

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Giang Tuấn Linh

ỨNG DỤNG VIỄN THÁM VÀ HỌC MÁY
TRONG NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG ĐƯỜNG BỜ BIỂN
MỘT SỐ KHU VỰC Ở THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG

LUẬN ÁN TIẾN SĨ ĐỊA LÝ

Hà Nội – 2026

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Giang Tuấn Linh

ỨNG DỤNG VIỄN THÁM VÀ HỌC MÁY
TRONG NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG ĐƯỜNG BỜ BIỂN
MỘT SỐ KHU VỰC Ở THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG

CHUYÊN NGÀNH: BẢN ĐỒ, VIỄN THÁM VÀ HỆ THÔNG TIN ĐỊA LÝ
MÃ SỐ: 9440214

LUẬN ÁN TIẾN SĨ ĐỊA LÝ

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC
PGS.TS. Bùi Quang Thành

Hà Nội – 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi, các số liệu, kết quả trong luận án là trung thực và có nguồn gốc rõ ràng, đã được công bố theo đúng quy định. Kết quả nghiên cứu của luận án chưa từng được công bố trong bất kỳ một nghiên cứu nào khác.

Tác giả luận án

Giang Tuấn Linh

LỜI CẢM ƠN

Luận án được hoàn thành tại Khoa Địa lý, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS.TS. Bùi Quang Thành. Lời đầu tiên, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc nhất tới thầy PGS.TS. Bùi Quang Thành, người đã tận tình hướng dẫn, định hướng và đóng góp nhiều ý tưởng quan trọng cho luận án.

Tác giả xin trân trọng cảm ơn Ban lãnh đạo Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Phòng Đào tạo, Ban lãnh đạo Khoa Địa lý, Lãnh đạo Bộ môn Bản đồ và Địa thông tin đã giúp đỡ và tạo điều kiện thuận lợi cho tác giả trong quá trình học tập và thực hiện luận án.

Tác giả xin trân trọng cảm ơn những ý kiến đóng góp hết sức quý báu về chuyên môn của các thầy cô trong bộ môn Bộ môn Bản đồ và Địa thông tin cùng các thầy cô trong khoa Địa lý, trường Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQGHN trong quá trình thực hiện luận án.

Tác giả cũng nhận được sự quan tâm, đóng góp ý kiến của nhiều thầy cô, nhà khoa học và bạn bè đồng nghiệp thuộc Viện Việt Nam học và Khoa học phát triển – nơi NCS đang công tác; của nhiều thầy cô, nhà khoa học và bạn bè đồng nghiệp ở các cơ quan khác nhau; của cán bộ và người dân ven biển Thành phố Đà Nẵng (nay là thành phố Đà Nẵng) trong quá trình khảo sát, thu thập tài liệu. Tác giả xin chân thành cảm ơn sự giúp đỡ quý báu này.

Tác giả được nhận tài trợ bởi Chương trình học bổng đào tạo thạc sĩ, tiến sĩ trong nước của Quỹ Đồi mới sáng tạo Vingroup (VINIF), mã số VINIF.TS.2023.58 và mã số VINIF.TS.2024.112. Tác giả trân trọng cảm ơn Quỹ VINIF đã đồng hành và hỗ trợ cho nghiên cứu này. Tác giả xin cảm ơn các đề tài nghiên cứu khoa học đã tạo điều kiện cho tác giả được sử dụng các nguồn tài liệu, dữ liệu liên quan đến luận án và tham gia khảo sát thực địa: đề tài cấp Đại học quốc gia “*Phát triển mô hình học máy trong đánh giá tính dễ bị tổn thương do sạt lở bờ biển khu vực Quảng Nam- Đà Nẵng*” mã số QG.24.56 do NCS làm chủ trì; đề tài cấp ĐHQGHN “*Phát triển mô hình học máy sâu trong giám sát biến động bờ biển Trung Bộ*”, mã số QG.21.17, chủ nhiệm đề tài PGS.TS. Đặng Kinh Bắc; đề tài cấp quốc gia “*Nghiên cứu xây dựng mô hình và giải pháp lồng ghép hành lang bảo vệ bờ biển trong quản lý tổng hợp vùng bờ biển ở Việt Nam*”, mã số KC.09.02/21-30, chủ nhiệm đề tài PGS.TS. Đặng Kinh Bắc; Đề tài cấp ĐHQGHN “*Nghiên cứu ứng dụng mô hình Bayesian Belief Network (BBN) đánh giá tổng hợp điều kiện và nguồn lực phục vụ thu hút đầu tư phát triển du lịch địa sinh thái dải ven biển Đà Nẵng - Quảng Ngãi*”, mã số QG.25.145, chủ nhiệm đề tài ThS. Phạm Thị Phương Nga.

Trong suốt thời gian thực hiện luận án, tác giả đã nhận được rất nhiều sự hỗ trợ và động viên tinh thần to lớn từ tất cả thầy cô, anh chị em đồng nghiệp, gia đình, bạn bè. Tác giả xin được bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc.

Mặc dù đã có nhiều cố gắng song luận án không thể tránh khỏi những hạn chế và thiếu sót. Kính mong quý thầy cô, đồng nghiệp và bạn bè tiếp tục góp ý để công trình nghiên cứu ngày càng hoàn thiện hơn và phục vụ cho các hướng nghiên cứu tiếp theo của tác giả.

Một lần nữa tác giả xin trân trọng cảm ơn!

Tác giả luận án
NCS. Giang Tuấn Linh

MỤC LỤC

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT	5
DANH MỤC BẢNG.....	6
DANH MỤC HÌNH ẢNH.....	7
MỞ ĐẦU	11
1. Tính cấp thiết vấn đề	11
2. Mục tiêu nghiên cứu.....	13
3. Phạm vi nghiên cứu.....	13
4. Những điểm mới của luận án.....	13
5. Luận điểm bảo vệ.....	14
6. Dữ liệu sử dụng.....	14
7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn	15
8. Cấu trúc của luận án.....	15
CHƯƠNG 1: CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ CÁCH TIẾP CẬN NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG ĐƯỜNG BỜ BIỂN ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ VIỄN THÁM VÀ HỌC MÁY	16
1.1. Một số khái niệm.....	16
1.1.1. Đường bờ biển	16
1.1.2 Biến động bờ biển	18
1.2. Tổng quan các công trình nghiên cứu	19
1.2.1 Các nghiên cứu biến động bờ biển trên thế giới và trong nước	19
1.2.2 Ứng dụng viễn thám trong nghiên cứu đường bờ biển trên thế giới và trong nước	23
1.2.3 Ứng dụng học máy trong nghiên cứu đường bờ biển trên thế giới và trong nước	26
1.2.4 Tổng quan nghiên cứu biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng.....	31
1.2.5. Khoảng trống nghiên cứu	33
1.3. Cơ sở lý luận về viễn thám và học máy trong nghiên cứu đường bờ	34
1.3.1. Bộ chỉ thị đường bờ trong đánh giá biến động bờ biển	34
1.3.2. Vai trò của viễn thám trong nghiên cứu biến động đường bờ	40
1.3.3 Các yếu tố ảnh hưởng đến việc xác định đường bờ trên ảnh viễn thám	46
1.3.4. Khả năng ứng dụng ảnh viễn thám độ phân giải cao (UAV và ảnh từ nguồn GE) và mô hình học máy trong nghiên cứu, giám sát biến động đường bờ.....	49
1.4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu.....	53

1.4.1. Cách tiếp cận nghiên cứu	53
1.4.2. Phương pháp nghiên cứu.....	55
1.5. Khung nghiên cứu tổng thể của luận án	58
Tiểu kết Chương 1	60
CHƯƠNG 2: ĐIỀU KIỆN TỰ NHIÊN, KINH TẾ - XÃ HỘI VÀ THỰC TRẠNG BIẾN ĐỘNG BỜ BIỂN THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG	61
2.1. Khái quát vùng ven biển thành phố Đà Nẵng.....	61
2.1.1 Vị trí địa lý.....	61
2.1.2. Đặc điểm địa lý tự nhiên	62
2.1.3. Đặc điểm dân cư, kinh tế - xã hội và sử dụng đất.....	69
2.1.4. Phân hóa kiểu bờ và vùng bờ khu vực nghiên cứu.....	77
2.2. Thực trạng xói lở - bồi tụ bờ biển và cửa sông.....	80
2.2.1. Thực trạng xói lở – bồi tụ bờ biển	80
2.2.2. Thực trạng xói lở – bồi tụ vùng cửa sông.....	83
2.2.3. Tác động của xói lở – bồi tụ và các giải pháp công trình đã triển khai	84
2.3. Các khu vực nghiên cứu trọng điểm	86
2.3.1. Cơ sở lựa chọn các khu vực nghiên cứu trọng điểm.....	86
2.3.2. Khu vực nghiên cứu trọng điểm: Vịnh Đà Nẵng.....	86
2.3.3. Khu vực nghiên cứu trọng điểm Cửa Đại (Hội An).....	92
2.3.4. Khu vực nghiên cứu 3: Vùng ven biển Núi Thành.....	96
Tiểu kết Chương 2	98
CHƯƠNG 3: DỮ LIỆU VÀ QUY TRÌNH ỨNG DỤNG VIỄN THÁM – HỌC MÁY TRONG NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG ĐƯỜNG BỜ BIỂN THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG	99
3.1. Cơ sở dữ liệu phục vụ nghiên cứu biến động đường bờ	99
3.1.1. Dữ liệu ảnh viễn thám đa thời gian, đa độ phân giải	99
3.1.2. Dữ liệu nền GIS và dữ liệu thực địa	101
3.1.3. Xử lý, chuẩn hóa và tích hợp dữ liệu	102
3.2. Quy trình đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng.....	103
3.2.1. Quy trình tổng thể đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng. 103	
3.2.2. Quy trình thu thập, xử lý và tổ chức dữ liệu viễn thám phục vụ nhận dạng đường bờ.....	104
3.2.3. Ứng dụng mô hình học máy trong nhận dạng đường bờ và giám sát biến động bờ biển	110

