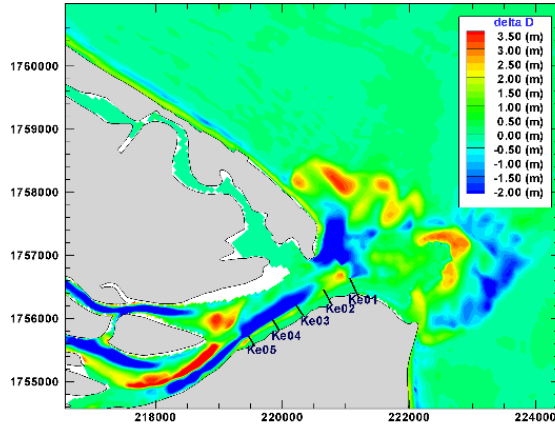


Phương án d = 1/2

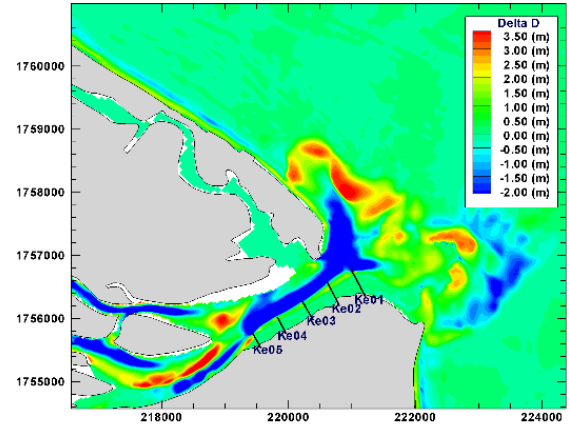


Phương án d = 1,0

Hình 4.14. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 3 năm

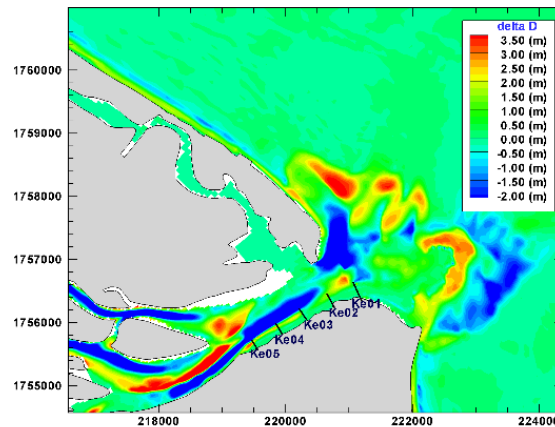


Phương án d = 1/2

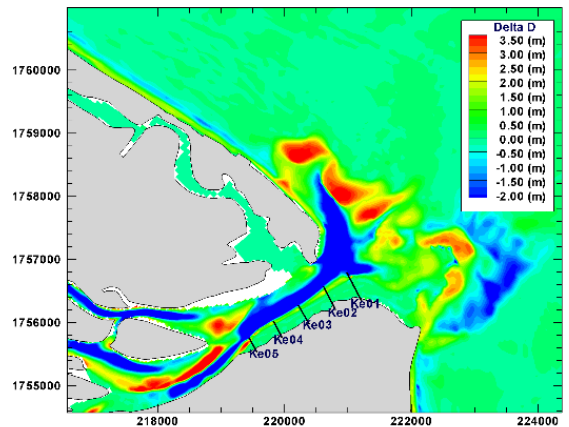


Phương án d = 1,0

Hình 4.15. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 4 năm

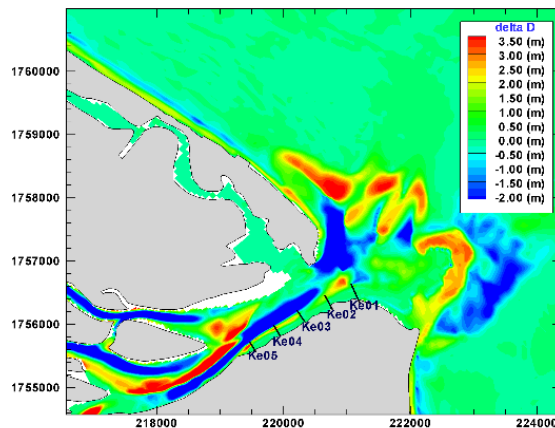


Phương án d = 1/2

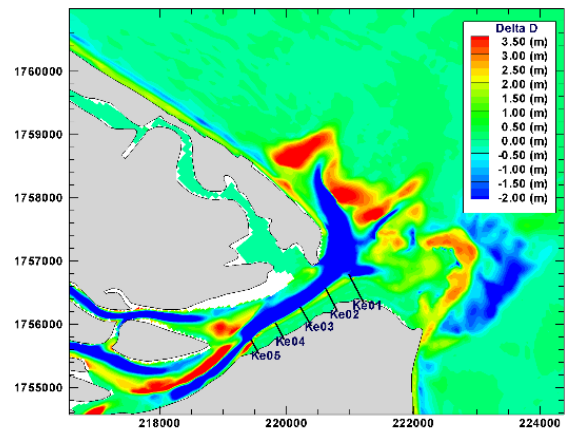


Phương án d = 1,0

Hình 4.16. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 5 năm

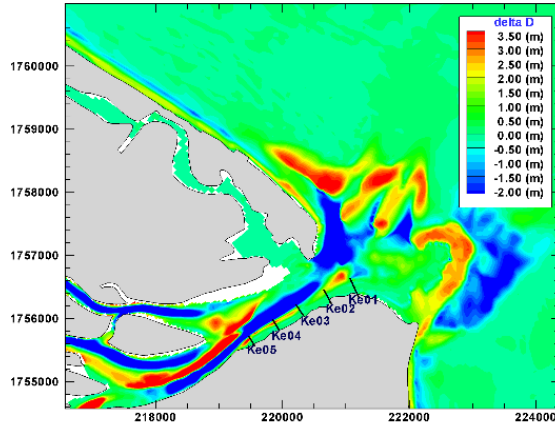


Phương án d = 1/2

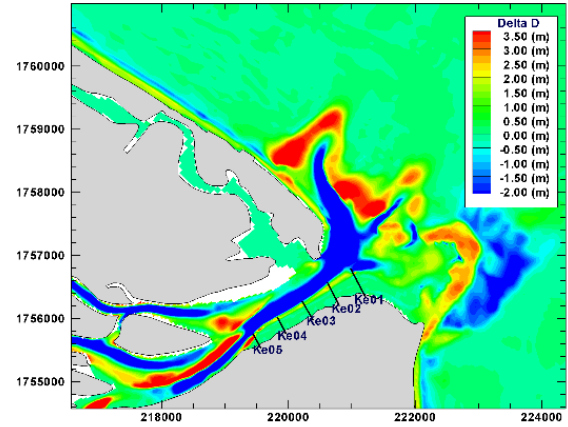


Phương án d = 1,0

Hình 4.17. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 6 năm

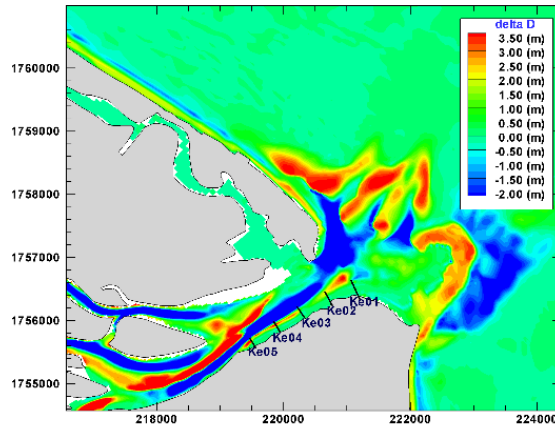


Phương án d = 1/2

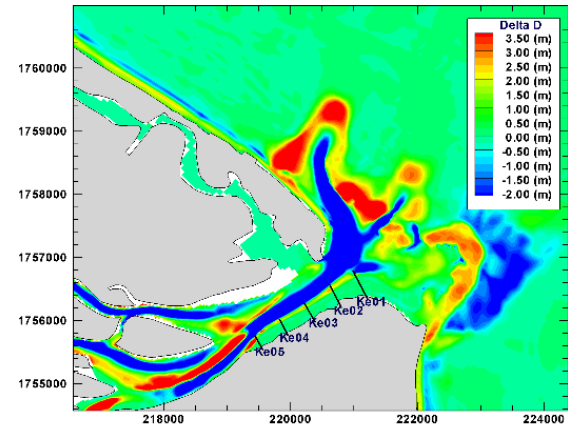


Phương án d = 1,0

Hình 4.18. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 7 năm

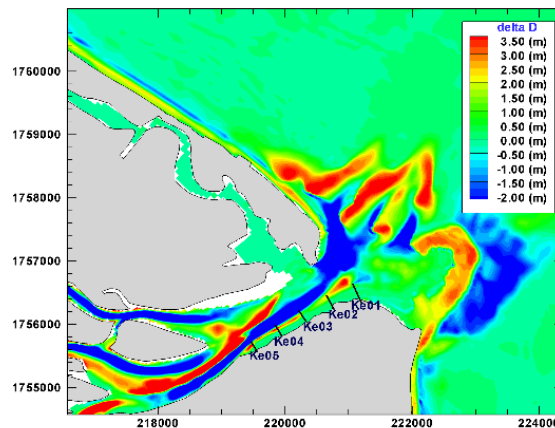


Phương án d = 1/2

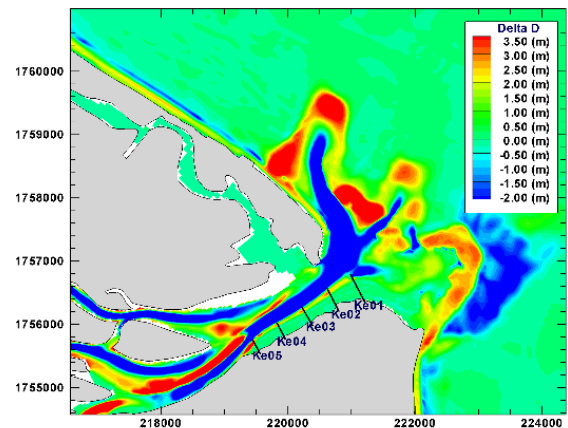


Phương án d = 1,0

Hình 4.19. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 8 năm

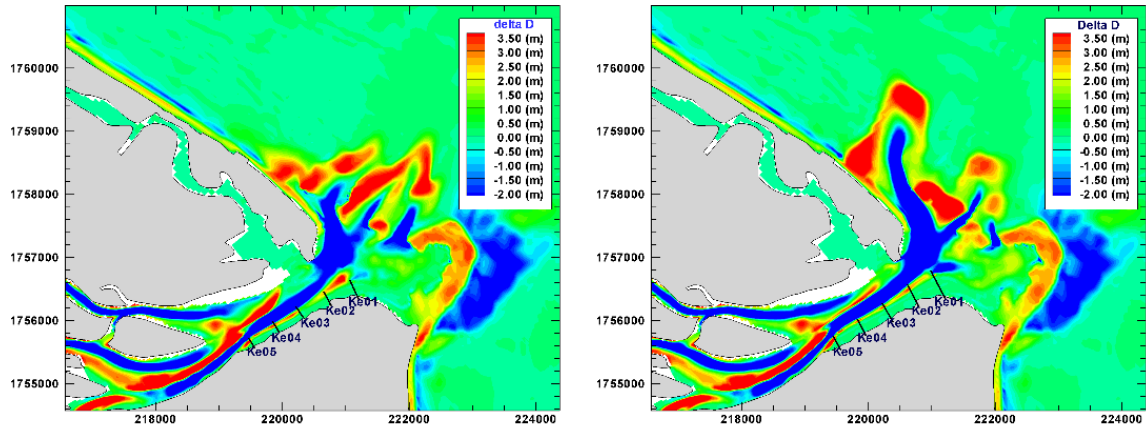


Phương án d = 1/2



Phương án d = 1,0

Hình 4.20. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 9 năm



Phương án d = 1/2

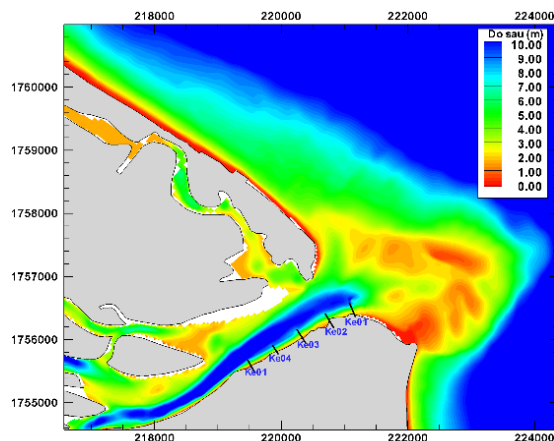
Phương án d = 1,0

Hình 4.21. Kết quả mô phỏng xói lở và bồi tụ sau 10 năm

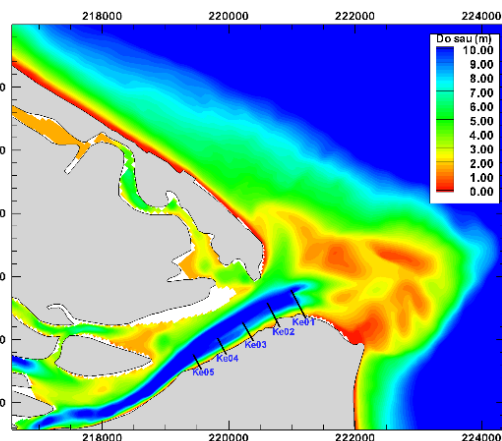
Nhận xét đánh giá: Dưới tác dụng của kè nắn dòng, lượng bùn cát được đưa trở lại khu bãi biển phía bắc một cách rõ rệt. Hiện tượng sạt lở bờ phía nam cũng được khắc phục. trong giai đoạn 5 năm đầu, lượng bùn cát đưa lên phía bắc với lượng lớn tuy nhiên chưa đủ lượng để giảm độ dốc bãi biển do địa hình đáy khu vực này sau nhiều năm xói lở đã khá sâu. Trong các giai đoạn tiếp theo, khi bãi biển đã giảm độ dốc, bùn cát được đưa vào sát bờ làm cho bãi biển được mở rộng. Phần phía nam, lượng bùn cát được giữ lại và tạo nên doi cát kéo dài nối liền với bờ. Luồng mới của sông được hình thành và quá trình tạo thêm cát phía trước cửa được khôi phục. Phương án kè này mang lại hiệu quả, tuy một lượng lớn bùn cát được giữ lại tại doi cát phía nam nên quá trình tạo thêm cát mới diễn ra tương đối chậm.

4.5.3. Kết quả mô phỏng biến đổi đáy biển

Trong phần này trình bày kết quả mô phỏng diễn biến biến đổi địa hình đáy biển theo các năm giữa hai phương án đề xuất (các Hình 4.22÷4.31). Địa hình đáy biển được cập nhật dựa trên địa hình ban đầu và lượng bồi tụ hoặc xói lở.