3.2.4. Tích hợp GIS và mô hình DSAS trong đánh giá biến động đường bờ	117
3.3. Bộ chỉ thị phục vụ nhận dạng đường bờ trong và đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng.....	119
3.3.1. Khái quát bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong	119
3.3.2. Bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong theo các kiểu bờ tại thành phố Đà Nẵng	123
Tiểu kết Chương 3.....	133
CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ ỨNG DỤNG HỌC MÁY TRONG NHẬN DẠNG VÀ ĐÁNH GIÁ BIẾN ĐỘNG ĐƯỜNG BỜ PHỤC VỤ QUẢN LÝ BỜ BIỂN THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG.....	134
4.1. Lựa chọn mô hình học máy phục vụ nhận dạng đường bờ trong thành phố Đà Nẵng.....	134
4.1.1. So sánh hiệu suất huấn luyện mô hình học máy theo kiến trúc mạng thần kinh nơ-ron	134
4.1.2. So sánh hiệu suất huấn luyện mô hình học máy nơ-ron và mô hình truyền thống.....	136
4.1.3. Lựa chọn mô hình học máy tối ưu cho nhận dạng đường bờ trong...	138
4.2 Xác định đường bờ và phân tích biến động bờ biển các khu vực trọng điểm	142
4.2.1. Đánh giá biến động bờ biển khu vực Vịnh Đà Nẵng.....	142
4.2.2. Đánh giá biến động khu vực Cửa Đại.....	152
4.2.3. Đánh giá biến động khu vực Núi Thành	162
4.2.4. Xu thế biến động đường bờ và so sánh giữa các khu vực nghiên cứu...	172
4.3 Khả năng ứng dụng kết quả nghiên cứu trong giám sát biến động đường bờ và quản lý bờ biển.....	174
4.3.1. Khả năng tái lập và triển khai phương pháp trong nghiên cứu biến động bờ biển.....	174
4.3.2. Ứng dụng kết quả nghiên cứu trong giám sát biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng.....	175
4.3.3. Ứng dụng trong quản lý vùng bờ và hành lang bảo vệ bờ biển	176
Tiểu kết Chương 4	177
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	178
DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN.....	180
TÀI LIỆU THAM KHẢO	181
PHỤ LỤC.....	a

Phụ lục 1: Danh sách 70 tài liệu thống kê việc ứng dụng viễn thám và học máy trong nghiên cứu biến động bờ biển	a
Phụ lục 2. Bảng tổng hợp các chỉ thị xác định đường bờ [170]	h
Phụ lục 3. Bộ chỉ thị đường bờ phục vụ đánh giá biến động bờ biển Trung Bộ Việt Nam.....	l
Phụ lục 4. Bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ thành phố Đà Nẵng ứng dụng viễn thám độ phân giải cao và mô hình học máy	s
Phụ lục 5: Thông tin các loại ảnh được sử dụng trong luận án	y

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

ANN: Mạng Nơ-ron Nhân tạo

CNN: Mạng tích chập

DT: Cây quyết định

KNN: K-láng giềng gần nhất

SVM: Máy vector hỗ trợ

MNDWI: chỉ số khác biệt nước đã được hiệu chỉnh

NDWI: Chỉ số khác biệt nước. Normalized Difference Water Index

AWEI: Chỉ số chiết xuất nước tự động. Automated Water Extracted Index

NDVI: Chỉ số khác biệt thực vật. Normalized Difference Vegetation Index

NDTI: Chỉ số khác biệt đất cày/xới. Normalized Difference Tillage Index

NDMI: Chỉ số khác biệt độ ẩm. Normalized Difference Moisture Index

DEM: Mô hình số độ cao

GE: Google Earth

GEP: Google Earth Pro

RF: Rừng ngẫu nhiên

UAV: Máy bay không người lái

CONV: Tích chập

SfM: Cấu trúc từ Chuyển động

EPR: Tỷ lệ giữa điểm đầu đến điểm cuối

LRR: Hồi quy tuyến tính

WLR: Hồi quy tuyến tính có trọng số

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Các ảnh viễn thám độ phân giải cao/trung trong xác định đường bờ ..	43
Bảng 2.1. Bảng mô tả các loại hình cảnh quan và ví dụ minh họa trên ảnh thu thập từ GE.....	73
Bảng 3.1. Tổng hợp dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu biến động đường bờ biển thành phố Đà Nẵng.....	100
Bảng 4.1. Hiệu suất của tám mô hình đã được huấn luyện sử dụng bốn kiến trúc nơ-ron với hai kích thước đầu vào	134
Bảng 4.2. Giá trị chính xác của hai mô hình nơ-ron dựa trên pixel được đào tạo	137
Bảng 4.3. Giá trị chính xác của bốn mô hình nơ-ron dựa trên đối tượng được đào tạo	137
Bảng 4.4. Bảng thống kê một số thông số cơ bản theo các phương pháp khác nhau giai đoạn 2002-2023	145
Bảng 4.5. Bảng thống kê một số thông số cơ bản theo các phương pháp khác nhau, giai đoạn 2004-2024.....	155
Bảng 4.6. Bảng thống kê một số thông số cơ bản theo các phương pháp khác nhau, giai đoạn 2002-2023.....	164
Bảng 4.7. Tổng hợp các chỉ số biến động đường bờ theo phương pháp WLR tại các khu vực nghiên cứu trọng điểm	173

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1. Mặt cắt ngang vùng bờ biển mở [48].....	17
Hình 1.2. Thống kê dữ liệu viễn thám được sử dụng trong 70 tài liệu được thu thập trong nước và quốc tế về giải đoán đường bờ/bờ biển và giám sát biến động đường bờ biển.	25
Hình 1.3. Sơ đồ trình bày các ảnh viễn thám được sử dụng trong 70 tài liệu tham khảo thu thập trong nước và quốc tế từ năm 2015 đến 2024 về giải đoán đường bờ/bờ biển và giám sát biến động đường bờ biển.....	25
Hình 1.4. Sơ đồ tổng hợp các kỹ thuật học máy được sử dụng trong 70 tài liệu tham khảo trên thế giới và Việt Nam từ năm 2015 đến 2022 về giải đoán đường bờ/bờ biển và giám sát biến động đường bờ biển.....	30
Hình 1.5. Ảnh hưởng của sóng báo lên chỉ thị đường bờ trong và ngoài (Nguồn: Giang Tuấn Linh)	40
Hình 1.6. Dữ liệu trong nghiên cứu biến động đường bờ [180].....	41
Hình 1.7. Phản xạ ánh sáng ở khu vực bờ biển cát khô tới khu vực cát ẩm [122]	45
Hình 1.8. Sơ đồ khung nghiên cứu tổng thể của luận án.....	59
Hình 2.1. Khu vực vùng ven biển thành phố Đà Nẵng	62
Hình 2.2. Bản đồ địa mạo dải ven biển thành phố Đà Nẵng (Nguồn: Cát Nguyễn Hùng và cộng sự, 1995 [14])	65
Hình 2.3. Vách và nền mài mòn trên đá biến chất hệ tầng Khâm Đức tại Kỳ Hà, Thành phố Đà Nẵng (ảnh trái) và trên đá trầm tích hệ tầng Tân Lâm tại Nam Ô (ảnh phải) (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 6/2023).....	77
Hình 2.4. Kiểu bờ biển tích tụ - xói lở bờ cát thấp ở nam Cửa Đại (Nguồn: Giang Tuấn Linh 6/2023).....	78
Hình 2.5. Xói lở bờ biển khu du lịch Melia Đà Nẵng do bão tháng 12.2017 (Nguồn: Đặng Văn Bào, 12/2017)	81
Hình 2.6. Các ảnh vệ tinh thể hiện bờ biển đang chịu tác động mạnh của sóng vào mùa mưa.....	82
Hình 2.7. Dấu vết xói lở bờ biển cắt vào đụn cát cao, hiện đã được xây kè bảo vệ tại Tam Thanh, Tam Kỳ (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 6/2023)	83
Hình 2.8. Lấn biển xây dựng khu đô thị - du lịch Nam Ô tại khu vực cửa sông Cu Đê (ảnh chụp từ UAV - Giang Tuấn Linh, 6/2023)	89
Hình 2.9. Xói lở bờ vịnh Đà Nẵng tại khu vực nhà máy xi măng Quân khu 5 (cũ) năm 1999 (ảnh trái) và tại khu vực nhà máy xi măng Hải Vân năm 2000 (ảnh phải) (Nguồn: Đặng Văn Bào, 1999-2000)	90
Hình 2.10. Dấu vết các đường bờ do xói lở năm 2009, 2017 – 2020 tại bắc Nam Ô (Nguồn Đặng Văn Bào, 2020).	90
Hình 2.11. Xói lở bờ tây vịnh Đà Nẵng đang đe dọa tuyến đường ven biển Nguyễn Tất Thành (Nguồn: Đặng Văn Bào).....	91
Hình 2.12. Xói lở bờ biển năm 2019 tác động tới đụn cát cao (ảnh trên), gây hư hại một số công trình dân sinh ven biển bắc bãi tắm Xuân Thiều (Nguồn: Đặng Văn Bào, 2019)	91

Hình 2.13. Xói lở bờ biển tại khu vực nhà hàng Sen Hội An (ảnh Đặng Văn Bào, 2022) và khu vực phía nam bãi tắm An Bàng (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 7/2025)	94
Hình 2.14. Khu khách sạn trên đường Âu Cơ -, Hội An trong bão Damrey (Nguồn: Ngô Văn Liêm, 11/2017)	94
Hình 2.15. Tường/kè phía ngoài khu du lịch Palm Garden Resort Hoi An làm mất bãi biển, nguy cơ xói lở lan truyền khu vực kế cận (ảnh Đặng Văn Bào, 6/2023)	95
Hình 2.16. Sơ đồ biến động hình thái đảo cát cửa sông Thu Bồn từ năm 2018 đến 2025 trên nền ảnh vệ tinh từ Google Earth ngày 13.3.2025	96
Hình 3.1. Quy trình tổng thể đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng dựa trên dữ liệu viễn thám, GIS và học máy	104
Hình 3.2. Quy trình thu thập, xử lý và tổ chức dữ liệu viễn thám phục vụ nhận dạng đường bờ	105
Hình 3.3. Một ví dụ về hình ảnh UAV được thu thập tại bờ biển Núi Thành, Đà Nẵng vào tháng 6 năm 2023 (Nguồn: Giang Tuấn Linh)	105
Hình 3.4. Quá trình lập dải bay và thu thập ảnh UAV bằng thiết bị DJI Mini 3 tại khu vực nghiên cứu	106
Hình 3.5. Phân bố các địa điểm lấy mẫu ảnh vệ tinh độ phân giải cao và ảnh UAV	109
Hình 3.6. Mô hình SVM	110
Hình 3.7. Mô hình Random Forest	111
Hình 3.8. Kiến trúc của các mô hình U-Net (i) và U-Net3+ (ii) được sử dụng để huấn luyện các mô hình ML để phát hiện đường bờ biển trong và ngoài	112
Hình 3.9. Kiến trúc của các mô hình U ² Net	113
Hình 3.10. Kiến trúc của các mô hình DexiNet	114
Hình 3.11. Mô tả các mức độ đánh giá IoU	114
Hình 3.12. Mô tả các khái niệm phục vụ cho tính toán đánh giá	115
Hình 3.13. Một số chỉ thị cho các kiểu bờ khác nhau tại thành phố Đà Nẵng	122
Hình 3.14. Đường bờ trong và ngoài tại Hội An Đông (Nguồn: Đặng Văn Bào, 6/2023)	125
Hình 3.15. Xác định đường bờ trong (màu xanh) trên Google Earth và thực tế tại bờ cát (tháng 04/2022)	125
Hình 3.16. Phổ phản xạ ở các kênh ảnh và chỉ số của các đối tượng lớp phủ trên ảnh Sentinel 2 (tháng 6-7/2023)	125
Hình 3.17. Xác định đường bờ trong (màu xanh) trên Google Earth và thực tế tại khu vực bờ vũng vịnh (tháng 04/2022)	126
Hình 3.18. Bờ biển bồi tụ phía nam Cửa Đại trên Google Earth (ảnh trên) và hình thái bờ cát thấp với đường bờ trong - đường bờ ngoài trong tại Duy Nghĩa (ảnh Giang Tuấn Linh)	127
Hình 3.19. Xác định đường bờ trong (màu đỏ) trên ảnh UAV và thực tế tại khu vực bờ cửa sông (tháng 04/2022)	129