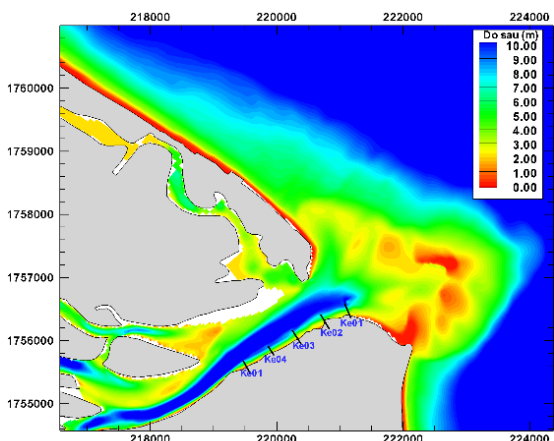


Phương án d = 1/2

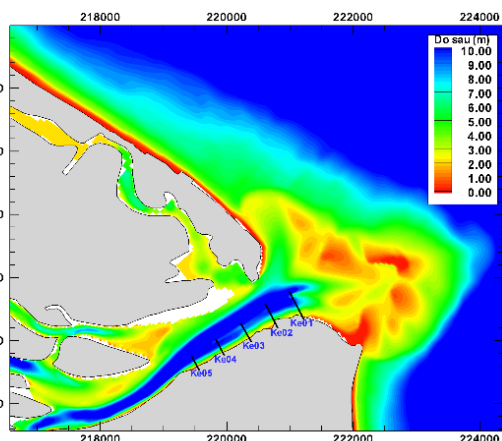


Phương án d = 1,0

Hình 4.22. Diễn biến địa hình đáy biển sau 1 năm

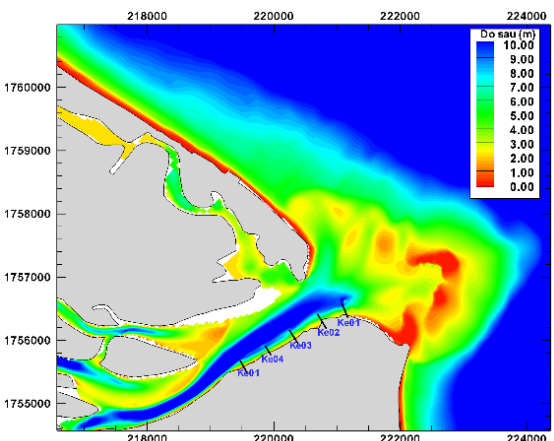


Phương án d = 1/2

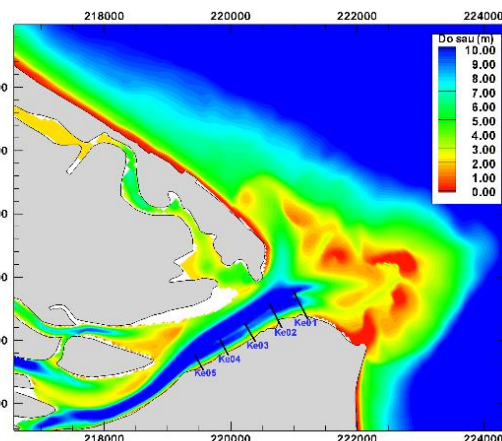


Phương án d = 1,0

Hình 4.23. Diễn biến địa hình đáy biển sau 2 năm

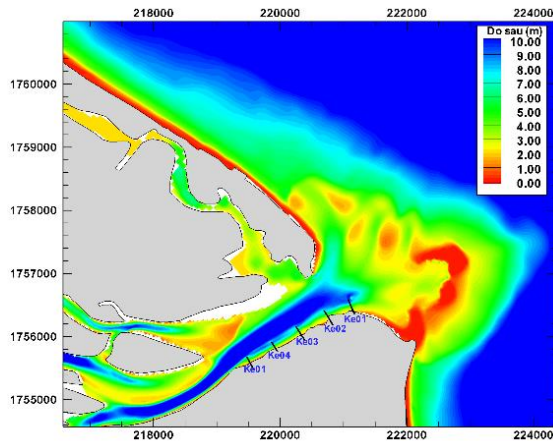


Phương án d = 1/2

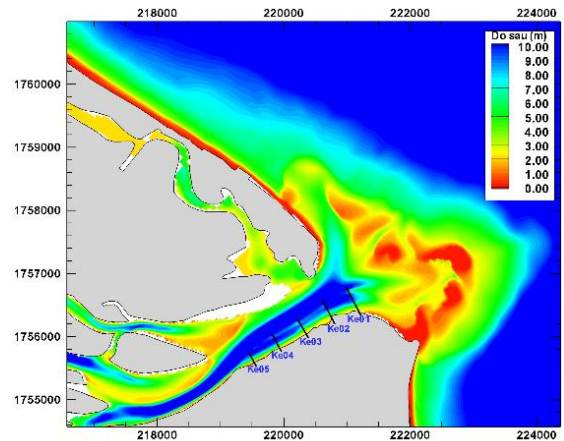


Phương án d = 1,0

Hình 4.24. Diễn biến địa hình đáy biển sau 3 năm

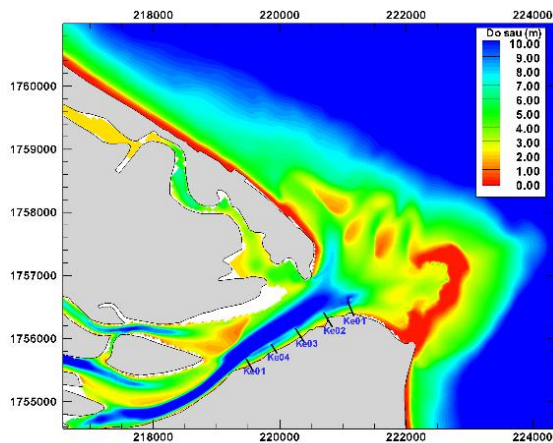


Phương án d = 1/2

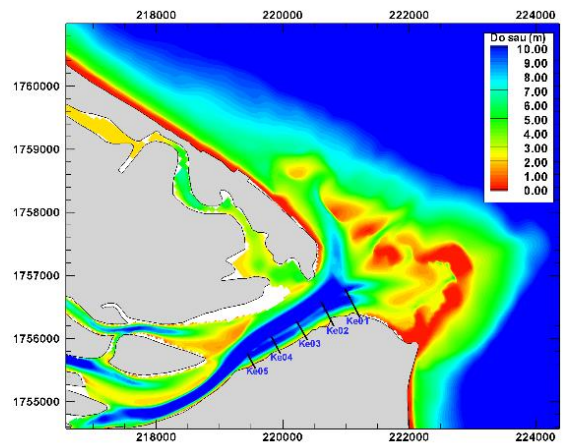


Phương án d = 1,0

Hình 4.25. Diễn biến địa hình đáy biển sau 4 năm

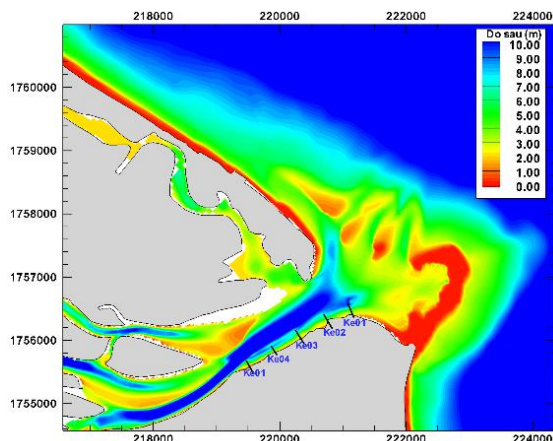


Phương án d = 1/2

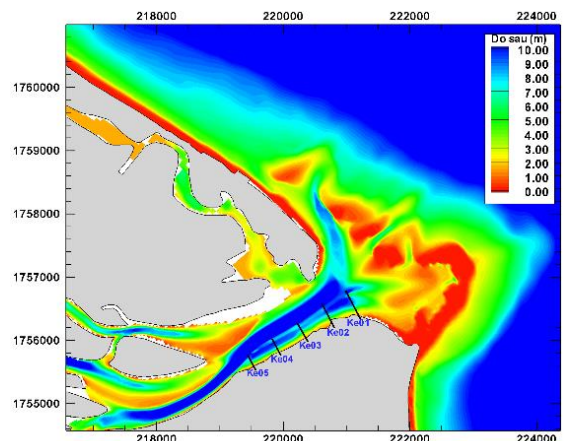


Phương án d = 1,0

Hình 4.26. Diễn biến địa hình đáy biển sau 5 năm

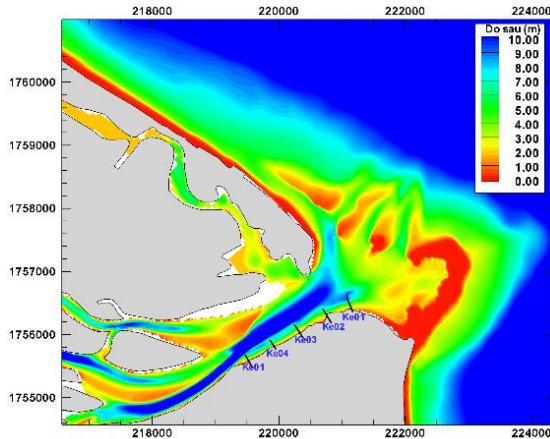


Phương án d = 1/2

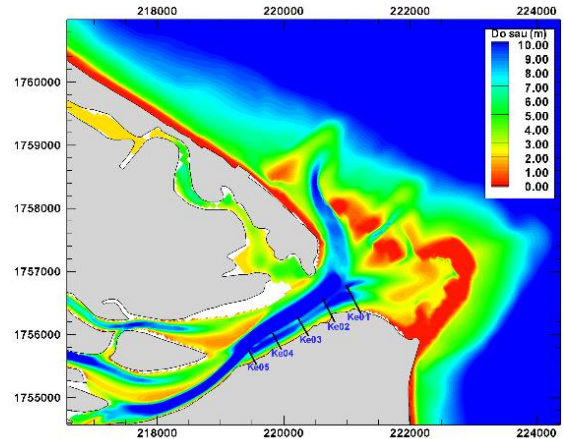


Phương án d = 1,0

Hình 4.27. Diễn biến địa hình đáy biển sau 6 năm

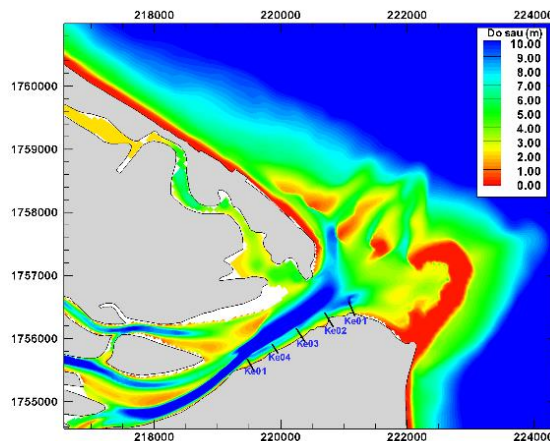


Phương án d = 1/2

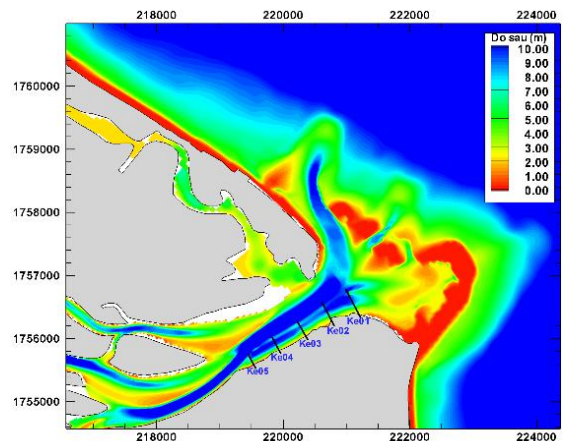


Phương án d = 1,0

Hình 4.28. Diễn biến địa hình đáy biển sau 7 năm

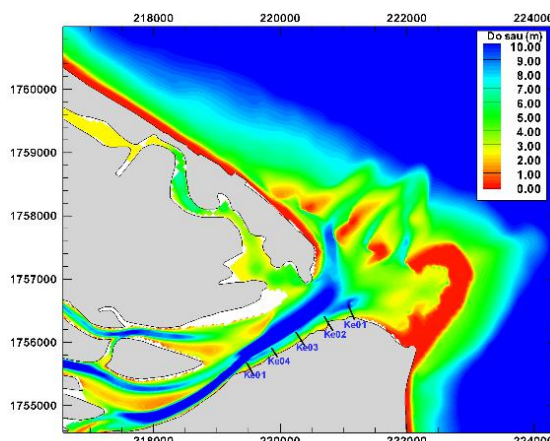


Phương án d = 1/2

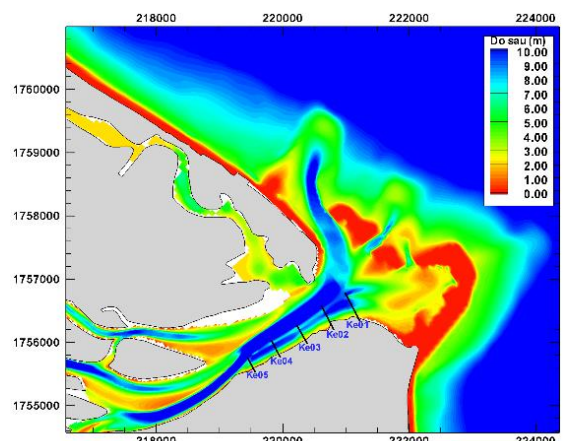


Phương án d = 1,0

Hình 4.29. Diễn biến địa hình đáy biển sau 8 năm

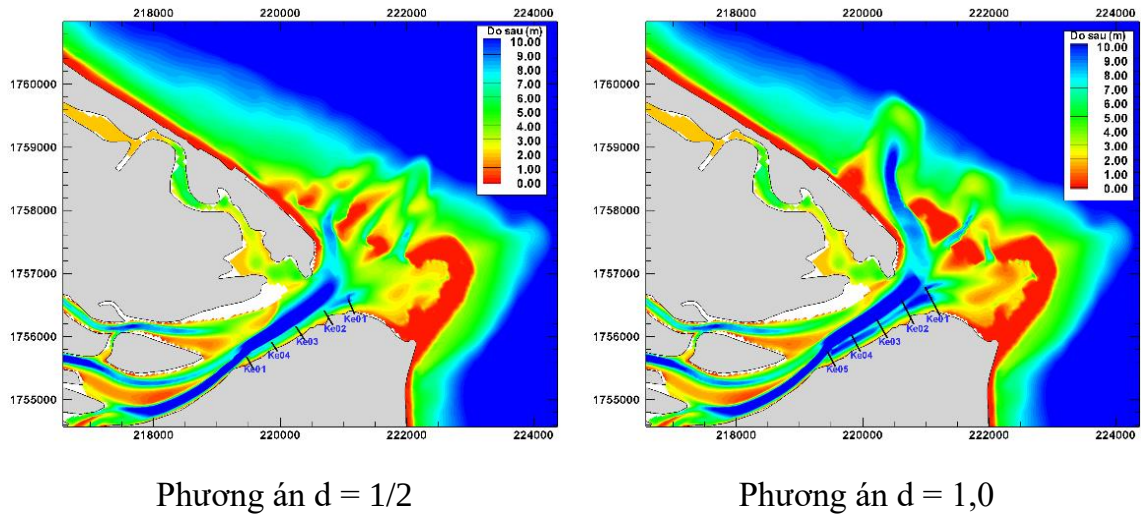


Phương án d = 1/2



Phương án d = 1,0

Hình 4.30. Diễn biến địa hình đáy biển sau 9 năm



Hình 4.31. Diễn biến địa hình đáy biển sau 10 năm

Nhận xét và đánh giá: Nhìn chung phương án với kè đầy đủ kích thước đã nắm gần như hoàn toàn lượng bùn cát lên phía bắc. Chỉ sau khoảng thời gian 2 năm, lượng bùn cát đã hoàn toàn lấp đầy độ dốc bãi biển và bồi tụ vào khu vực trong bờ. Hệ thống kè cũng hoàn toàn tạo ra cửa mới lên phía bắc và tái tạo thêm cát trước cửa sông xa hơn về phía bắc. Hệ thống kè cũng đảm bảo được khả năng chống xói lở tại bờ sông phía nam và tạo nên phần doi cát kéo dài tại mũi bờ phía nam. So với hệ thống kè bằng $\frac{1}{2}$ chiều dài, khả năng đưa cát lên phía bắc nhanh và xa hơn. Tuy nhiên, cửa sông mới tạo ra có khác biệt lớn so với hiện trạng trong quá khứ so với phương án còn lại.

4.6. Lựa chọn phương án công trình

Từ kết quả mô phỏng trong 10 năm với chế độ lũ và thủy động lực học cho hai phương án kè cho thấy rằng. Phương án kè $\frac{1}{2}$ có nhiều ưu điểm hơn so với kè đầy đủ kích thước và tạo ra khu vực còn cát giống với hiện trạng trong quá khứ (năm 1965). Do đó phương án kè ngắn $\frac{1}{2}$ có tính tối ưu về đầu tư cũng đồng thời đạt được các hiệu quả đề ra. Tuy nhiên, đây là các kết quả nghiên cứu với hai phương án đặt ra, để có thể đạt được độ dài tối ưu nhất của hệ thống kè cần thiết mô phỏng trong nhiều phương án khác trong khuôn khổ hệ thống kè nêu trên.

4.7. Kết luận Chương 4

Trong chương này đã giới thiệu đề xuất kỹ thuật khắc phục xói lở bãi biển Cửa Đại, Hội An và ổn định khu vực cửa sông. Giải pháp đưa ra dựa trên các phân tích trước đó về sự di chuyển của sông về phía nam. Sự di chuyển này khiến cho khu vực thêm cát mà sông tạo ra đi sâu vào trong khu vực che khuất sóng do đảo Cù Lao Chàm tạo ra, điều đó làm cho việc cung cấp cát từ phía ngoài vào bị giảm đi. Do đó, đề xuất hệ thống kè mở hàn tại phía nam sông Cửa Đại nhằm mục đích đưa lại thêm cát mà sông tạo ra lên phía bắc, ra khỏi vùng che khuất sóng phía trước. Lượng bùn cát sẽ được cung cấp tới bãi biển sau khi thêm cát được thành tạo. Phương án bố trí công trình là hệ thống 5 kè mở hàn với chiều dài khác nhau, đầu kè trạm đến vị trí bờ sông năm 1988.

Để phù hợp với thực tiễn áp dụng, tác giả tiến hành đánh giá kết quả với hai phương án chiều dài là: Phương án với chiều dài đầy đủ của kè và phương án với $\frac{1}{2}$ chiều dài so với kè đầy đủ. Từ đó tìm ra chiều dài tối ưu giúp giảm chi phí đầu tư và đạt hiệu quả chống xói lở cao nhất.

Kết quả đánh giá cho phương án kè với nửa chiều dài cho thấy rằng: Thêm cát phía trước cửa sông nhanh chóng được khôi phục sau 2 đến 3 chu kỳ hình thái. Tại các chu kỳ tiếp theo bùn cát được cung cấp tới phần bãi biển phía bắc khá tốt. Kết luận, phương án này không cho hiệu quả nhanh trong thời gian đầu nhưng rất có hiệu quả trong lâu dài và không gây biến động quá lớn tới khu vực, đặc biệt là phần mũi cát phía bắc.

Kết quả đánh giá cho phương án chiều dài kè đầy đủ: Với lượng bùn cát hàng năm được thiết lập, thêm cát mới cũng mất 2-3 chu kỳ hình thái học mới được tạo ra. Trong giai đoạn tiếp theo, bùn cát được cung cấp vào bờ một cách mạnh mẽ và có quy mô xa hơn về phía bắc. Tuy nhiên, phương án này có thể gây ra nhiều thay đổi đột ngột tại một số khu vực như cửa sông phía bắc.

Trong cả hai phương án công trình được đề xuất: phần bùn cát còn lại của thêm cát trước khi có công trình cộng thêm phần bùn cát mới đưa đến tại khu vực phía nam tạo nên khu vực bồi tụ khá rộng và có xu thế nhập vào với mũi phía nam tạo ra doi cát lớn. Kết quả này là do khu vực nằm trong vùng khuất sóng củ đảo Cù Lao Chàm và hệ thống công trình mới làm cho động lực sóng và dòng chảy tại đây yếu gây nên bồi tụ ngay tại khu vực trước cửa. Nguồn bùn cát này khó có thể đưa đi xa xuống phía nam do trường động lực học không đủ mạnh.