Hình 3.20. Xác định đường bờ trong (màu xanh) trên Google Earth và thực tế tại bờ đá (tháng 04/2022).....	129
Hình 3.21. Xác định đường bờ trong (màu đỏ) trên ảnh UAV và thực tế bờ đá tại mũi Nam Ô (tháng 04/2022).....	131
Hình 3.22. Xác định đường bờ trong (màu xanh) trên Google Earth và thực tế tại bờ kè (tháng 04/2022).....	132
Hình 4.1. Độ chính xác và giá trị hàm mất mát trong quá trình huấn luyện của bốn mô hình nơ-ron tốt nhất để trích xuất đường bờ trong.....	135
Hình 4.2. Sơ đồ sự biến động về độ chính xác và hàm mất mát trong thời gian huấn luyện của 2 mô hình U-Net và U-Net3+ với kích thước đầu vào là 256	139
Hình 4.3. Bốn vùng giữa đường bờ biển trong và đường bờ biển ngoài được diễn giải dựa trên tám mô hình nơ-ron.....	139
Hình 4.4. Bốn vùng giữa đường bờ biển trong và đường bờ biển ngoài được diễn giải dựa trên sáu mô hình.....	140
Hình 4.5. Kết quả giải đoán từ dữ liệu từ nguồn Google Earth Pro tại một số đoạn bờ tại Đà Nẵng của mô hình U-Net với kích thước ảnh đầu vào 256x256.....	141
Hình 4.6. Biểu đồ phân bố khoảng cách sai lệch giữa các điểm kiểm chứng và đường bờ chiết xuất từ mô hình. (RMSE:2.5m).....	142
Hình 4.7. Một số kết quả giải đoán bờ biển (màu xanh) và đất liền (màu đỏ) ở một số khu vực vịnh Đà Nẵng: 1) khu vực có bờ kè; 2) vùng cửa sông Cu Đê; 3) khu vực bờ đá; 4) khu vực bờ cát.....	143
Hình 4.8. Đường bờ trong khu vực Vịnh Đà Nẵng được chiết tách từ năm 2002-2023 để đưa vào mô hình DSAS	144
Hình 4.9. Biểu đồ biến động đường bờ trong theo phương pháp LRR (đơn vị: m/năm)	146
Hình 4.10. Biểu đồ đánh giá sai số của phương pháp LRR (đơn vị:m).....	146
Hình 4.11. Biểu đồ biến động đường bờ trong theo phương pháp WLR (đơn vị:m/năm).....	147
Hình 4.12. Biểu đồ đánh giá sai số của phương pháp WLR (đơn vị:m).....	147
Hình 4.13. Bản đồ biến động đường bờ trong khu vực Vịnh Đà Nẵng từ năm 2002 đến 2023.....	149
Hình 4.14. Ảnh số đo khoảng cách từ đường dân sinh đến đường bờ trong tại khu vực phía Nam chân đèo Hải Vân qua các giai đoạn trước khi xây kè và sau khi xây kè. 150	
Hình 4.15. Bờ cát cửa sông Cu Đê (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 06/2023).....	150
Hình 4.16. Sinh kế người dân ven biển tại vùng cửa sông Cu Đê (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 04/2022).....	151
Hình 4.17. Dự án khu đô thị quốc tế Đa Phước (Nguồn: https://vnexpress.net) 152	
Hình 4.18. Một số kết quả giải đoán bờ biển (màu xanh) và đất liền (màu đỏ) ở một số khu vực Cửa Đại: 1) khu vực bờ biển có khu du lịch phát triển; 2) khu vực cửa sông; 4) khu vực bờ cát.	153
Hình 4.19. Đường bờ trong khu vực Cửa Đại, Đà Nẵng được chiết tách từ năm 2004 đến 2024 để đưa vào mô hình DSAS	154

Hình 4.20. Xu thế biến động đường bờ giai đoạn 2004 - 2024 khu vực Cửa Đại theo phương pháp LRR (đơn vị: m/năm)	155
Hình 4.21. Biểu đồ phân bố sai số tính toán theo phương pháp LRR (sai số là LSE) cho giai đoạn 2004-2024 (đơn vị: m).....	156
Hình 4.22. Xu thế biến động đường bờ giai đoạn 2004 - 2024 khu vực Cửa Đại theo phương pháp WLR (đơn vị m/năm).	156
Hình 4.23. Biểu đồ phân bố sai số tính toán theo phương pháp WLR (sai số là WSE) cho giai đoạn 2004 – 2024 (đơn vị m).....	157
Hình 4.24. Bản đồ biến động đường bờ trong khu vực Cửa Đại từ năm 2004 đến 2024	159
Hình 4.25. Bờ biển trước đường Âu Cơ, phường Cửa Đại thay đổi từ 2016 đến 2022 sau khi được gia cố kè bằng các bao cát (Nguồn: Đặng Kinh Bắc).....	160
Hình 4.26. Bãi biển Cửa Đại thay đổi từ 2019 đến 2022 sau khi được gia cố kè song song với bờ và đò cát lấn biển (Nguồn: Đặng Kinh Bắc, 2022)	161
Hình 4.27. Thực trạng lấn biển tại khu vực Cửa Đại, Đà Nẵng (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 6/2023).....	161
Hình 4.28. Thực trạng xói lở ở khu vực bờ biển Cẩm An. (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 2025).....	162
Hình 4.29. Một số kết quả giải đoán bờ biển (màu xanh) và đất liền (màu đỏ) ở một số khu vực Núi Thành: 1) khu vực bờ cát có nuôi trồng thủy hải sản; 2) khu vực Cửa Lở; 3) khu vực bờ đá Tam Hải.	163
Hình 4.30. Đường bờ trong (đường line màu) khu vực Núi Thành, Đà Nẵng được chiết tách từ năm 2002 đến 2023 để đưa vào mô hình DSAS.....	163
Hình 4.31. Xu thế biến động đường bờ giai đoạn 2002 - 2023 khu vực Núi Thành theo phương pháp LRR (đơn vị: m/năm).	165
Hình 4.32. Biểu đồ phân bố sai số tính toán theo phương pháp LRR (sai số là LSE) cho giai đoạn 2002 – 2023 (đơn vị: m).	165
Hình 4.33. Xu thế biến động đường bờ giai đoạn 2002 - 2023 khu vực Núi Thành theo phương pháp WLR (đơn vị m/năm)	166
Hình 4.34. Biểu đồ phân bố sai số tính toán theo phương pháp WLR (sai số là WSE) cho giai đoạn 2002 – 2023 (đơn vị: m).....	166
Hình 4.35. Bản đồ biến động đường bờ trong khu vực Núi Thành từ 2002 đến 2023.	168
Hình 4.36. Thực trạng xói lở/bồi tụ tại khu vực cửa Lở và gành đá Bàn Than (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 6/2023).....	169
Hình 4.37. Biến động cửa sông Trường Giang giai đoạn 2011 – 2024 qua ảnh Worldview-2 từ nguồn dữ liệu Google Earth Pro	170
Hình 4.38. Xói lở hơn 10m bờ biển phía đông mũi Bàn Than từ 2017 đến 2023 đo từ nguồn dữ liệu Google Earth.....	171
Hình 4.39. San lấp, cải tạo bờ biển quanh mũi Kỳ Hà từ 2014 đến 2023 từ nguồn dữ liệu Google Earth	172

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết vấn đề

Đường bờ biển không phải là một ranh giới tĩnh cố định mà luôn biến đổi theo không gian và thời gian dưới tác động tổng hợp của các quá trình tự nhiên, biến đổi khí hậu và hoạt động phát triển ven biển. Trên phạm vi toàn cầu, xói lở bờ biển đang gia tăng cả về cường độ và phạm vi, đồng thời sự gia tăng các hiện tượng thời tiết cực đoan và áp lực sử dụng đất ven biển cũng ngày càng lớn. Những biến động này gây ra hệ quả nghiêm trọng về kinh tế, xã hội và môi trường, làm gia tăng rủi ro thiên tai, suy giảm quỹ đất ven biển ổn định và đe dọa sinh kế của cộng đồng dân cư vùng bờ.

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu đánh giá biến động đường bờ biển có ý nghĩa đặc biệt quan trọng cả về khoa học và thực tiễn. Đường bờ phản ánh trạng thái động của hệ thống bờ thông qua sự tương tác giữa các quá trình xói lở và bồi tụ. Việc xác định chính xác xu thế dịch chuyển của đường bờ cho phép làm rõ mức độ mất cân bằng của hệ thống bờ, từ đó cung cấp cơ sở khoa học cho đánh giá tổn thương, quy hoạch không gian ven biển và quản lý tổng hợp vùng bờ. Tuy nhiên, trong nhiều nghiên cứu và ứng dụng hiện nay, việc giám sát biến động vẫn chủ yếu dựa trên đường bờ ngoài – ranh giới nước/đất tức thời – vốn chịu ảnh hưởng mạnh của triều, sóng và điều kiện khí tượng ngắn hạn, nên khó phản ánh xu thế biến động ổn định dài hạn. Ngược lại, đường bờ trong – ranh giới phía đất liền ổn định hơn của hệ thống bờ – thường gắn với các yếu tố hình thái và sinh thái bền vững như đụn cát tiền tiêu, thảm thực vật ven biển hoặc các vết tích xói lở – bồi tụ lâu dài. Do ít chịu tác động của dao động ngắn hạn, đường bờ trong có khả năng phản ánh sát hơn bản chất và xu thế thực sự của biến động bờ biển, đặc biệt là quá trình mất đi các khu đất ven biển vốn đã ổn định.

Tại Việt Nam, yêu cầu nghiên cứu và giám sát biến động đường bờ biển ngày càng trở nên cấp thiết trong bối cảnh triển khai Nghị quyết số 36-NQ/TW của Ban Chấp hành Trung ương Đảng về Chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045. Nghị quyết 36 nhấn mạnh phát triển kinh tế biển phải dựa trên nền tảng bảo vệ tài nguyên, môi trường, thích ứng với biến đổi khí hậu và hướng tới kinh tế xanh, kinh tế tuần hoàn. Trong đó, quản lý không gian vùng bờ, kiểm soát xói lở bờ biển và bảo vệ quỹ đất ven biển ổn định được xác định là những nội dung then chốt. Tuy nhiên, trên thực tế, việc thiếu các công cụ giám sát định lượng, có khả năng theo dõi biến động bờ biển một cách

liên tục, khách quan và có thể tích hợp vào hệ thống quản lý đã làm hạn chế hiệu quả triển khai các định hướng này.