Từ các kết quả đánh giá cho thấy rằng: Phương án đề xuất đã đem lại hiệu quả khá rõ trong khắc phục xói lở bãi biển và ổn định vùng cửa sông mà không phải can

thiếp trực tiếp vào phần bãi biển. Trong thực tế triển khai phương án kỹ thuật này cần tiếp tục điều chỉnh độ dài hệ thống kè và tính toán tối ưu với các kết quả kỳ vọng khác, từ đó lựa chọn được các thông số tốt nhất.

Trong nghiên cứu này, nghiên cứu sinh đã giới thiệu và đề xuất phương án kỹ thuật chỉnh ổn định khu vực cửa sông và bãi biển là một đóng góp mới làm tài liệu tham khảo cho việc lên kế hoạch bảo vệ và phát triển bền vững khu vực trong dài hạn.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Luận án đã tổng quan được các vấn đề trong nghiên cứu biến động hình thái khu vực bãi biển và cửa sông nói chung và Việt Nam nói riêng. Các nghiên cứu được thể hiện trong tổng quan nghiên cứu trên thế giới cũng như nghiên cứu ở Việt Nam.

Thực tiễn diễn biến hình thái khu vực biển Cửa Đại - Hội An có sự biến động khá mạnh từ năm 1965 đến nay. Trong quá trình tiến triển đã có hai khoảng thời gian năm 1988 và 2018 xuất hiện đảo cát nổi trước khu vực cửa. Các đảo nổi này có gắn với hiện tượng lũ lớn đưa một lượng cát khổng lồ ra phía biển. Quá trình động lực kết hợp với mực nước dâng đã vun cao và tạo thành các đảo cát nổi lên trên mặt nước. Quá trình diễn biến tiếp theo của các đảo này là sự bóc mòn rìa phía ngoài, bồi tụ phía trong và di chuyển về mũi phía bắc (năm 1988-2000) và về mũi phía nam (2018-2024).

Từ phân tích đường bờ ảnh vệ tinh giai đoạn 1973 đến 2023 thu được kết quả biến động bờ biển trên ba phân đoạn: bờ biển phía bắc, bờ biển phía nam và di chuyển của phần cửa sông Cửa Đại. Phần bờ biển phía bắc trong giai đoạn đầu trước năm 2004 xảy ra xói lở và bồi tụ xen kẽ qua các trận lũ lớn. Giai đoạn 2004 đến nay xảy ra xói lở nghiêm trọng với tốc độ trên 50 m/năm. Bờ phía nam tương đối ổn định và có xu thế bồi. Phần trong sông biến đổi rõ rệt với sự di chuyển xuống phía nam với điểm xa nhất lên đến 500 m.

Để làm rõ hơn sự biến động của bãi biển và khắc phục hạn chế của phương pháp xác định đường bờ từ ảnh vệ tinh do các công trình cứng được xây dựng. Từ nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-2 và dữ liệu đo đạc tác giả đã xây dựng được chương trình giải đoán địa hình đáy biển dựa trên phương pháp tỉ lệ hàm mũ giữa các kênh phản xạ ánh sáng màu xanh lam (Blue) và xanh lá (green) kết quả có được các trường độ sâu địa hình trong nhiều giai đoạn, giúp cho việc đánh giá biến động đáy biển và là nguồn dữ liệu kiểm chứng kết quả tính toán mô hình số. Kết quả cho thấy phần bãi phía trước khu vực Cửa Đại có sự xói lở ngay phần dưới chân công trình tại khu vực có độ sâu nước 3 đến 5 m làm cho bãi biển trở lên dốc hơn.

Phương pháp mô hình số trị đã được áp dụng bằng việc sử dụng bộ mô hình Delft3D tính toán trong dài hạn. Để phục vụ cho tính toán dài hạn, phương pháp phân tích các yếu tố đầu vào theo phương pháp hình thái học được áp dụng phân tích đầy đủ các yếu tố cho khu vực Cửa Đại. Mô hình toán được hiệu chỉnh và kiểm định kỹ lưỡng với bộ số liệu đo đạc khảo sát.

Từ việc đánh giá nguyên nhân xói lở kết hợp với địa hình địa mạo đặc trưng khu vực nghiên cứu. Tác giả rút ra được mối liên hệ tương quan giữa nguồn cung cấp bùn cát từ trong sông và sự phân phối cát tại khu vực trước cửa sông để đề xuất ra phương án kỹ thuật công trình khắc phục hiện tượng xói lở tại bờ bawcss và ổn định bờ nam sông Cửa Đại. Với vai trò che chắn phái ngoài đồng thời tạo ra khu vực giao thoa sóng phía sau, Đảo Cù Lao Chàm đóng góp vào việc tạo ra điểm hội tụ sóng. Phương án công trình trong sông nhằm đưa vị trí cửa sông về phía bắc điểm giao thoa sóng từ đó quá trình phân phối cát cho bờ phía bắc diễn ra hiệu quả.

Các phương án công trình được đánh giá hiệu quả bằng mô hình số mô phỏng và so sánh với hiện trạng. Kết quả mô phỏng cho thấy các phương án công trình đều đem lại hiệu quả đối với việc chống xói lở bờ phía bắc bằng việc phân phối lại lượng cát từ sông. Việc ổn định bờ nam được thực hiện bằng hệ thống 5 kè mỏ hàn nắm dòng. Ưu điểm lớn nhất của đề xuất này là bảo vệ bờ biển từ xa tránh việc xây dựng các công trình cứng trên khu vực bãi biển có lượng khách du lịch đông như Cửa Đại Hội An.

Trong thực tế, việc xây dựng các công trình cứng để chinh trị khu vực bãi biển và cửa sông cần có các đánh giá trên nhiều yếu tố khác nhau. Trong nghiên cứu này chỉ đưa ra đề xuất mang tính kỹ thuật. Do đó, khi triển khai thực tế cần có đánh giá về tính tối ưu trong chi phí đầu tư để quyết định đến độ dài công trình tốt nhất. Ngoài ra việc đánh giá các tác động môi trường khác đối với công trình cũng cần được tiến hành kỹ lưỡng và khoa học.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

- [1] **Duong Cong Dien**, Hitoshi Tanaka, Nguyen Trung Viet and Dinh Van Manh, Numerical Model for Simulating Sand Terrace Formation in Front of the Cua Dai River Mouth, Proceeding of 10th International Conference on Asian and Pacific Coast (APAC 2019) Hanoi, VietNam, September 25-28,2019, http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-0291-0_81.
- [2] **Duong Cong Dien**, Nguyen Xuan Tinh, Hitoshi Tanaka, Nguyen Trung Viet. Mechanisms of Formation and Development of a New Island in front of Thu Bon River Mouth, Quang Nam Province, Vietnam. Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser B2 (Coastal Engineering). January 2020. http://dx.doi.org/10.2208/kaigan.76.2_I_619.
- [3] Nguyen Quang Duc Anh, **Duong Cong Dien**, Ho Sy Tam, Nguyen Trung Viet, Hitoshi Tanaka. Numerical simulation of hydrodynamic and sediment transport at Cua Lo inlet, Quang Nam province, Vietnam. Conference: Proceedings of the 8th International Conference of Physical Modeling in Coastal Science and Engineering (COASTLAB 2020) At: Zhoushan, China.
- [4] **D.C. Diễm**, N.T. Việt, N.N. Thế, N.V. Thắng (2019). “Tính toán vận chuyển bùn cát khu vực biển Cửa Đại - Hội An bằng mô hình tính toán đồng thời các yếu tố thủy động lực học sóng và vận chuyển bùn cát” Hội nghị Khoa học cơ học Thủy khí lần thứ 21. NXB Khoa học Tự nhiên và xã hội, PP.100 -108, 2018
- [5] N.N. Thế, T.T. Tùng, **D.C. Diễm** (2019). Research on wave set-up during storms along the coast of Cua Dai, Hội An. Vietnam Journal of Marine Science and Technology. Vol. 19, No. 3; pp. 337-347, 2019.
- [6] N.N. Thế, **D.C. Diễm**, T.T. Tùng, N.T. Việt (2019). Nghiên cứu ứng dụng camera kết hợp hệ thống cọc tiêu quan trắc và tính toán các tham số sóng vùng sóng vỡ ven bờ tại khu vực biển Cửa Đại, Hội An. Tạp chí Khoa học Thủy lợi và Môi trường; Vol. 65, pp., 2019.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Crossland, C. J., Kremer, H. H., Lindeboom, H. J., Marshall Crossland, J. I., & Le Tissier, M. D. (2005). *Coastal Fluxes in the Anthropocene: The Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Project of the International Geosphere-Biosphere Programme*. Springer Science & Business Media.
- [2] Small, C., & Nicholls, R. J. (2003). A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 19(3), 584-599.
- [3] IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [4] Prandle, D. (2009). *Estuaries: Dynamics, Mixing, Sedimentation and Morphology*. Cambridge University Press.
- [5] Syvitski, J. P., Kettner, A. J., Overeem, I., Hutton, E. W., Hannon, M. T., Brakenridge, G. R., ... & Nicholls, R. J. (2009). Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, 2(10), 681-686.
- [6] Walling, D. E. (2006). Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 79(3-4), 192-216.
- [7] Ranasinghe, R., Duong, T. M., Uhlenbrook, S., Roelvink, D., & Stive, M. (2013). Climate-change impact assessment for inlet-interrupted coastlines. *Nature Climate Change*, 3(9), 83-87.
- [8] Nguyen, T. V., Vinh, B. T., & Tanaka, H. (2019). Discussion on Coastal Erosion in the Central Coast of Vietnam. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, 75(2), I_1213-I_1218.
- [9] Vu, T. T., Umeda, S., & Ranasinghe, R. (2014). Coastal erosion in Hoi An, Central Vietnam: A review of mechanisms and potential solutions. *Coastal Engineering Journal*, 56(04), 1450019.
- [10] Tanaka, H., Nguyen, T. V., & Viet, N. T. (2019). Mechanism of Cua Dai Beach Erosion and Proposal of Countermeasures. *Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2019)*, Hanoi, Vietnam.
- [11] Dao, N. K., & Tuan, N. C. (2020). Impact of upstream reservoirs on sediment load of Vu Gia - Thu Bon river basin. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 42(1), 35-48.

- [12] UNESCO. (2009). Cu Lao Cham - Hoi An Biosphere Reserve: Nomination Form. UNESCO MAB Programme.
- [13] Nguyen, X. T., & Tanaka, H. (2017). Longshore Sediment Transport Rate in the Central Coast of Vietnam. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, 73(2), I_1081-I_1086.
- [14] Viet, N. T., Xo, N. H., & Tanaka, H. (2015). Recent rapid erosion at Cua Dai river mouth, Central Vietnam. *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, 71(2), I_1603-I_1608.
- [15] Fila, L., Gratiot, N., & Tran, D. T. (2016). Sand transport patterns at the Cua Dai inlet (Vietnam): An application of a numerical model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 181, 196-208.
- [16] Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1964). Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 11(4), 529-562.
- [17] Longuet-Higgins, M. S. (1970). Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. *Journal of Geophysical Research*, 75(33), 6778-6789.
- [18] Dyer, K. R. (1997). *Estuaries: A Physical Introduction* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [19] Geyer, W. R., & MacCready, P. (2014). The estuarine circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46, 175-197.
- [20] Grant, W. D., & Madsen, O. S. (1979). Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C4), 1797-1808.
- [21] Soulsby, R. (1997). *Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications*. Thomas Telford.
- [22] Fredsøe, J., & Deigaard, R. (1992). *Mechanics of Coastal Sediment Transport*. World Scientific.
- [23] CERC (Coastal Engineering Research Center). (1984). *Shore Protection Manual*. U.S. Army Corps of Engineers.
- [24] Kamphuis, J. W. (1991). Alongshore sediment transport rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 117(6), 624-640.

- [25] Roelvink, J. A., & Stive, M. J. F. (1989). Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C4), 4785-4800.
- [26] Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (2002). *Coastal Processes with Engineering Applications*. Cambridge University Press.
- [27] Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 883-915.
- [28] DHI. (2017). *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Scientific Documentation*. Danish Hydraulic Institute.
- [29] Chen, C., Liu, H., & Beardsley, R. C. (2003). An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 20(1), 159-186.
- [30] Rodi, W. (1993). *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics*. IAHR Monograph, CRC Press.
- [31] Roelvink, J. A. (2006). Coastal morphodynamic evolution techniques. *Coastal Engineering*, 53(2-3), 277-287.
- [32] Bruun, P. (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88(1), 117-130.
- [33] Ranasinghe, R., Callaghan, D., & Stive, M. J. F. (2012). Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. *Climatic Change*, 110(3), 561-574.
- [34] Cooper, J. A. G., & Pilkey, O. H. (2004). Sea-level rise and coastal erosion: a required shift in perspective. *Journal of Coastal Research*, 20(1), 157-161.
- [35] Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V. R., Codignotto, J. O., Hay, J. E., McLean, R. F., ... & Woodroffe, C. D. (2007). Coastal systems and low-lying areas. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability* (pp. 315-356). Cambridge University Press.
- [36] Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Perrette, M., Nicholls, R. J., Tol, R. S., ... & Levermann, A. (2014). Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3292-3297.

- [37] Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Jevrejeva, S., Jackson, L. P., & Feyen, L. (2018). Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. *Nature Communications*, 9(1), 2360.
- [38] Stanley, D. J., & Warne, A. G. (1993). Nile Delta: Recent geological evolution and human impact. *Science*, 260(5108), 628-634.
- [39] Kondolf, G. M., Rubin, Z. K., & Minear, J. T. (2014). Dams on the Mekong: Cumulative sediment starvation. *Water Resources Research*, 50(6), 5158-5169.
- [40] Manh, N. V., Dung, N. V., Hung, N. N., Kumm, M., Merz, B., & Apel, H. (2015). Future sediment dynamics in the Mekong Delta floodplains: Impacts of hydropower development, climate change and sea level rise. *Global and Planetary Change*, 127, 22-33.
- [41] Temmerman, S., Meire, P., Bouma, T. J., Herman, P. M., Ysebaert, T., & De Vriend, H. J. (2013). Ecosystem-based coastal defence in the face of global change. *Nature*, 504(7478), 79-83.
- [42] Lương Phương Hậu, Lê Mạnh Hùng, & Nguyễn Bá Quý. (2005). Công trình bảo vệ bờ biển - Cơ sở thiết kế và xây dựng. Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.
- [43] Lê Đình Thành. (2010). Nghiên cứu đặc điểm trường sóng biển ven bờ miền Trung Việt Nam phục vụ thiết kế công trình biển. Tuyển tập KHCN 50 năm Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.
- [44] Nguyễn Mạnh Hùng. (2012). Cơ sở dữ liệu sóng và gió biển Đông phục vụ phát triển kinh tế biển. Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ.
- [45] Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu (IMHEN). (2015). Đặc điểm khí hậu và tài nguyên khí hậu Việt Nam. Nhà xuất bản Tài nguyên Môi trường và Bản đồ Việt Nam.
- [46] Đào Nguyên Khôi. (2018). Đánh giá diễn biến đường bờ biển Cửa Đại - Hội An giai đoạn 1975-2015 bằng tư liệu viễn thám. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, 11(132), 42-46.
- [47] Lê Thanh Chương. (2015). Nghiên cứu đánh giá nguyên nhân và đề xuất giải pháp ổn định Cửa Đại, tỉnh Quảng Nam. Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam.

- [48] Le, T. C., & Nguyen, H. S. (2015). Seasonal variation of shoreline and beach morphology at Cua Dai Estuary. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 15(4), 329-338.
- [49] UBND Tỉnh Quảng Nam. (2020). Báo cáo tổng kết dự án nghiên cứu tổng thể về xói lở và bảo vệ bờ biển Hội An.
- [50] Nguyen, T. V., Tanaka, H., & Viet, N. T. (2017). Erosion Mechanism at Cua Dai Beach, Hoi An City, Vietnam. *Journal of Coastal Research*, 33(3), 560-569.
- [51] Doan, P. K., Nguyen, K. D., & Tran, D. D. (2018). Sediment budget analysis for the Vu Gia Thu Bon river basin under impact of hydropower development. *Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 22, 112-125.
- [52] Mai, T. C., Stive, M. J. F., & Van Rijn, L. C. (2020). Coastal erosion in Central Vietnam: The role of sediment starvation and wave climate. *Coastal Engineering Proceedings*, 36(2020).
- [53] Besset, M., Anthony, E. J., & Bouchette, F. (2019). Multi-decadal variations in delta shorelines and their relationship to river sediment supply: An assessment and review. *Earth-Science Reviews*, 193, 199-219.
- [54] Trương, V. B., & cộng sự. (2016). Đặc điểm trường sóng trong bão khu vực ven biển miền Trung từ số liệu mô phỏng. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 667, 12-18.
- [55] Nguyen, T. V., Hieu, N. T., & Vinh, B. T. (2020). Effectiveness and impacts of groins system at Cua Dai beach. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 36(2), 55-64.
- [56] Viện Kỹ thuật Biển. (2019). Đánh giá hiệu quả và độ bền của giải pháp đê ngầm túi vải (Geotube) tại bờ biển Hội An. Báo cáo khoa học.
- [57] Stive, M. J. F., De Schipper, M. A., & Van Rijn, L. C. (2021). The Sand Engine: A solution for broader coastal protection?. *Coastal Engineering*, 168, 103932.
- [58] Bộ Tài nguyên và Môi trường (MONRE). (2016). Kịch bản Biến đổi khí hậu và nước biển dâng cho Việt Nam. Nhà xuất bản Tài nguyên Môi trường và Bản đồ Việt Nam.
- [59] Bộ Tài nguyên và Môi trường (MONRE). (2020). Kịch bản Biến đổi khí hậu và nước biển dâng cho Việt Nam (Cập nhật năm 2020). Nhà xuất bản Tài nguyên Môi trường và Bản đồ Việt Nam.

- [60] Church, J. A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., ... & Unnikrishnan, A. S. (2013). Sea Level Change. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- [61] Slangen, A. B. A., Carson, M., Katsman, C. A., van de Wal, R. S. W., Köhl, A., Vermeersen, L. L. A., & Stammer, D. (2014). Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Climatic Change*, 124(1-2), 317-332.
- [62] Nguyen-Thi, H. A., Matsumoto, J., Ngo-Duc, T., & Endo, N. (2019). Long-term trends in tropical cyclone rainfall over Vietnam. *Journal of Climate*, 32(17), 5595-5612.
- [63] Shimura, T., Mori, N., & Mase, H. (2015). Future projections of ocean wave climate in the Northwest Pacific Ocean. *Climate Research*, 65, 1-13.
- [64] Arns, A., Dangendorf, S., Jensen, J., Talke, S., Bender, J., & Pattiaratchi, C. (2017). Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. *Scientific Reports*, 7(1), 40171.
- [65] Takagi, H., Thao, N. D., Anh, L. T., & Tuan, T. Q. (2016). Sea-Level Rise and Coastal Adaptation Strategies in Vietnam. In *Climate Change Adaptation and Disaster Risk Reduction: Issues and Challenges* (pp. 95-114). Emerald Group Publishing Limited.
- [66] N. K. Đan and N. T. Việt, "*dự án KH&CN: Nghiên cứu quá trình xói lở và các biện pháp bảo vệ bờ biển phòng chống xói lở Cửa Đại, Hội An*," Trường Cao đẳng Công nghệ, Kinh tế và Thủy lợi miền Trung, Quảng Nam, 2016.
- [67] N. N. Thế et al, "*Báo cáo tổng kết đề tài KH&CN cấp tỉnh: Nghiên cứu đánh giá các giải pháp kè mềm bảo vệ bờ biển Cửa Đại, thành phố Hội An hiện nay và đề xuất giải pháp nâng cao hiệu quả*," Quảng Nam, 2017
- [68] McFEETERS, S.K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open waterfeatures. *International Journal of Remote Sensing*, 1996. 17(7): p. 1425-1432.
- [69] Stumpf, Richard & Holderied, Kristine & Sinclair, Mark. (2003). Determination of Water Depth with High-Resolution Satellite Imagery over Variable Bottom Types. *Limnol. Oceanogr.* 48. 547-556. 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547.
- [70] "*Báo cáo kinh tế kỹ thuật. Dự án Kè chống xâm thực bờ biển thành phố Hội An – Giai đoạn 1*," Trung tâm Tư vấn kỹ thuật xây dựng Đà Nẵng, 2011.

- [71] "*Báo cáo kinh tế kỹ thuật. Dự án Kè chống xâm thực bờ biển phường Cửa Đại,*"
Công ty CP tư vấn thiết kế xây dựng giao thông công chính Đà Nẵng, 2014.

PHỤ LỤC 1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT MÔ HÌNH DELFT_WAVE [40]

1. Mô hình tính toán sóng Delft-Wave

1.1. Giới thiệu mô hình

Mô hình tính toán sóng là một trong bộ mô hình tính toán vận chuyển bùn cát và biến động hình thái cùng với một số mô hình khác (mô hình thủy lực và vận chuyển bùn cát). Mô hình sóng đảm nhiệm tính toán các tham số sóng lan truyền từ khu vực nước sâu vào khu vực nghiên cứu tính toán vận chuyển bùn cát và biến động hình thái. Trong nghiên cứu này, mô hình sóng được sử dụng là mô hình SWAN, mô hình được tích hợp trong hệ thống mô hình của DELFT3D và có thể cập trao đổi, tương tác với mô hình thủy lực và vận chuyển bùn cát DELFT_Flow theo thời gian thực. Việc tính toán trao đổi các tham số giữa các mô hình theo bước thời gian là phương pháp tính toán hiện đại giúp tăng độ chính xác mô phỏng các yếu tố thủy động lực học tạo điều kiện tính toán vận chuyển bùn cát và biến động hình thái chính xác hơn.

Mô hình SWAN là mô hình giải phương trình cân bằng tác động phổ sóng và không có các hạn chế về dạng phổ sóng, phổ năng lượng sóng ở dạng ngẫu nhiên giống với phổ sóng trong tự nhiên. Các phương trình mô tả các tác động của truyền sóng trong không gian, khúc xạ sóng, biến dạng sóng do đáy biển, quá trình tiếp nhận và tiêu tán năng lượng sóng và các quá trình tương tác phi tuyến giữa các sóng. SWAN là mô hình sóng thuộc thể hệ thứ ba, tính toán các tham số sóng trong các khu vực ven biển, cửa sông, vịnh và hồ từ các điều kiện gió, địa hình và dòng chảy. SWAN là mô hình được viết bằng mã nguồn mở, các tác giả đóng góp chính là Young (1999) và Booij (1999) và các cộng sự.

Các quá trình tính toán lan truyền sóng cơ bản trong mô hình SWAN;

- Lan truyền sóng trong không gian;
- Khúc xạ sóng do thay đổi đáy và dòng chảy;
- Nhiễu xạ sóng;
- Biến dạng sóng do đáy biển và dòng chảy;
- Cản trở và khúc xạ do dòng chảy ngược chiều;
- Chuyển đổi, ngăn cản hoặc khúc xạ do công trình.

Các quá trình tiếp nhận và tiêu tán năng lượng trong mô hình SWAN:

- Tiếp nhận năng lượng từ gió;

- Tiêu tán năng lượng do bạc đầu sóng;
- Tiêu tán năng lượng do sóng đổ;
- Tiêu tán năng lượng do ma sát đáy;
- Tương tác phi tuyến giữa các sóng trong khu vực nước sâu và nước nông.

Ngoài ra, quá trình nước dâng do sóng cũng được tính đến. Dòng chảy do sóng không được tính đến, tuy nhiên các thành phần ứng suất bức xạ sóng được tính và trao đổi với mô hình thủy lực từ đó tính toán yếu tố dòng chảy do sóng trong các mô hình này. Bảng PL1.1 đưa ra tóm tắt về các quá trình vật lý trong mô hình SWAN và các thể hệ mô hình sóng được đề cập tới.