Phần lớn các nghiên cứu đánh giá biến động đường bờ ở Việt Nam hiện nay vẫn dựa trên ảnh viễn thám độ phân giải trung bình như Landsat hoặc Sentinel-2, phù hợp cho phân tích ở quy mô lớn nhưng còn hạn chế trong việc nhận diện các chi thị hình thái đặc trưng của đường bờ trong như mép thảm thực vật mỏng, vết tích xói lở nhỏ hay ranh giới sử dụng đất ven biển. Trong khi đó, sự phát triển nhanh của ảnh viễn thám độ phân giải cao (vệ tinh dưới 1 m và UAV), kết hợp với các mô hình học máy mạng nơ-ron, đã mở ra khả năng tiếp cận mới, cho phép nhận dạng chi tiết các đặc trưng hình thái vùng bờ, tự động trích xuất đường bờ và nâng cao độ chính xác trong đánh giá biến động theo thời gian. Hiện nay, các mô hình học máy mạng nơ-ron như U-Net, U-Net3+, U²-Net và DexiNed có khả năng trích xuất đặc trưng không gian đa tỷ lệ và nhận diện chính xác ranh giới đối tượng trong ảnh độ phân giải cao. Các kiến trúc thuộc họ U-Net phù hợp với bài toán phân đoạn nhờ cơ chế kết hợp thông tin ngữ cảnh và chi tiết, trong khi DexiNed đại diện cho hướng tiếp cận phát hiện biên, có ưu thế trong việc xác định ranh giới đường bờ. Sự kết hợp đồng bộ giữa mô hình mạng nơ-ron với mô hình thống kê địa không gian DSAS tạo thành một chuỗi xử lý khép kín nâng cao tối đa độ tin cậy của kết quả biến động bờ biển.

Bờ biển thành phố Đà Nẵng là khu vực có mức độ biến động mạnh và phức tạp, chịu tác động đồng thời của xói lở bờ biển, bồi tụ cửa sông, bão và áp lực phát triển đô thị – du lịch. Đây cũng là địa bàn trọng điểm trong chiến lược phát triển kinh tế biển miền Trung, với định hướng phát triển du lịch biển, cảng biển, đô thị ven biển gắn với yêu cầu bảo vệ môi trường và thích ứng biến đổi khí hậu. Với sự đa dạng về kiểu bờ, kiểu vùng bờ và nguồn dữ liệu viễn thám phong phú, Đà Nẵng là khu vực có tính đại diện cao để nghiên cứu, thử nghiệm và hoàn thiện các phương pháp ứng dụng viễn thám độ phân giải cao và học máy trong giám sát biến động đường bờ.

Vì những lý do trên, việc thực hiện luận án “*Ứng dụng viễn thám và học máy trong nghiên cứu biến động đường bờ biển một số khu vực ở thành phố Đà Nẵng*” không chỉ có ý nghĩa khoa học trong việc hoàn thiện cách tiếp cận nghiên cứu dựa trên đường bờ trong, mà còn trực tiếp đáp ứng yêu cầu thực tiễn của quản lý vùng bờ, góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc triển khai các định hướng phát triển kinh tế biển xanh, bền vững trong bối cảnh biến đổi khí hậu hiện nay.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Xây dựng được bộ chỉ thị xác định đường bờ trên cơ sở ảnh vệ tinh độ phân giải cao và kiểm chứng ngoài thực địa, phù hợp với điều kiện bờ biển thành phố Đà Nẵng;

- Lựa chọn và phát triển mô hình học máy trong giám sát biến động đường bờ từ ảnh viễn thám độ phân giải cao, áp dụng thử nghiệm tại một số khu vực trọng điểm tại thành phố Đà Nẵng;

- Đề xuất quy trình ứng dụng mô hình U-Net trong nhận dạng và đánh giá biến động đường bờ biển phục vụ quản lý vùng bờ.

3. Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi không gian của Luận án bao gồm vùng bờ biển từ thành phố Đà Nẵng đến hết tỉnh Quảng Nam cũ, nay là thuộc thành phố Đà Nẵng. Về tự nhiên, theo chiều dọc, khu vực nghiên cứu được giới hạn từ mũi Hải Vân đến vùng bờ biển Chu Lai; theo chiều ngang, không gian nghiên cứu chính được xác định từ mực triều cao trung bình nhiều năm về phía đất liền tới hết các xã/phường ven biển, có chú ý tới các yếu tố tác động tới biến động bờ biển về phía biển tới 6 hải lý. Ba khu vực trọng điểm thuộc địa bàn thành phố Đà Nẵng gồm: Vịnh Đà Nẵng, vùng ven biển Cửa Đại và ven biển Núi Thành. Ba khu vực này được lựa chọn nhằm phản ánh sự khác biệt rõ nét về địa hình, điều kiện tự nhiên và mức độ tác động nhân sinh. Các khu vực này đều có sự đa dạng về kiểu bờ biển (bờ cát, bờ đầm phá, bờ đá, bờ cửa sông và bờ nhân tạo), phù hợp cho việc đánh giá so sánh.

Phạm vi thời gian nghiên cứu các đối tượng của luận án kéo dài từ năm 2000 đến năm 2024, tương ứng với giai đoạn có dữ liệu ảnh viễn thám độ phân giải cao liên tục.

Giới hạn khoa học của nghiên cứu tập trung vào hai nội dung chính: (1) xác định và phân tích biến động đường bờ trong tại khu vực nghiên cứu; và (2) so sánh hiệu quả giữa phương pháp truyền thống và các mô hình nơ-ron trong việc tự động nhận dạng và giám sát biến động đường bờ theo thời gian.

4. Những điểm mới của luận án

Luận án có những đóng góp mới theo cả phương diện lý luận và ứng dụng trong nghiên cứu biến động đường bờ thành phố Đà Nẵng:

Điểm mới 1. Xây dựng được bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ theo hướng phân nhóm gắn với các kiểu bờ hình thái – vật chất đặc trưng của vùng ven biển miền Trung Việt Nam, trong đó nhấn mạnh vai trò của chỉ thị đường bờ trong và

khả năng chuẩn hóa dữ liệu phục vụ ứng dụng viễn thám độ phân giải cao và mô hình học máy trong nghiên cứu biến động bờ biển.

Điểm mới 2. Luận án đã lựa chọn, điều chỉnh và vận dụng hiệu quả các mô hình học máy sâu dựa trên mạng nơ-ron tích chập (U-Net, U-Net3+, U2Net, DexiNed) trong tự động nhận dạng đường bờ và giám sát biến động từ ảnh viễn thám độ phân giải cao (UAV, Google Earth (GE)), cho thấy ưu thế rõ rệt so với các phương pháp học máy truyền thống trong điều kiện bờ biển thành phố Đà Nẵng.

Điểm mới 3. Trên cơ sở bộ chỉ thị và các mô hình học máy đã áp dụng, luận án làm rõ được đặc điểm, xu thế và sự khác biệt không gian của biến động đường bờ tại khu vực nghiên cứu, đồng thời chỉ ra vai trò của hình thái bờ, tác động nhân sinh và các sự kiện cực đoan trong quá trình biến đổi đường bờ.

5. Luận điểm bảo vệ

Luận điểm 1. Bộ chỉ thị cho xác định đường bờ và biến động bờ biển ứng dụng viễn thám và trí tuệ nhân tạo được đề xuất có tính kế thừa và điều chỉnh phù hợp với đặc trưng của bờ biển Việt Nam, trong đó đường bờ trong là chỉ thị trọng tâm khi đánh giá biến động tại các khu vực nghiên cứu trọng điểm ở vùng bờ Thành phố Đà Nẵng.

Luận điểm 2. Kết hợp dữ liệu viễn thám độ phân giải cao với các mô hình học máy sâu cho phép nhận dạng và đánh giá đặc điểm biến động đường bờ một cách tin cậy, chứng minh hiệu quả và tiềm năng ứng dụng của hướng tiếp cận viễn thám – AI trong giám sát bờ biển thành phố Đà Nẵng.

6. Dữ liệu sử dụng

Các tài liệu, số liệu được NCS thu thập từ các đợt khảo sát thực địa trong quá trình thực hiện luận án và tham gia các đề tài mà NCS là thành viên hoặc chủ trì thực hiện: 1) Đề tài Nafosted: “Đánh giá dịch vụ hệ sinh thái ven biển Việt Nam dưới tác động của quá trình đô thị hóa và biến đổi khí hậu dựa trên việc phát triển mô hình Bayesian Belief Network”, mã số 105.07-2020.04, chủ nhiệm đề tài TS. Đặng Kinh Bắc; 2) Đề tài cấp ĐHQGHN: “Phát triển mô hình học máy sâu trong giám sát biến động bờ biển Trung Bộ”, mã số QG.21.17, chủ nhiệm đề tài TS. Đặng Kinh Bắc; 3) Đề tài cấp quốc gia: “Nghiên cứu xây dựng mô hình và giải pháp lồng ghép hành lang bảo vệ bờ biển trong quản lý tổng hợp vùng bờ biển ở Việt Nam”, mã số KC.09.02/21-30, chủ nhiệm đề tài PGS.TS. Đặng Kinh Bắc; 4) Đề tài cấp Trường Đại học Khoa học Tự nhiên: “Phát triển mô hình học máy trong đánh giá tính dễ bị tổn thương do sạt lở bờ biển khu vực Quảng Nam- Đà Nẵng”, mã số QG.24.56 do NCS chủ nhiệm.

7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Ý nghĩa khoa học: Luận án góp phần hệ thống hóa và làm rõ khái niệm về đường bờ biển, đặc biệt là đường bờ trong trong nghiên cứu biến động bờ biển. Việc xây dựng hệ thống chỉ thị đường trong bờ phù hợp với từng kiểu bờ cụ thể giúp giảm sai số trong đánh giá biến động bờ biển. Bộ chỉ thị này giúp khắc phục những hạn chế tồn tại trong các nghiên cứu trước vốn chủ yếu dựa trên mô tả hình thái, dùng đường bờ ngoài là ranh giới giữa đất và nước tại một thời điểm cụ thể, nằm trong đới biến động hiện tại của bờ biển – thường khó xác định, thay đổi trong ngày, mùa và không phản ánh đúng hiện trạng bờ biển, cho kết quả có độ sát thực và ý nghĩa thực tế không cao.

Luận án cũng đóng góp vào việc ứng dụng công nghệ viễn thám độ phân giải cao và học máy trong phân tích đường bờ, cung cấp cách tiếp cận tiên tiến và chính xác hơn so với các phương pháp truyền thống. Thông qua việc tích hợp giữa các chỉ thị định vị đường bờ và mô hình học máy, luận án không chỉ góp phần bổ sung nền tảng lý luận cho nghiên cứu đường bờ mà còn phát triển một công cụ định lượng và dự báo có tính khả thi cao, phục vụ công tác giám sát, cảnh báo và quản lý vùng bờ một cách chủ động hơn trong bối cảnh biến đổi khí hậu và phát triển ven biển gia tăng.

Ý nghĩa thực tiễn: Nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc giám sát nhanh biến động đường bờ tại Thành phố Đà Nẵng, hỗ trợ các nhà quản lý trong việc đánh giá mức độ tổn thương bờ biển và ra quyết định kịp thời nhằm giảm thiểu tác động của xói lở. Việc ứng dụng mô hình học máy giúp tự động hóa quá trình giải đoán đường bờ, nâng cao hiệu quả giám sát và quy hoạch bờ biển. Đồng thời, kết quả nghiên cứu có thể được mở rộng áp dụng cho các khu vực ven biển khác tại Việt Nam.

8. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận và tài liệu tham khảo, luận án được cấu trúc thành 4 chương, bao gồm:

Chương 1: Cơ sở lý luận và cách tiếp cận nghiên cứu biến động đường bờ biển ứng dụng công nghệ viễn thám và học máy

Chương 2: Điều kiện tự nhiên, kinh tế - xã hội và thực trạng biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng

Chương 3: Dữ liệu và quy trình ứng dụng viễn thám – học máy trong nghiên cứu biến động đường bờ biển thành phố Đà Nẵng

Chương 4: Kết quả ứng dụng học máy trong đánh giá biến động đường bờ phục vụ quản lý bờ biển thành phố Đà Nẵng

CHƯƠNG 1: CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ CÁCH TIẾP CẬN NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG ĐƯỜNG BỜ BIỂN ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ VIỄN THÁM VÀ HỌC MÁY

1.1. Một số khái niệm

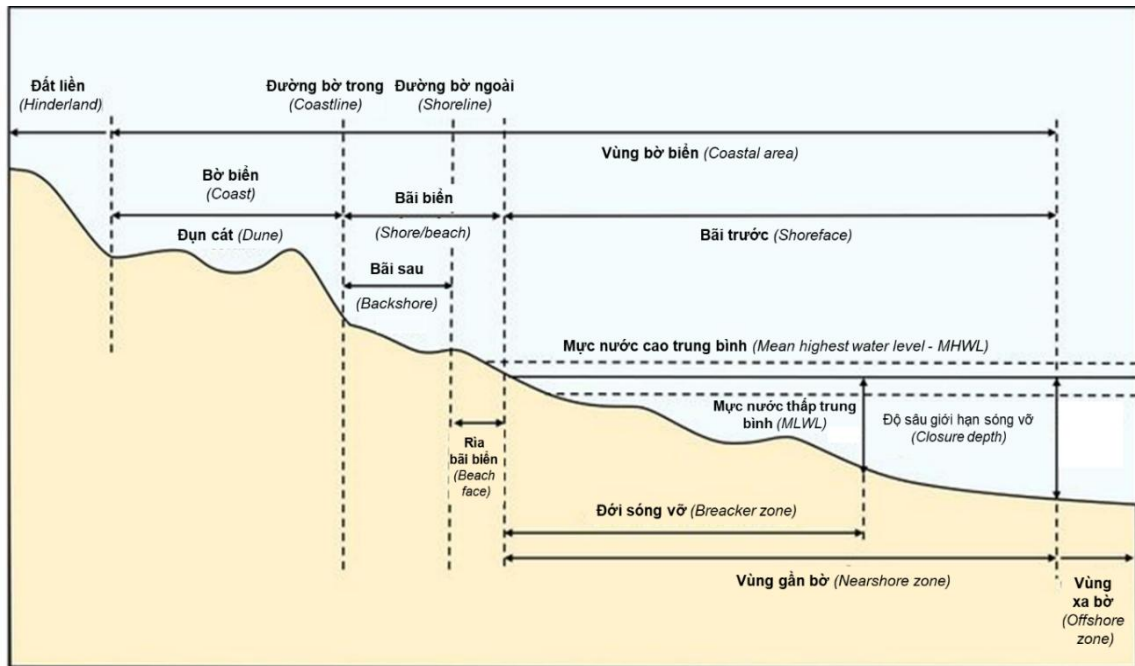
1.1.1. Đường bờ biển

Hiện có khá nhiều tác giả đưa ra khái niệm về bờ biển, song về cơ bản đều thống nhất rằng, bờ biển là vùng chuyển tiếp giữa đất liền và biển, có bề rộng thay đổi và không có ranh giới cố định rõ ràng [19]. Khu vực này kéo dài từ đường bờ ra phía đất liền cho đến nơi bắt đầu xuất hiện các đặc điểm địa hình chuyển tiếp rõ ràng như vách đá, đụn cát tiền tiêu hoặc dải thực vật thường xuyên hiện diện. Tại những bờ biển có các đảo ven bờ, cồn chắn, hệ thống đầm phá, bãi lầy và các lạch triều, các yếu tố này đều được xem là một phần cấu thành của bờ biển. Trên các vùng đồng bằng, ranh giới phía đất liền của bờ biển thường khó xác định do sự chuyển tiếp địa hình diễn ra từ từ. Ngược lại, ranh giới phía biển thường được xác định bởi vị trí của mực nước biển cực đại khi xảy ra sóng bão, được gọi là đường bờ trong. Đối với các đoạn bờ dốc đứng, đường bờ trong và đường bờ ngoài có thể trùng nhau do sự thay đổi độ cao diễn ra đột ngột.

Theo tiếp cận địa mạo, cần xác định rõ hai loại đường bờ sau: đường bờ trong và đường bờ ngoài. Đó là các kiểu đường bờ có ý nghĩa đối với nghiên cứu biến động, cả xói lở và bồi tụ bờ biển, đã được đề cập khá rõ trong các cuốn sách và công trình về địa mạo [48].

Đường bờ trong (coastline) là ranh giới hình thái – không gian ổn định tương đối, biểu thị giới hạn phía trong của vùng chịu tác động trực tiếp và lặp lại của các quá trình biển như sóng, triều và nước dâng do bão. Ranh giới này phản ánh trạng thái cân bằng tương đối của hệ thống bờ trong thang thời gian trung và dài hạn, qua đó phân tách khu vực bãi biển có tính động cao với phần bờ đất liền ổn định hơn. Trong nghiên cứu xói lở và biến động bờ biển, đường bờ trong thường được sử dụng như mốc tham chiếu hình thái để đánh giá các biến đổi dài hạn của bờ biển [48,49]. Một số chỉ thị hình thái có thể dùng để xác định đường bờ trong bao gồm đường ranh giới thảm thực vật cố định và vách xói lở rõ nét. (Hình 1.1).

Tuy nhiên, trong thực tế, đường bờ trong không phải lúc nào cũng tồn tại như một ranh giới hình thái rõ ràng, đặc biệt tại các khu vực bờ cát thấp, bờ bồi tụ và vùng cửa sông, nơi địa hình thoải, vật liệu bờ rời và chịu tác động mạnh của động lực sóng – triều. Trong những điều kiện này, việc xác định trực tiếp đường bờ trong dựa trên các yếu tố hình thái thuần túy như vách xói lở hay mép đụn cát thường gặp nhiều khó khăn.



Hình 1.1. Mặt cắt ngang vùng bờ biển mở [48]

Chính vì vậy, trong nhiều nghiên cứu, đường bờ trong được xác định gián tiếp thông qua các chỉ thị hình thái – sinh thái ổn định, trong đó đường bờ thực vật (vegetation line) là chỉ thị được sử dụng phổ biến và có giá trị cao. Đường bờ thực vật thể hiện ranh giới ngoài cùng ổn định của thảm thực vật ven biển, nơi thực vật lâu năm có khả năng tồn tại và tái sinh bền vững trước tác động thường xuyên của các quá trình biển. Do sự hình thành và duy trì thảm thực vật đòi hỏi điều kiện ổn định tương đối trong thời gian đủ dài, ranh giới thực vật ít chịu ảnh hưởng của dao động mực nước tức thời, qua đó phản ánh tốt hơn trạng thái cân bằng dài hạn của hệ thống bờ so với ranh giới nước – đất tại thời điểm quan sát [49,187]

Về bản chất địa mạo – sinh thái, đường bờ thực vật thường trùng hoặc gần trùng với vị trí đường bờ trong, đặc biệt tại các khu vực bờ cát thấp, bờ cửa sông và vùng bãi bồi, nơi thảm thực vật đóng vai trò là ranh giới tự nhiên giữa phần bờ ổn định và khu vực bãi chịu tác động động lực mạnh. Do đó, sự dịch chuyển của đường bờ thực vật theo thời gian được xem là chỉ báo đáng tin cậy cho xu thế biến động dài hạn của bờ biển, bao gồm xu thế xói lở hoặc bồi tụ kéo dài [48].

Tuy nhiên, cần lưu ý rằng đường bờ thực vật không phản ánh tức thời các biến động ngắn hạn, và trong các điều kiện biến động mạnh như bão lớn, xói lở đột ngột hoặc tác động nhân sinh, ranh giới thực vật có thể xuất hiện độ trễ so với biến động hình thái thực tế của bờ biển. Vì vậy, trong nghiên cứu biến động đường bờ, việc sử dụng đường bờ thực vật để xác định đường bờ trong cần được kết hợp với các chỉ thị hình thái khác như mép đụn cát, vách xói lở hoặc ranh giới sử dụng đất nhằm bảo đảm tính toàn diện và độ tin cậy của kết quả phân tích [187].

Đường bờ ngoài (shoreline) được hiểu là ranh giới vật lý giữa đất liền và mặt nước biển, thường được xác định tại vị trí có mực nước biển trung bình cao nhất trong chu kỳ nhiều năm. Mặc dù đây là một khái niệm tương đối đơn giản về mặt định nghĩa, việc xác lập chính xác đường bờ ngoài trong thực tiễn vẫn gặp nhiều thách thức do ảnh hưởng của các yếu tố tự nhiên biến động liên tục. Thuật ngữ "đường bờ ngoài" mô tả khu vực tiếp xúc trực tiếp giữa mặt nước biển và dải đất khô liền kề, và về mặt hình thái, đây là vị trí kết thúc của bãi biển hướng ra biển khơi. Trong nghiên cứu bờ biển, có thể phân biệt hai loại đường bờ ngoài phổ biến: (1) đường bờ tức thời, thể hiện vị trí đất – nước tại một thời điểm cụ thể, thường được trích xuất từ ảnh viễn thám hoặc quan sát hiện trường; và (2) đường bờ trung bình, được xác định dựa trên dữ liệu quan trắc trong một khoảng thời gian dài hơn, chẳng hạn như chu kỳ thủy triều hoặc trung bình nhiều năm. Trên thực tế, đường bờ ngoài là một ranh giới động, không cố định, chịu tác động đồng thời của nhiều quá trình như vận chuyển trầm tích dọc bờ, dao động mực nước do sóng, thủy triều, nước ngầm, và các hiện tượng thời tiết cực đoan như bão, lũ. Vì vậy, việc xác định đường bờ ngoài cần được hiểu là một phép đo tương đối, phụ thuộc vào thời điểm khảo sát hoặc khung thời gian lựa chọn, và cần gắn liền với mục đích nghiên cứu cụ thể.