Bảng PL1.1. Bảng tóm tắt các quá trình vật lý của sóng trong mô hình SWAN

Các quá trình vật lý	Tác giả phát triển	Thế hệ mô hình		
		1	2	3
Quá trình tăng trưởng tuyến tính	Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981) Hiệu chỉnh	x	x	
	Cavaleri and Malanotte-Rizzoli (1981)			x
Quá trình tăng trưởng theo hàm mũ	Snyder et al. (1981) hiệu chỉnh	x	x	
	Snyder et al. (1981)			x
	Janssen (1989, 1991)			x
	Yan (1987) hiệu chỉnh			x
Bạc đầu sóng	Holthuijsen and De Boer (1988)	x	x	
	Komen et al. (1984)			x
	Janssen (1991)			x
	Alves and Banner (2003)			x
Tương tác sóng bậc bốn	Hasselmann et al. (1985)			x
Tương tác sóng bậc ba	Eldeberky (1996)	x	x	x

Các quá trình vật lý	Tác giả phát triển	Thế hệ mô hình		
		1	2	3
Sóng đồ	Battjes and Janssen (1978)	x	x	x
Ma sát đáy	JONSWAP (1973)	x	x	x
	Collins (1972)	x	x	x
	Madsen et al. (1988)	x	x	x
Sóng truyền qua công trình	Seelig (1979), d'Angremond (1996)	x	x	x
Nước dâng do sóng		x	x	x
Tiêu tán sóng do thực vật	Dalrymple (1984)	x	x	x
Tiêu tán sóng do bùn	Ng (2000)	x	x	x
Tiêu tán sóng do băng	Collins and Rogers (2017), Rogers (2019)	x	x	x
Tiêu tán sóng do rôi		x	x	x

Mô hình SWAN có thể tính toán trong hai chế độ: Mô hình ổn định và mô hình không ổn định. Mô hình tính toán trên hai hệ tọa độ: Đề Các (với các vùng quy mô nhỏ) và hệ tọa độ địa lý (vùng tính toán trên quy mô lớn). Các dạng lưới tính dùng trong mô hình SWAN cũng đa dạng: lưới cong trục giao, lưới có cấu trúc (chữ nhật, vuông ...), lưới tam giác và lưới phi cấu trúc.

1.2. Cơ sở lý thuyết của mô hình

1.2.1. Phương trình cân bằng tác động phổ sóng

Trong SWAN, các sóng được mô tả dưới dạng phổ tác động sóng hai chiều. Ưu thế của dạng phổ này là có thể mô phỏng trong các điều kiện sóng phi tuyến cao (như trong vùng sóng đồ). Trong SWAN, ưu tiên sử dụng phổ mật độ tác động $N(\sigma, \theta)$ hơn là phổ mật độ năng lượng $E(\sigma, \theta)$, vì trong điều kiện có dòng chảy, phổ mật độ tác động được bảo toàn trong khi phổ mật độ năng lượng thì không (Whitham, 1974). Các biến độc lập ở đây là tần số tương đối σ và hướng sóng θ . Mật độ tác động bằng

mật độ năng lượng chia cho tần số tương đối: $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$. Mật độ phổ tác động sóng thay đổi cả trong không gian và thời gian.

Trong mô hình SWAN, sự tiến triển của phổ mật độ tác động trong hệ tọa độ Đề Các theo Hasselmann (1973) và các cộng sự như sau:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (\text{PL1.1})$$

Trong đó: thành phần đầu tiên trong vế trái là sự thay đổi địa phương của phổ mật độ tác động theo thời gian. Thành phần thứ hai và ba là quá trình lan truyền mật độ tác động trong không gian địa lý (với vận tốc truyền c_x và c_y tương ứng theo hướng x và y). thành phần thứ bốn tương ứng với sự dịch chuyển của tần số tương đối do thay đổi của độ sâu và dòng chảy (với tốc độ c_σ trong không gian σ). Thành phần thứ năm là sự khúc xạ do địa hình và dòng chảy (với tốc độ thay đổi c_θ trong không gian θ). Thành phần bên phải của phương trình $S (=S(\sigma, \theta))$ là thành phần hàm nguồn của mật độ năng lượng, ảnh hưởng bởi các quá trình tiếp nhận, tiêu tán và chuyển đổi năng lượng do tương tác phi tuyến của sóng.

Trong khu vực nước nông, nguồn năng lượng S chịu ảnh hưởng từ sáu thành phần:

$$S = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad (\text{PL1.2})$$

Các thành phần tương ứng với tiếp nhận năng lượng từ gió, tương tác sóng bậc ba, tương tác sóng bậc bốn, tiêu tán năng lượng sóng do sóng bậc đầu, tiêu tán năng lượng do ma sát đáy và tiêu tán năng lượng do sóng đổ.

1.2.2. Quá trình tăng trưởng sóng từ gió:

$$S_{in}(\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (\text{PL1.3})$$

Trong đó A là thành phần tăng trưởng tuyến tính, BE thành phần tăng trưởng theo hàm mũ. Trong mô hình SWAN sử dụng giá trị tốc độ gió tại độ cao 10 m so với mực nước biển U_{10} , từ đó tính toán tốc độ kéo U^* . Công thức tính tốc độ kéo của gió giống công thức của WAM 3 như sau:

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (\text{PL1.4})$$

Trong đó C_D là hệ số kéo, theo Wu 1982:

$$C_D(U_{10}) = \begin{cases} 1,2875 \times 10^{-3}, & U_{10} < 7,5 \text{ m/s} \\ (0,8 + 0,065 [s/m] \times U_{10}) \times 10^{-3}, & U_{10} \geq 7,5 \text{ m/s} \end{cases} \quad (\text{PL1.5})$$

- *Tăng trưởng tuyến tính do gió:*

Đối với giá trị tăng trưởng sóng tuyến tính A, Cavaleri và Malanotte-Rizzoli (1981) đề xuất công thức tính với bộ lọc để loại bỏ các sóng có tần số thấp hơn tần số Pierson-Moskowitz (Tolman, 1992a):

$$A = \frac{1,5 \times 10^{-3}}{2\pi g^2} (U_* \max[0, \cos(\theta - \theta_w)])^4 H \quad (\text{PL1.6})$$

Trong đó

$$H = \exp \left\{ - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{PM}^*} \right)^{-4} \right\}, \quad \sigma_{PM}^* = \frac{0,13g}{28U_*} 2\pi \quad (\text{PL1.7})$$

Trong đó, θ_w là hướng gió, H là hàm lọc, σ_{PM}^* là tần số đỉnh phổ trong trạng thái sóng biển phát triển đầy đủ theo Pierson and Moskowitz (1964).

- *Tăng trưởng sóng theo hàm mũ:*

Biểu thức B tính theo công thức của Komen (1984) và các cộng sự. Biểu thức là một hàm của U_*/c_{ph} :

$$B = \max \left(0, 0,25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \left(28 \frac{U_*}{c_{ph}} \cos(\theta - \theta_w) - 1 \right) \right) \sigma \quad (\text{PL1.8})$$

Trong đó c_{ph} là tốc độ pha, ρ_a và ρ_w là mật độ không khí và nước.

1.2.2. Các quá trình tiêu tán năng lượng sóng:

- *Quá trình bậc đầu sóng:*

Quá trình bậc đầu sóng được mô phỏng theo mô hình xung của Hasselmann (1974). Công thức được cải tiến lại với số sóng (thay vì tần số) để có thể áp dụng cho các độ sâu nước hữu hạn (WAMDI 1988), công thức được viết như sau:

$$S_{ds,w}(\sigma, \theta) = -\Gamma \tilde{\sigma}^{\frac{k}{\tilde{k}}} E(\sigma, \theta) \quad (\text{PL1.9})$$

Trong đó, $\tilde{\sigma}$ và $\tilde{k}$ là tần số sóng trung bình và số sóng trung bình và hệ số Γ là độ dốc sóng tổng cộng. độ dốc này phụ thuộc vào các hệ số, công thức đưa ra bởi nhóm WAMDI 1988 và bổ sung bởi Günther et al. (1992) dựa theo công thức của Janssen (1991a,b).

$$\Gamma = \Gamma_{KJ} = C_{ds} \left((1 - \delta) + \delta \frac{k}{\tilde{k}} \right) \left(\frac{\tilde{s}}{\tilde{s}_{PM}} \right)^p \quad (\text{PL1.10})$$

Đối với $\delta = 0$ biểu thức rút gọn giống của WAMDI 1988. Các hệ số C_{ds} , δ và p là các hệ số có thể thay đổi được. $\tilde{s}$ là độ dốc tổng cộng, $\tilde{s}_{PM}$ là giá trị của

$\tilde{s}$ đối với phổ Pierson-Moskowitz (1964): $\tilde{s}_{PM} = \sqrt{3,02 \times 10^{-3}}$. Độ dốc sóng tổng cộng được tính như sau:

$$\tilde{s} = \tilde{k} \sqrt{E_{tot}} \quad (PL1.11)$$

Tần số trung bình $\tilde{\sigma}$, số sóng trung bình $\tilde{k}$ và tổng năng lượng sóng E_{tot} được tính theo công thức WAMDI 1988:

$$\tilde{\sigma} = \left(E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-1} \quad (PL1.12)$$

$$\tilde{k} = \left(E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{k}} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{-2} \quad (PL1.13)$$

$$E_{tot} = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (PL1.14)$$

Các giá trị của hệ số hiệu chỉnh C_{ds} , δ và p thu nhận từ công thức của Komen (1984) và Janssen (1992) bằng cách đồng phương trình cân bằng năng lượng trong điều kiện tăng trưởng sóng lý tưởng tại khu vực biển sâu. Giá trị Γ phụ thuộc vào các giá trị hệ số với gió đầu vào. Đối với các giá trị gió đầu vào theo Komen (1984) như sau:

$$C_{ds} = 2,36 \times 10^{-5}, \delta = 0 \text{ và } p = 4 \quad (PL1.15)$$

- *Tiêu tán năng lượng do ma sát đáy:*

Công thức ma sát đáy trong SWAN sử dụng mô hình thực nghiệm của JONSWAP (Hasselmann 1973), mô hình kéo của Collins (1972) và mô hình nhót xoáy của Madsen (1988). Công thức tính tiêu tán năng lượng do ma sát đáy được viết dưới dạng:

$$S_{ds,b} = -C_b \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) \quad (PL1.16)$$

Trong đó C_b là hệ số ma sát đáy, thông thường phụ thuộc vào chuyển động tại đáy U_{rms} :

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{\sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (PL1.17)$$

Hasselmann (1973) tìm thấy giá trị giống với giá trị thực nghiệm của JONSWAP, $C_b = C_{JON} = 0,038 m^2 s^{-3}$ đối với điều kiện sóng lừng. Bouws và Komen (1983) lựa chọn giá trị $C_{JON} = 0,067 m^2 s^{-3}$ cho điều kiện sóng phát triển đầy đủ trong vùng nước nông.

Công thức của Collins (1972) dựa trên công thức thông thường của các sóng tuần hoàn với các tham số điều chỉnh thích hợp với các sóng ngẫu nhiên. Tốc độ tiêu

tán năng lượng do ma sát được tính với công thức thông thường $C_b = C_f g U_{rms}$, $C_f = 0,015$ là hệ số của Collins.

Madsen (1988) đưa ra công thức tương tự như của Hasselmann và Collins (1968) nhưng trong mô hình này nhân tố ma sát đáy là một hàm của độ nhám đáy và điều kiện sóng. Hệ số ma sát tính theo công thức:

$$C_b = f_w \frac{g}{\sqrt{2}} U_{rms} \quad (PL1.18)$$

Trong đó f_w là nhân tố ma sát phi thứ nguyên, được tính theo công thức Jonsson (1966) và Madsen (1988):

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log_{10} \left(\frac{1}{4\sqrt{f_w}} \right) = m_f + \log_{10} \left(\frac{a_b}{K_N} \right) \quad (PL1.19)$$

Trong đó: $m_f = -0,08$ (Jonsson and Carlsen, 1976) và a_b biên độ tại lớp sát đáy.

$$a_b^2 = 2 \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\sinh^2 kd} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (PL1.20)$$

Và K_N độ dài nhám đáy. Đối với tỉ số a_b/K_N nhỏ hơn 1,57 hệ số ma sát f_w bằng 0,3 (Jonsson, 1980).

- *Tiêu tán năng lượng do sóng đổ:*

Để mô hình hóa quá trình tiêu tán năng lượng do sóng đổ đối với các sóng ngẫu nhiên do độ sâu nước, mô hình SWAN áp dụng mô hình cuộn xoáy của Battjes và Janssen (1978). Tỉ lệ tiêu tán năng lượng trung bình trên một đơn vị diện tích phụ thuộc vào sóng đổ, biểu thức được viết như sau:

$$D_{tot} = -\frac{1}{4} \alpha_{BJ} Q_b \left(\frac{\tilde{\sigma}}{2\pi} \right) H_{max}^2 = -\alpha_{BJ} Q_b \tilde{\sigma} \frac{H_{max}^2}{8\pi} \quad (PL1.21)$$

Trong đó $\alpha_{BJ} = 1$, Q_b là chỉ số sóng đổ được xác định bằng biểu thức:

$$\frac{1-Q_b}{\ln Q_b} = -8 \frac{E_{tot}}{H_{max}^2} \quad (PL1.22)$$

Trong đó H_{max} là độ cao sóng lớn nhất có thể tồn tại tại độ sâu nước, $\tilde{\sigma}$ là tần số sóng trung bình xác định bằng:

$$\tilde{\sigma} = E_{tot}^{-1} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \sigma E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (PL1.23)$$

Chỉ số sóng đổ (Q_b) trong SWAN được xác định theo công thức:

$$Q_b = \begin{cases} 0, \beta \leq 0,2 \\ Q_0 - \beta^2 \frac{Q_0 - \exp((Q_0-1)/\beta^2)}{\beta^2 - \exp((Q_0-1)/\beta^2)}, 0,2 < \beta < 1 \\ 1, \beta \geq 1 \end{cases} \quad (PL1.24)$$

Ở đây $\beta = H_{rms}/H_{max}$, đối với $\beta \leq 0,5, Q_0 = 0$ và $0,5 < \beta \leq 1, Q_0 = (2\beta - 1)^2$

Một công thức mở rộng của Eldeberky và Battjes (1995) bao gồm thêm hướng phổ và tiêu tán năng lượng đối với từng thành phần phổ.

$$S_{ds,br}(\sigma, \theta) = \frac{D_{tot}}{E_{tot}} E(\sigma, \theta) = -\frac{\alpha_{BJ} Q_b \tilde{\sigma}}{\beta^2 \pi} E(\sigma, \theta) \quad (PL1.25)$$

Độ cao sóng cực đại H_{max} được xác định bằng $H_{max} = \gamma d$. Trong đó γ là hệ số sóng đồ, các kết quả trong phòng thí nghiệm cho thấy giá trị nằm trong khoảng 0,6 đến 0,83 phụ thuộc vào địa hình đáy, d là độ sâu nước.

1.2.3. Tương tác giữa các sóng

- *Tương tác sóng bậc bốn:*

Tương tác sóng bậc bốn được tính toán bằng phương pháp xấp xỉ rời rạc (DIA) đưa ra bởi Hasselmann (1985). Trong phép xấp xỉ rời rạc hai phần tử số sóng được xem xét, cả với hai tần số.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma \\ \sigma_3 &= \sigma(1+\lambda) = \sigma^+ \\ \sigma_4 &= \sigma(1-\lambda) = \sigma^- \end{aligned} \quad (PL1.26)$$

Trong đó λ là hằng số cho bằng 0,25. Để thỏa mãn điều kiện cộng hưởng với góc phần tư thứ nhất, các vec tơ số sóng với các tần số σ_3 và σ_4 đặt trong góc $\theta_1 = -11,48^\circ$ và $\theta_2 = 33,56^\circ$ vào hai vec tơ sóng có các tần số giống nhau σ_1 và σ_2 . Góc phần tư thứ hai tương phản với góc phần tư thứ nhất $\theta_3 = \theta^+ = 11,48^\circ$ và $\theta_4 = \theta^- = -33,56^\circ$.

Trong phép xấp xỉ rời rạc, hàm nguồn tương tác bậc bốn $S_{nl4}(\sigma, \theta)$ được đưa ra như sau:

$$S_{nl4}(\sigma, \theta) = S_{nl4}^*(\sigma, \theta) + S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta) \quad (PL1.27)$$

Trong đó $S_{nl4}^*(\sigma, \theta)$ tương ứng cho góc phần tư thứ nhất, $S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)$ tương ứng góc phần tư thứ hai (biểu thức xác định $S_{nl4}^{**}(\sigma, \theta)$ giống với $S_{nl4}^*(\sigma, \theta)$ nhưng ngược hướng).

$$S_{nl4}^*(\sigma, \theta) = 2\delta S_{nl4}^*(\alpha_1, \sigma, \theta) - \delta S_{nl4}^*(\alpha_2, \sigma, \theta) - \delta S_{nl4}^*(\alpha_3, \sigma, \theta) \quad (PL1.28)$$

Trong đó $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = (1 + \lambda)$ và $\alpha_3 = (1 - \lambda)$. Với mỗi chỉ số ($i=1,2,3$) viết là:

$$\delta S_{nl4}(\alpha_i \sigma, \theta) = C_{nl4} (2\pi)^2 g^{-4} \left(\frac{\sigma}{2\pi} \right)^{11} \times \left[E^2(\alpha_i \sigma, \theta) \left(\frac{E^2(\alpha_i \sigma^+, \theta)}{(1+\lambda)^4} + \frac{E^2(\alpha_i \sigma^-, \theta)}{(1-\lambda)^4} \right) - 2 \frac{E^2(\alpha_i \sigma, \theta) E^2(\alpha_i \sigma^+, \theta) E^2(\alpha_i \sigma^-, \theta)}{(1-\lambda^2)^4} \right] \quad (\text{PL1.29})$$

Hằng số $C_{nl4} = 3 \times 10^7$. Theo Hasselmann (1981), tương tác bậc bốn trong khu vực độ sâu nước hữu hạn giống với tương tác trong khu vực nước sâu nhân thêm hệ số R.

- *Tương tác sóng bậc ba:*

Trong mô hình SWAN, tương tác sóng bậc ba sử dụng phương pháp xấp xỉ bậc ba Eldeberky (1996) và được điều chỉnh bởi Eldeberky và Battjes (1995).

$$S_{nl3}(\sigma, \theta) = S_{nl3}^-(\sigma, \theta) + S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (\text{PL1.30})$$

Với

$$S_{nl3}^+(\sigma, \theta) = \max[\alpha_{EB} 2\pi c c_g J^2 |\sin \beta| \{E^2(\sigma/2, \theta) - 2E(\sigma/2, \theta)E(\sigma, \theta)\}] \quad (\text{PL1.31})$$

Và

$$S_{nl3}^-(\sigma, \theta) = -2S_{nl3}^+(\sigma, \theta) \quad (\text{PL1.32})$$

Trong đó α_{EB} là hệ số, β hệ số pha được tính theo biểu thức:

$$\beta = -\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \tanh\left(\frac{0,2}{U_r}\right) \quad (\text{PL1.33})$$

Với số Ursell U_r là:

$$U_r = \frac{g}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{H_s T_{m01}^2}{d^2} \quad (\text{PL1.34})$$

Trong tương tác sóng bậc ba chỉ được tính với $0 \leq U_r \leq 1$. Hệ số tương tác bậc ba được Madsen và Sørensen (1993) đưa ra:

$$J = \frac{k_{\sigma/2}^2 (gd + 2c_{\sigma/2}^2)}{k_{\sigma} d (gd + \frac{2}{15} g d^3 k_{\sigma}^2 - \frac{2}{5} \sigma^2 d^2)} \quad (\text{PL1.35})$$

1.2.4. Nhiều xạ sóng:

Trong trường hợp đơn giản nhất, giả thiết là không có dòng chảy. Điều này có nghĩa là $c_{\sigma} = 0$, các thành phần vận tốc lan truyền trong không gian $c_{x,0}$, $c_{y,0}$ và $c_{\theta,0}$ khi không có nhiễu xạ được biểu thị dưới dạng:

$$c_{x,0} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \cos(\theta), \quad c_{y,0} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \sin(\theta), \quad c_{\theta,0} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{\partial h}{\partial n} \quad (\text{PL1.36})$$

Trong đó k là số sóng, n là tia sóng. Phương trình eikonal được viết như sau:

$$K^2 = k^2(1 + \delta) \quad (\text{PL1.37})$$

Với tham số nhiễu xạ δ được xác định bởi:

$$\delta = \frac{\nabla(cc_g \nabla \sqrt{E})}{cc_g \sqrt{E}} \quad (\text{PL1.38})$$

Trong đó $E(x,y)$ là tổng năng lượng sóng. Vận tốc lan truyền khi có tác động của nhiễu xạ:

$$c_x = c_{x,0} \bar{\delta}, \quad c_y = c_{y,0} \bar{\delta}, \quad c_\theta = c_{\theta,0} \bar{\delta} - \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial x} c_{y,0} + \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial y} c_{x,0} \quad (\text{PL1.39})$$

Trong đó:

$$\bar{\delta} = \sqrt{1 + \delta} \quad (\text{PL1.40})$$

PHỤ LỤC 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT MÔ HÌNH DELFT_FLOW

1. Giới thiệu mô hình

Delft3D-Flow là mô đun tính toán dòng chảy và vận chuyển bùn cát được phát triển bởi viện khoa học thủy lực Deltares - Hà Lan. Mô hình mô phỏng dòng chảy hai chiều (trung bình theo độ sâu) hoặc tính toán thủy lực ba chiều dưới tác động của thủy triều, các yếu tố khí tượng và cả những tác động do sự khác biệt mật độ do thay đổi nhiệt độ và độ mặn. Mô hình dòng chảy có thể sử dụng cho khu vực nước nông ven biển, cửa sông, sông, đầm phá và các hồ nước. Mô hình dòng chảy tập trung với dòng chảy mà ở đó quy mô theo phương ngang và thời gian lớn hơn so với quy mô phương thẳng đứng.

Trong trường hợp chất lỏng là đồng nhất, phương pháp lấy trung bình theo độ sâu là thích hợp. Mô hình dòng chảy hai chiều trung bình theo độ sâu có thể áp dụng trong trường hợp này. Các bài toán áp dụng mô hình hai chiều đó là tính toán thủy triều, nước dâng do bão, dao động trong cảng và vận chuyển các chất ô nhiễm trong trạng thái xáo trộn tốt.

Mô hình ba chiều được áp dụng khi trường dòng chảy theo phương ngang có sự khác biệt đáng kể theo chiều thẳng đứng. Những sự thay đổi này gây ra bởi các tác động của gió, ứng suất nền đáy, lực Coriolis, địa hình đáy hoặc thay đổi mật độ.

Mô hình dòng chảy Delft3D giải hệ phương trình nước nông không ổn định hai chiều hoặc ba chiều. hệ phương trình bao gồm: phương trình chuyển động theo phương ngang, phương trình liên tục và phương trình vận chuyển cho các thành phần chất bảo toàn. Các phương trình được giải trên hệ tọa độ lưới cong trục giao hoặc hệ tọa độ cầu. Các dạng lưới vuông và lưới chữ nhật được xem như một dạng đơn của lưới cong trục giao. Trong hệ tọa độ cong trục giao, bề mặt nước và mặt đáy được xác định so với bề mặt chuẩn nằm ngang, trong khi trong hệ tọa độ cầu bề mặt chuẩn là đường cong của trái đất.

Dòng chảy gây ra bởi các tác động chính như: lực thủy triều trên biên, ứng suất gió trên bề mặt, chênh lệch áp suất bề mặt do các yếu tố khí tượng hoặc do chênh lệch mật độ nước. Các giá trị nguồn vào gồm có việc cấp hoặc xả nước.