1.1.2 Biến động đường bờ biển

Biến động đường bờ biển được hiểu là sự thay đổi vị trí không gian của đường ranh giới giữa đất liền và biển theo thời gian, phản ánh trạng thái động của hệ thống bờ biển dưới tác động tổng hợp của các quá trình tự nhiên và hoạt động của con người [49]. Trong nghiên cứu sử dụng viễn thám và học máy, đường bờ biển được xem như một đối tượng hình học trích xuất từ ảnh viễn thám đa thời gian để phân tích xu thế dịch chuyển không gian của khu vực bờ. Về bản chất địa mạo, biến động đường bờ biển là kết quả tổng hợp của hai quá trình đối lập là xói lở và bồi tụ diễn ra trong phạm vi bờ biển. Hai quá trình này liên quan đến việc mất đi vật liệu trầm tích (xói lở) và tích lũy trầm tích mới (bồi tụ), điều chỉnh hình thái tổng thể của bờ biển theo thời gian [49]. Đường bờ biển không phải là một thực thể vật chất, mà là đường ranh giới quy ước; do đó, các quá trình xói lở và bồi tụ không trực tiếp xảy ra “trên đường bờ” mà được phản ánh gián tiếp qua sự dịch chuyển đường bờ sang phía đất liền hoặc ra phía biển. Biến động đường bờ biển gồm cả biến động đường bờ trong và biến động đường bờ ngoài. Biến động đường bờ trong gây ra hiện tượng xói lở bờ biển, có thể gây những thiệt hại về tài sản ở vùng đất ven biển. Biến động đường bờ ngoài thường liên quan với quá trình xói lở và bồi tụ bãi biển.

Xói lở bờ biển là quá trình mất dải đất và vật chất đất – trầm tích cấu tạo nên chúng tại khu vực ven bờ do tác động của sóng, dòng chảy, triều và nước dâng, dẫn đến sự suy thoái hình thái bờ và thường gắn với xu thế dịch chuyển của đường bờ về phía đất liền. Quá trình này có thể diễn ra kéo dài trong điều kiện mất cân bằng giữa nhập – xuất trầm tích, xảy ra đặc biệt mạnh trong những sự kiện cực đoan như bão, triều cường. Sự dâng cao mực nước biển do biến đổi khí hậu có thể làm gia tăng xu thế xói lở tại nhiều khu vực ven biển thấp [90].

Ngược lại, bồi tụ là quá trình tích lũy trầm tích trong phạm vi ven bờ, thường xảy ra ở các khu vực nước nông, nơi năng lượng sóng và dòng chảy giảm, tạo điều kiện cho trầm tích lắng đọng. Bồi tụ được thể hiện bằng xu thế dịch chuyển của đường bờ ra phía biển trong các giai đoạn nhất định, có thể dẫn đến mở rộng diện tích đất ven bờ nhưng cũng có thể gây bồi lấp lạch triều và ảnh hưởng đến thủy động lực sinh thái vùng cửa sông – ven biển.

Trong phân tích biến động đường bờ, việc sử dụng dữ liệu viễn thám đa thời gian kết hợp các phương pháp trích xuất đường bờ và học máy cho phép định lượng sự thay đổi của đường bờ trên diện rộng và liên tục theo thời gian. Điều này không chỉ giúp nhận diện xu thế xói lở và bồi tụ mà còn cung cấp cơ sở khoa học quan trọng cho quản lý tổng hợp vùng bờ, quy hoạch không gian ven biển và giảm thiểu rủi ro thiên tai trong bối cảnh thay đổi môi trường [49].

1.2. Tổng quan các công trình nghiên cứu

1.2.1 Các nghiên cứu biến động bờ biển trên thế giới và trong nước

Nghiên cứu biến động bờ biển trên thế giới đã trải qua quá trình phát triển lâu dài, từ các nghiên cứu mô tả định tính ban đầu đến các phân tích định lượng và mô hình dự báo phức tạp. Một trong những công trình nền tảng đầu tiên là nghiên cứu của E. Bird et al. (1985), trong đó các tác giả đã tổng hợp và phân tích quy luật tiến – lùi của đường bờ trên phạm vi toàn cầu, đồng thời chỉ ra rằng nguyên nhân biến động bờ biển thường mang tính đa nhân tố và có sự khác biệt rõ rệt giữa các khu vực [47]. Kết luận này đã đặt nền móng cho quan điểm tiếp cận theo đặc thù vùng, thay vì tìm kiếm các quy luật hay giải pháp mang tính phổ quát cho mọi bờ biển.

Trong những thập kỷ gần đây, lĩnh vực nghiên cứu biến động bờ biển đã phát triển mạnh mẽ cả về quy mô và chiều sâu. Tổng quan hệ thống của M. Rahman et al. (2022) trên 905 bài báo công bố trong giai đoạn 2000–2021 cho thấy số lượng nghiên cứu tăng nhanh, với phạm vi toàn cầu nhưng tập trung chủ yếu tại một số quốc gia như Hoa Kỳ và Ấn Độ [145]. Điều này phản ánh vừa tính phổ biến của vấn đề biến động bờ biển, vừa cho thấy sự phân bố không đồng đều về năng lực nghiên cứu và dữ liệu giữa các khu vực trên thế giới.

Về mặt khái niệm và phương pháp luận, một thách thức cốt lõi trong nghiên cứu biến động bờ biển là xác định đường bờ biển. Boak và Turner (2005) cho rằng, mặc dù về mặt lý thuyết, đường bờ được định nghĩa là ranh giới giao nhau giữa mặt nước và bề mặt đất liền, song trong thực tiễn nghiên cứu, ranh giới này luôn biến động theo thời gian do tác động của thủy triều, sóng và các quá trình động lực khác [49]. Vì vậy, các nghiên cứu thường sử dụng các chỉ thị thay thế, bao gồm các chỉ thị có thể nhận dạng trực quan (như vết nước cao) hoặc các đường giao cắt giữa mặt cắt bờ với các mực cao thủy triều xác định.

Các nghiên cứu quốc tế đều thống nhất rằng biến động bờ biển chịu tác động đồng thời của nhiều nhóm nhân tố tự nhiên, nhân sinh và biến đổi khí hậu [143]. Về mặt tự nhiên, E. Thieler et al. (2011) chỉ ra rằng xói lở bờ biển là hiện tượng phổ biến dọc theo hầu hết các bờ biển mở, xảy ra cả ở các khu vực phát triển mạnh và các khu vực còn giữ trạng thái tự nhiên [168]. J. Slott et al. (2006) nhấn mạnh vai trò của sự thay đổi chế độ bão, cho thấy tốc độ giạt lùi đường bờ có thể thay đổi theo bậc độ lớn giữa các khu vực khác nhau [159]. Bên cạnh các quá trình tự nhiên, các hoạt động của con người ngày càng đóng vai trò chi phối trong biến động bờ biển. D. Stauble et al. (2003) cho thấy các công trình chỉnh trị bờ, cải tạo luồng tàu và bảo vệ bờ đã làm thay đổi đáng kể xu thế tiến – lùi của đường bờ [161]. Các nghiên cứu gần đây hơn của I. A. Kurniawan et al. (2020) và Riordan Correll-Brown et al. (2022) khẳng định rằng đô thị hóa ven biển, phát triển hạ tầng không chỉ thúc đẩy xói lở mà còn làm suy thoái các hệ sinh thái ven bờ, qua đó gia tăng rủi ro thiên tai [59,98]. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, E. Thieler et al. (2011) và M. Stutz et al. (2020) đều cho rằng mực nước biển dâng và cường độ bão gia tăng sẽ làm gia tốc các quá trình biến động bờ, đặc biệt đối với các bãi biển cát [163,168].

Song song với sự phát triển về nhận thức, phương pháp nghiên cứu biến động bờ biển cũng không ngừng được hoàn thiện. Các phương pháp truyền thống dựa trên ảnh hàng không, ảnh vệ tinh, đo mặt cắt bờ và số liệu địa hình – thủy văn đã được áp dụng từ sớm. Dolan et al. (1991) đã xây dựng các phương pháp thống kê kinh điển như EPR, AOR, hồi quy tuyến tính và Jackknife, đặt nền tảng cho phân tích định lượng biến động đường bờ [67]. Từ đầu thế kỷ XXI, các kỹ thuật địa không gian hiện đại và phân tích đa thời gian, đa tỷ lệ được phát triển mạnh [52] (Burningham et al., 2020), trong đó việc tích hợp dữ liệu đa nguồn [86] (Guariglia et al., 2006) và sử dụng hệ thống DSAS trở thành xu hướng phổ biến [157] (Mujabar et al., 2011). Luijendijk et al. (2023) đã sử dụng dữ liệu đường bờ trích xuất từ ảnh vệ tinh kết hợp học máy để nhận diện các động lực chi phối biến động bờ biển trên phạm vi toàn thế giới [107].

Gần đây, các công nghệ mới như học máy, AI, UAV và dữ liệu đám mây điểm đang mở ra những hướng tiếp cận mới cho nghiên cứu biến động bờ biển. C. Tsiakos et al. (2023) cho thấy tiềm năng lớn của các mô hình học máy trong giám sát đường bờ quy mô lớn [174], trong khi Hyunsuk Kim et al. (2017) chứng minh hiệu quả của công nghệ LiDAR hàng không trong theo dõi biến động bờ với độ chính xác cao [96]. Tổng quan của M. Rahman et al. (2022) nhấn mạnh rằng các phương pháp mới đang hướng tới yêu cầu độ chính xác ở mức centimet, đặc biệt quan trọng đối với các khu vực đồng bằng châu thổ và khu vực ven sông – ven biển dễ bị tổn thương [145].

Mặc dù đạt được nhiều tiến bộ, nghiên cứu biến động bờ biển vẫn đối mặt với không ít thách thức. Phân tích tổng hợp của Apostolopoulos et al. (2021) cho thấy việc sử dụng ảnh vệ tinh độ phân giải cao vẫn còn hạn chế, trong khi nhiều nghiên cứu vẫn phụ thuộc vào dữ liệu Landsat với những giới hạn nhất định về độ chính xác [38]. Tổng hợp các nghiên cứu trên cho thấy biến động bờ biển là một hiện tượng toàn cầu, phức tạp và mang tính liên ngành cao. Quan điểm của E. Bird et al. (1985) về tính đa nguyên nhân và đặc thù vùng của biến động bờ biển vẫn giữ nguyên giá trị cho đến nay [47]. Mặc dù các tiến bộ công nghệ đã cho phép theo dõi và dự báo biến động bờ với độ chi tiết ngày càng cao, song sự gia tăng mực nước biển, biến đổi chế độ bão và tác động của con người đang khiến bài toán nghiên cứu và quản lý bờ biển trở nên cấp bách và thách thức hơn bao giờ hết. Điều này đặt ra yêu cầu tiếp tục hoàn thiện phương pháp luận, tích hợp các nhân tố tự nhiên – nhân sinh và hướng tới các khung phân tích dự báo phục vụ quản lý bền vững vùng ven biển.