Trong mô hình Delft3D, các hiện tượng vật lý được mô hình hóa như sau:

- Sự chênh lệch của bề mặt tự do;
- Ảnh hưởng của lực quay của trái đất;
- Cột nước với mật độ thay đổi;

- Chênh lệch áp suất theo phương ngang;
- Ảnh hưởng của rôi;
- Trao đổi nhiệt muối giữa các khối nước;
- Tác động của thủy triều;
- Tác động của gió trên bề mặt;
- Tác động của áp suất khí quyển trên bề mặt;
- Các nguồn ngoại lực (lưu lượng vào và ra);
- Biên khô ướt;
- Trao đổi nhiệt qua bề mặt;
- Mưa và bốc hơi;
- Ảnh hưởng của hoàn lưu;
- Ứng suất trượt trên tường đứng;
- Thay đổi động lượng do sóng nội;
- Tác động của sóng;
- Ảnh hưởng của công trình;
- Dòng chảy do gió.

2. Các phương trình cơ bản mô hình Delft3D

Delft3D tính toán dựa trên việc giải phương trình Navier Stokes với chất lỏng không nén được, trong vùng nước nông và với các giả thiết Boussines. Trong phương trình động lượng theo phương thẳng đứng, gia tốc thẳng đứng được bỏ qua, điều này dẫn đến phương trình áp suất thủy tĩnh. Trong mô hình ba chiều, vận tốc thẳng đứng được tính từ phương trình liên tục. Các phương trình vi phân với các điều kiện biên, điều kiện ban đầu được tiến hành giải trên hệ lưới sai phân hữu hạn.

Theo phương ngang, Delft3D sử dụng hệ lưới tính cong trục giao. Hai hệ tọa được sử dụng đó là:

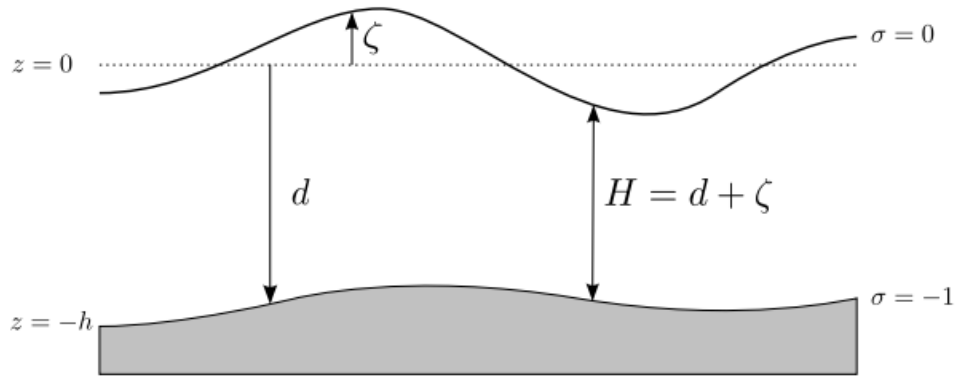
- Hệ tọa độ đề các (ξ ; η);
- Hệ tọa độ cầu (λ ; ϕ).

Hệ tọa độ cầu được coi như một dạng đặc biệt của hệ tọa độ cong trục giao với:

$$\begin{aligned} \xi &= \lambda \\ \eta &= \phi \\ \sqrt{G_{\xi\xi}} &= R \cos \phi \\ \sqrt{G_{\eta\eta}} &= R \cos \phi \end{aligned} \quad (\text{PL2.1})$$

Trong đó, λ là kinh độ, ϕ là vĩ độ và R là bán kính trái đất.

Theo phương thẳng đứng, mô hình thủy lực sử dụng hai hệ tọa độ: hệ tọa độ σ và hệ tọa độ Z . trong nghiên cứu này chỉ xét tới hệ tọa độ σ .



Hình PL2.1. Các định nghĩa về mực nước (ζ), độ sâu (h) và độ sâu nước tổng cộng (H)

Hệ tọa độ σ được định nghĩa như sau:

$$\sigma = \frac{z-\zeta}{d+\zeta} = \frac{z-\zeta}{H} \quad (\text{PL2.2})$$

Trong đó:

z - chiều thẳng đứng;

ζ - độ cao mặt nước so với mực tĩnh ($z=0$);

d - độ sâu nước tại mực tĩnh;

H - độ sâu nước tổng cộng $H = d + \zeta$.

• *Phương trình liên tục:*

Phương trình liên tục trung bình theo độ sâu được rút ra bằng cách tích phân phương trình liên tục của chất lỏng không nén được trên toàn bộ độ sâu nước, có tính đến các điều kiện biên động học ở trên bề mặt và dưới đáy. Phương trình được viết dưới dạng:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left((d+\zeta) U \sqrt{G_{\eta\eta}} \right)}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left((d+\zeta) V \sqrt{G_{\xi\xi}} \right)}{\partial \eta} = (d+\zeta) Q \quad (\text{PL2.3})$$

Với U và V là vận tốc trung bình theo độ sâu;

d - độ sâu nước;

ζ - độ dâng nước;

Q - nguồn cung hoặc tiêu tán;

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ - hệ số chuyển đổi hệ lưới cong trục giao về lưới chữ nhật;

$\sqrt{G_{\eta\eta}}$ - hệ số chuyển đổi hệ lưới cong trục giao về lưới chữ nhật.

$$U = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta u \, dz = \int_{-1}^0 u \, d\sigma \quad (\text{PL2.4})$$

$$V = \frac{1}{d+\zeta} \int_d^\zeta v \, dz = \int_{-1}^0 v \, d\sigma \quad (\text{PL2.5})$$

Và Q là thành phần nguồn đóng góp trên một đơn vị diện tích phụ thuộc vào lưu lượng sông, trao đổi nước trên biên, mưa hoặc bốc hơi:

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out}) \, d + P - E \quad (\text{PL2.6})$$

Trong đó q_{in} và q_{out} tương ứng là nguồn cấp vào và ra. P là lượng giáng thủy và E là lượng bốc hơi. Trong nghiên cứu này lượng giáng thủy và bốc hơi không được xét đến.

- *Phương trình động lượng theo phương ngang:*

Phương trình động lượng theo phương ξ và η được viết như sau:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f v = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (\text{PL2.7})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{w}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + f u = \\ - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (\text{PL2.8})$$

Các thành phần hệ số nhót xoáy v_V được viết trong phương trình. P_ξ và P_η tương ứng là sự chênh lệch áp suất theo phương ngang. Các lực F_ξ và F_η là sự mất cân bằng của ứng suất Reynold theo phương ngang. M_ξ and M_η là các thành phần ngoại lực bên ngoài do nguồn cấp vào hoặc thoát ra.

- *Thành phần vận tốc theo phương thẳng đứng:*

Thành phần vận tốc theo phương thẳng đứng ω trong hệ tọa độ σ , được rút ra từ phương trình liên tục.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d+\zeta)u\sqrt{G_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial ((d+\zeta)v\sqrt{G_{\xi\xi}})}{\partial \eta} + \frac{\partial w}{\partial \sigma} = (d+\zeta)(q_{in} - q_{out}) \quad (\text{PL2.9})$$

Tại bề mặt, các thành phần giáng thủy và bốc hơi không xét đến trong nghiên cứu này. Vận tốc thẳng đứng có thể biểu diễn qua mối liên hệ với vận tốc theo phương ngang, độ sâu nước và độ cao mặt nước, w được tính như sau:

$$w = w + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[u\sqrt{G_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v\sqrt{G_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \quad (\text{PL2.10})$$

- *Áp suất thủy tĩnh:*

Với giả thiết trong vùng nước nông, Phương trình động lượng được rút gọn thành phương trình thủy tĩnh. Gia tốc theo phương thẳng đứng do lực nổi và sự thay đổi đột ngột của địa hình không được xét đến.

$$\frac{\partial P}{\partial \sigma} = -g\rho H \quad (\text{PL2.11})$$

Tích phân, thành phần áp suất thu được là:

$$P = P_{atm} + gH \int_{\sigma}^0 \rho(\xi, \eta, \sigma', t) d\sigma' \quad (\text{PL2.12})$$

Đối với khối nước có mật độ đồng nhất, thành phần chênh lệch áp suất là:

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \xi} \quad (\text{PL2.13})$$

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \quad (\text{PL2.14})$$

Đối với khối nước có mật độ không đồng nhất, mật độ là hàm của nhiệt độ và độ mặn.

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} P_{\xi} = \frac{g}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + g \frac{d+\zeta}{\rho_0\sqrt{G_{\xi\xi}}} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \xi} + \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) d\sigma' \quad (\text{PL2.15})$$

$$\frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} P_{\eta} = \frac{g}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + g \frac{1}{\rho_0\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial P_{atm}}{\partial \eta} \int_{\sigma}^0 \left(\frac{\partial \rho}{\partial \eta} + \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) d\sigma' \quad (\text{PL2.16})$$

- *Lực Coriolis:*

Hằng số Coriolis f phụ thuộc vào vị trí vĩ độ và gia tốc góc của trái đất Ω . Lực Coriolis được tính như sau:

$$f = 2\Omega \sin \phi \quad (\text{PL2.17})$$

Trong đó Ω là gia tốc góc, ϕ là vĩ độ.

- *Ứng suất Reynold:*

Các lực F_{ξ} và F_{η} trong phương trình động lượng gây ra do sự mất cân bằng theo phương ngang của ứng suất Reynold. Ứng suất Reynold được mô hình hóa bằng cách sử dụng khái niệm độ nhớt xoáy. Khái niệm này biểu thị ứng suất Reynold là kết quả giữa dòng chảy đại diện là hệ số nhớt xoáy và các thành phần ứng lực.

Đối với thủy lực trong vùng nước nông ba chiều, các tensor ứng suất là đẳng hướng. Hệ số nhớt rối ngang v_H lớn hơn rất nhiều so với hệ số nhớt rối thẳng đứng v_V ($v_H \gg v_V$). Hệ số nhớt rối ngang có thể là tổng hợp của ba thành phần:

- Rối đến từ quy mô dưới lưới;
- Rối ba chiều;
- Rối đến từ sự phân tán trong tính toán trung bình theo độ sâu.

Độ nhớt ngang nền, v_H^{back} , được người sử dụng cho trước, khi đó hệ số nhớt rối ngang sẽ được tính là:

$$v_H = v_{SGS} + v_V + v_H^{back} \quad (PL2.18)$$

Thành phần nhớt rối ba chiều được tính toán thông qua mô hình khép kín rối. khi đó hệ số nhớt rối thẳng đứng được xác định theo công thức:

$$v_V = v_{mol} + \max(v_{3D}, v_V^{back}) \quad (PL2.19)$$

Với v_{mol} là hệ số nhớt động học của nước, thành phần ba chiều v_{3D} được tính toán từ mô hình khép kín rối.

Các thành phần lực F_ξ và F_η tính theo công thức của Beckers et al., 1998, như sau:

$$F_\xi = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \eta} \quad (PL2.20)$$

$$F_\eta = \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial \tau_{\eta\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \tau_{\eta\eta}}{\partial \eta} \quad (PL2.21)$$

Các thành phần ứng suất trượt $\tau_{\xi\xi}$, $\tau_{\xi\eta}$, $\tau_{\eta\xi}$ và $\tau_{\eta\eta}$ được xác định:

$$\tau_{\xi\xi} = \tau_{\xi\xi} = \frac{2v_H}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \quad (PL2.22)$$

$$\tau_{\xi\eta} = \tau_{\eta\xi} = v_H \left\{ \frac{1}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\partial u}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \xi} \right) \right\} \quad (PL2.23)$$

$$\tau_{\eta\eta} = \frac{2v_H}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \left(\frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\partial v}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \eta} \right) \quad (PL2.24)$$

- *Động lượng được thêm vào hoặc rút ra:*

Khi một lượng nước được thêm vào hoặc rút ra được tính đến, các thành phần này được xem như thành phần thêm vào của vận tốc U và V .

$$M_\xi = q_{in}(\hat{U} - u) \quad (PL2.25)$$

$$M_\eta = q_{in}(\hat{V} - v) \quad (PL2.26)$$

Trong đó $\hat{U}$ và $\hat{V}$ là các thành phần vận tốc thêm vào tương ứng với các hướng ξ và η .