Ở Việt Nam, nghiên cứu về biến động bờ biển đã được các nhà khoa học quan tâm từ thập niên 90 của thế kỷ XX và kéo dài cho đến nay. Một trong những công trình nghiên cứu đầu tiên mang tính chất quản lý Nhà nước có đề cập đến biến động bờ biển Việt Nam là đề tài “Hiện trạng và nguyên nhân bồi xói dải bờ biển Việt Nam”. Đề tài do Nguyễn Thanh Nga chủ trì, thuộc Chương trình Môi trường, mã số KT-03-14 đã đề xuất các biện pháp khoa học kỹ thuật bảo vệ và khai thác vùng đất ven biển. Tuy nhiên, các kết quả của đề tài này chủ yếu tập trung vào việc đề xuất các giải pháp công trình. Trên cơ sở một số kết quả đạt được, Lê Xuân Hồng đã tổng hợp và bổ sung để hoàn thiện đề tài “Xói lở bờ biển Việt Nam” vào năm 1997. Cùng thời kỳ này, đã có một số công trình nghiên cứu liên quan đến đánh giá tổn thương đới bờ phục vụ công tác quản lý, tiêu biểu là Dự án hợp tác giữa Chính phủ Việt Nam và Chính phủ Hà Lan trong giai đoạn 1994–1996. Trong khuôn khổ dự án này, đường bờ biển Việt Nam đã được đo đạc trên bản đồ địa hình UTM tỷ lệ 1/50.000 với tổng chiều dài 3.670 km, đồng thời xác định được một số

khu vực có mức độ tổn thương cao như đồng bằng sông Hồng, đồng bằng sông Mê Kông, khu vực thành phố Hồ Chí Minh – Vũng Tàu và Huế – Đà Nẵng. Công trình “Nghiên cứu, dự báo, phòng chống sạt lở bờ biển Miền Trung (từ Thanh Hóa đến Bình Thuận)” (2000–2001) do Phạm Huy Tiến và Nguyễn Văn Cư chủ trì đã phân tích đặc điểm địa hình – địa mạo, các yếu tố địa chất, cũng như các tác nhân như sóng, thủy triều, dòng chảy và tác động của con người gây ra sạt lở bờ biển miền Trung. Công trình này đã đánh giá biến động đường bờ biển bằng tư liệu viễn thám tại ba khu vực trọng điểm là Thừa Thiên Huế, Quảng Ngãi và Phú Yên. Đề tài KH-CN-06-10 cấp Nhà nước “Cơ sở khoa học và các đặc trưng đới bờ phục vụ yêu cầu xây dựng công trình biển ven bờ” do Phạm Văn Ninh (2000) chủ trì đã tiến hành nghiên cứu trên toàn dải bờ biển Việt Nam, từ Móng Cái đến Hà Tiên, thông qua việc tổng hợp số liệu hiện có, khảo sát bổ sung và tính toán mô phỏng bằng các mô hình toán học nhằm xác định các thông số về chế độ khí hậu, thủy văn, động lực biển và địa mạo phục vụ mục đích xây dựng. Bên cạnh đó, Dự án “Hợp tác nghiên cứu hiện trạng và quy luật xói lở – bồi tụ bờ biển Việt Nam” (2000–2002) giữa Viện Hải dương học Nha Trang và Viện Hải dương học quốc gia Ấn Độ tập trung làm rõ nguyên nhân, quy luật xói lở – bồi tụ cũng như sự biến đổi theo không gian và thời gian của các hiện tượng này trong các điều kiện địa chất khác nhau, từ đó đề xuất các giải pháp phòng chống theo hướng có lợi cho phát triển kinh tế – xã hội.

Việc tổng kết và đánh giá các kết quả nghiên cứu về xói lở, bồi tụ bờ biển và cửa sông Việt Nam đã được thảo luận khá chi tiết trong các công bố của Vũ Văn Phái vào các năm 2006, 2009. Theo tác giả, xói lở bờ biển là hiện tượng phổ biến và có xu hướng gia tăng tại Việt Nam, diễn ra dưới nhiều hình thức khác nhau, từ bờ cát đến các bờ thấp có cấu tạo bùn sét. Biến đổi khí hậu được xác định là yếu tố có tác động lớn đến quá trình xói lở bờ biển, thể hiện qua sự gia tăng năng lượng sóng và mực nước biển dâng. Ngoài việc làm gia tăng mức độ xói lở, mực nước biển dâng còn gây ngập lụt thụ động ở nhiều vùng đất thấp, đặc biệt là các khu vực ven biển của đồng bằng Bắc Bộ và Nam Bộ. Do đó, việc đánh giá các yếu tố dễ bị tổn thương của vùng ven biển trước tác động của biến đổi khí hậu là yêu cầu cấp thiết nhằm hướng tới phát triển bền vững khu vực ven biển [18,16].

Nhìn chung, các nghiên cứu về biến động đường bờ biển đã cho phép đánh giá được mức độ biến đổi trong hiện tại cũng như dự báo xu thế biến động trong tương lai. Phương pháp viễn thám kết hợp với hệ thống thông tin địa lý được sử dụng phổ biến trong điều tra biến động bờ biển. Tuy nhiên, vẫn tồn tại những ý kiến chưa thống nhất liên quan đến việc sử dụng ảnh vệ tinh để xác định đường bờ

biển, do sự khác biệt trong quan điểm xác định đường bờ của từng tác giả, dẫn đến sự khác nhau trong kết quả đánh giá biến động bờ biển.

1.2.2 Ứng dụng viễn thám trong nghiên cứu đường bờ biển trên thế giới và trong nước

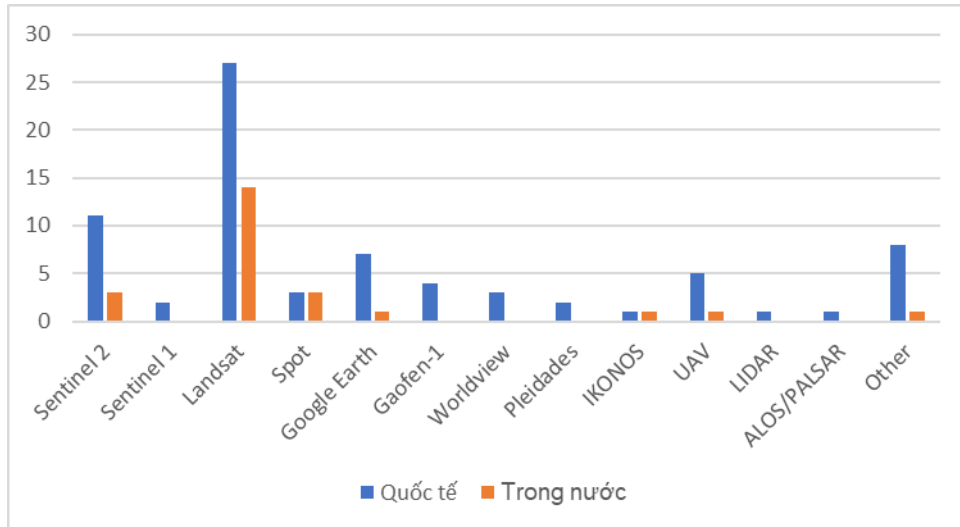
Trên thế giới, giám sát biến động đường bờ biển trước thường dựa trên bản đồ lịch sử, ảnh hàng không và khảo sát thực địa. Các đặc trưng đường bờ có thể được quan sát trực tiếp hoặc thông qua ảnh chụp quang học, đa phổ hoặc RADAR. Trong những thập kỷ qua, dữ liệu vệ tinh đã chứng minh những hiệu quả trong việc tăng chất lượng sản phẩm và giảm chi phí trong công tác theo dõi các vấn đề về tài nguyên và môi trường. Kể từ khi vệ tinh Landsat 1 được phóng vào năm 1972, viễn thám đã trở thành công cụ quan trọng trong giám sát Trái Đất, với sự cải thiện đáng kể về độ phân giải không gian và thời gian. Ustin và Middleton (2021) đã tổng hợp các nghiên cứu về các loại vệ tinh và nhận định rằng ảnh viễn thám với tần suất thu nhận cao, phạm vi bao phủ lớn và dải quang phổ rộng tạo điều kiện thuận lợi cho phân tích đường bờ ở nhiều quy mô khác nhau, từ địa phương đến toàn cầu [177]. Tuy nhiên, một số đặc trưng địa hình như sự khác biệt giữa đỉnh và chân vách đá khó được nhận diện trên ảnh 2D. Dữ liệu 3D từ SAR hoặc LiDAR có thể hỗ trợ trong trường hợp này, nhưng chi phí cao là hạn chế lớn trong thu thập thường xuyên dữ liệu này. Hiện nay, giám sát biến động đường bờ chủ yếu dựa vào ảnh quang học đa phổ, nhờ lợi thế về chi phí và sự đa dạng về độ phân giải không gian – thời gian.

Ảnh Landsat đã cung cấp chuỗi dữ liệu lịch sử trong 50 năm với độ phân giải 30m, hỗ trợ trích xuất đường bờ trên quy mô không gian và thời gian nhất quán. Santos và cộng sự (2021) đã sử dụng ảnh Landsat 5 để phân tách đất – nước dọc bờ biển ở João Pessoa city, Paraíba, Brazil [153]. Trong nghiên cứu của Zhou. H và cộng sự năm 2021, các tác giả đã sử dụng dải phổ “Green” để quan sát vùng ven biển [196]. Việc phóng vệ tinh Sentinel-2 vào năm 2015 với độ phân giải không gian 10m, tần suất cập nhật 5 ngày đã thúc đẩy nghiên cứu về biến động đường bờ. Phiri et al. (2019) cho thấy ảnh vệ tinh đa phổ với các dải phổ trong vùng cận hồng ngoại và hồng ngoại sóng ngắn (SWIR) có lợi thế trong phân tích lớp phủ bề mặt [133]. Bên cạnh đó, việc kết hợp giữa ảnh Sentinel 2 và Landsat cũng được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu ven biển. Behling, R và cộng sự năm 2018 đã kết hợp hai dữ liệu này để trích xuất đường bờ ngoài [43]. Trong khi đó, Sentinel-1 cung cấp dữ liệu radar với tần suất cao, có khả năng thu nhận và phân tích tín hiệu tán xạ ngược. Nghiên cứu của Vreugdenhil et al. (2020) cho thấy dữ liệu Sentinel-1 có độ nhạy cao với đặc tính vật lý như độ nhám bề mặt, địa hình cục bộ và hằng số điện môi [182]. Do đó, việc kết hợp dữ liệu quang học và SAR

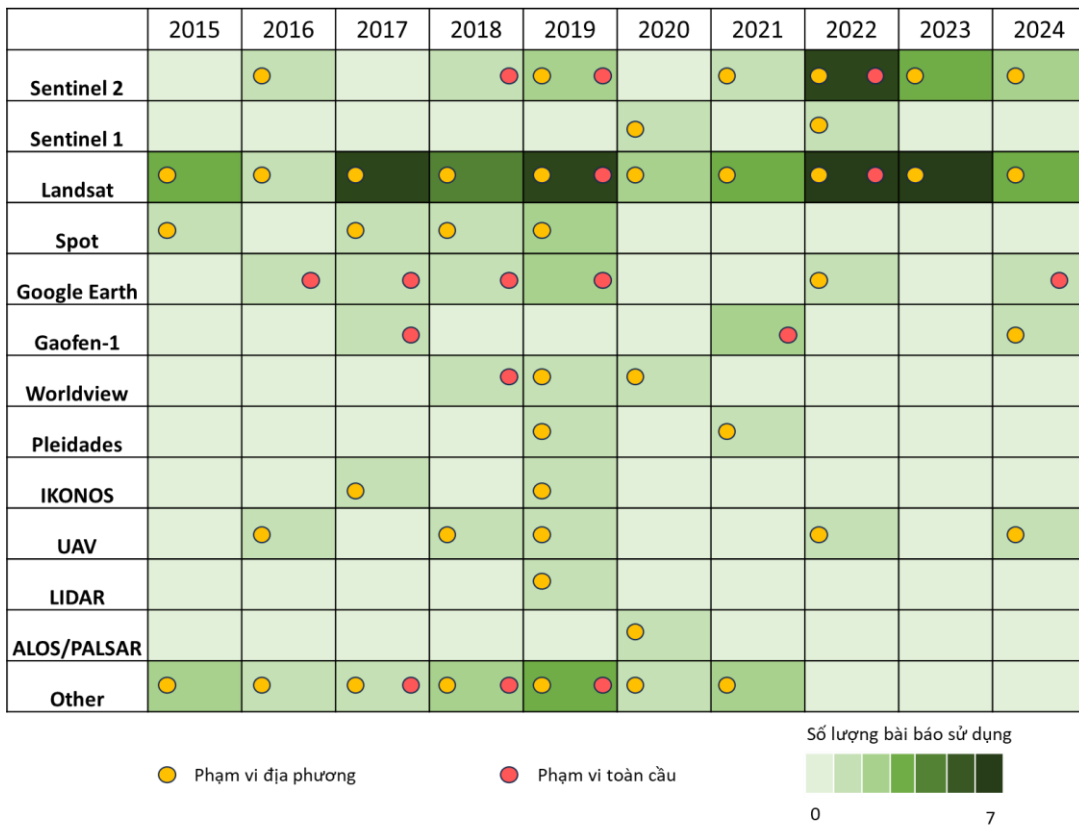
mang lại nhiều lợi thế trong nghiên cứu đường bờ, đặc biệt trong điều kiện thời tiết bất thường. Tuy nhiên, việc giải đoán và xử lý ảnh SAR phức tạp hơn so với ảnh quang học do ảnh hưởng của các yếu tố như bóng địa hình, đặc biệt ở khu vực Bắc Bán cầu. Với việc sử dụng dữ liệu viễn thám độ phân giải tầm trung, các nghiên cứu cũng mới chỉ tập trung vào việc phân tách ranh giới đất và nước (còn được biết đến là “Đường bờ” nói chung). Việc xác định đường bờ trong dựa trên các ảnh có độ phân giải tầm trung vẫn còn nhiều hạn chế do khoảng cách giữa đường người trong và ngoài đôi lúc chỉ cách nhau từ 5 đến 10 m. Trong khi ảnh viễn thám độ phân giải trung hiện nay cũng chỉ đạt được 10 đến 20 m.

Ngoài các dữ liệu miễn phí, một số vệ tinh thương mại như SPOT, WorldView, GeoEye và QuickBird cung cấp ảnh có độ phân giải cao hơn. Ví dụ, ảnh Pleiades (WorldView-2, -3, -4) có chu kỳ lặp lại 26 ngày với độ phân giải toàn sắc 0,5m và đa phổ 2m. Trong khi đó, dữ liệu SAR thương mại như ALOS PALSAR-2 và TerraSAR-X cung cấp ảnh có độ phân giải từ 0,25m đến 100m. Bartsch và cộng sự (2020) đã sử dụng dữ liệu RADAR từ kênh L và C để định lượng tốc độ xói mòn bờ biển Bắc Cực, cho thấy tiềm năng cao của ảnh RADAR trong phân biệt ranh giới đất và nước [42]. Điều này cho thấy dữ liệu thương mại có thể cung cấp nguồn thông tin quan trọng bổ sung cho các nghiên cứu về nhận diện đường bờ, phục vụ công tác đánh giá biến động bờ biển.

Tổng quan các tài liệu quốc tế trên Scopus và Web of Science, cùng với các nghiên cứu trong nước ở các tạp chí Khoa học Trái đất, tạp chí Khí tượng thủy văn và tạp chí Biển & Công nghệ, nghiên cứu sinh đã tổng hợp được hơn 70 bài báo từ năm 2015 đến 2024 (Phụ lục 1). Các nghiên cứu này được phân loại theo hai phạm vi: địa phương và toàn cầu. Kết quả cho thấy phần lớn nghiên cứu tập trung ở cấp địa phương. Ảnh vệ tinh quang học, đặc biệt là Landsat, được sử dụng phổ biến với khoảng 50% nghiên cứu khai thác dữ liệu từ Landsat 5, 7 và 8. Mặc dù Sentinel-2 ít được sử dụng hơn do dữ liệu mới có từ năm 2014, nhưng xu hướng nghiên cứu với Sentinel-2 tăng mạnh vào năm 2021-2022. Bên cạnh đó, dữ liệu có độ phân giải rất cao như WorldView-2, GF, và RapidEye cũng được khai thác đáng kể, trong khi ảnh SAR (như Sentinel-1, ALOS/PALSAR) ít được sử dụng hơn trong trích xuất đường bờ (Hình 1.2, và Hình 1.3).



Hình 1.2. Thống kê dữ liệu viễn thám được sử dụng trong 70 tài liệu được thu thập trong nước và quốc tế về giải đoán đường bờ/bờ biển và giám sát biến động đường bờ biển.



Hình 1.3. Sơ đồ trình bày các ảnh viễn thám được sử dụng trong 70 tài liệu tham khảo thu thập trong nước và quốc tế từ năm 2015 đến 2024 về giải đoán đường bờ/bờ biển và giám sát biến động đường bờ biển

Tại Việt Nam, nghiên cứu về đường bờ đã bắt đầu từ những năm 1990 từ những nghiên cứu cơ bản đến những ứng dụng thực tế. Sự kết hợp giữa tư liệu viễn thám, phương pháp bản đồ và hệ thống thông tin địa lý (GIS) đã được áp dụng để

nghiên cứu biến động của đường bờ biển và sự phát triển cửa sông ở nhiều khu vực khác nhau. Trần Thị Vân và Trịnh Thị Bình (2008) đã nghiên cứu sự thay đổi đường bờ nhằm phục vụ quản lý bền vững ở vùng duyên hải đồng bằng sông Cửu Long [171]. Nghiên cứu này đã sử dụng ảnh viễn thám Landsat, Aster và GIS để xác định và phân tích sự thay đổi đường bờ ở cửa sông Cửu Long. Các tác giả đã trình bày các bản đồ biến đổi đường bờ trong 3 giai đoạn 1989, 2001 và 2004. Năm 2011, các tác giả Nguyễn Tiến Hoàng, Trần Hữu Tuyên và Nguyễn Đình Hòa đã nghiên cứu sử dụng ảnh vệ tinh Landsat và Aster để nhận diện sự biến động đường bờ biển tỉnh Thừa Thiên Huế [12]. Thông qua phân tích ảnh vệ tinh và bản đồ địa hình, kết quả cho thấy đoạn bờ từ Hải Dương đến Phú Thuận bị xâm thực với tốc độ mạnh nhất, khoảng 10-15m/năm. Khu vực hai cửa sông Thuận An và Tư Hiền biến đổi phức tạp và vùng cửa sông Hương có xu hướng biến đổi từ cấu trúc liman sang cấu trúc cửa sông hình phễu. Biến động đường bờ trong khu vực Trung Trung Bộ nói chung và khu vực Sơn Trà – Cửa Đại đã được các tác giả đề tài KC.09.17/16-20 xác định trên cơ sở phân tích dữ liệu từ các thể hệ ảnh vệ tinh từ Google Earth [3,103].

Với các bài báo được tổng hợp từ các tạp chí uy tín trong và ngoài nước về tư liệu ảnh viễn thám trong nghiên cứu bờ, số lượng ảnh Landsat được nghiên cứu chiếm khoảng 80%, do đây nguồn tư liệu có từ năm 1975 đến nay phù hợp trong nghiên cứu biến động lịch sử của bờ biển. Việc sử dụng ảnh Sentinel-2 có độ phân giải cao mới được sử dụng phổ biến trong 10 năm trở lại đây. *Việc nghiên cứu bờ biển với ảnh có độ phân giải siêu cao như ảnh UAV và ảnh từ nguồn Google Earth ở Việt Nam còn rất ít (Hình 1.3).*

1.2.3 Ứng dụng học máy trong nghiên cứu đường bờ biển trên thế giới và trong nước

Học máy được coi là tập hợp các thuật toán và phương pháp được áp dụng để thiết kế và triển khai hệ thống, tự học từ dữ liệu mẫu và có khả năng tự suy ra kết quả. Xem xét tính sẵn có của dữ liệu đầu vào và kết quả thực tế, các thuật toán học máy có thể được nhóm thành bốn loại chính: (i) học có giám sát, (ii) học không giám sát, (iii) học bán giám sát và (iv) học tăng cường.

Phương pháp học không giám sát được sử dụng khi người dùng thiếu dữ liệu được dán nhãn. Phương pháp này có thể được sử dụng để đào tạo và cố gắng xác định các mẫu và điểm tương đồng ẩn trong dữ liệu. Học không giám sát thường được áp dụng cho các nhiệm vụ phân cụm, phân nhóm các đối tượng từ dữ liệu thu thập từ thực tế. Một số thuật toán được sử dụng phổ biến nhất có thể kể đến như phân cụm K-mean [65,185] và ISODATA [92,117,158] trong các nghiên cứu phân tách đất và nước. Thuật toán K-Means được cung cấp bởi hàm k-means, cho phép

xác định vị trí trung tâm cụm hoặc số lượng cụm thông qua tham số trung tâm, giúp thực hiện nhiều lựa chọn phân vùng ngẫu nhiên và cuối cùng trả về phân vùng có hàm mục tiêu tối ưu nhất (tổng bình phương khoảng cách tối thiểu). Tuy nhiên, Gentleman, R. và Carey, V.J. (2008) cũng chỉ ra rằng phương pháp này không đảm bảo tìm ra phân vùng tối ưu cuối cùng và có hai nhược điểm chính: (1) giá trị K được chọn trước và cố định, (2) việc chọn hạt giống ngẫu nhiên có thể ảnh hưởng đến kết quả [81]. Khác với thuật toán K-mean, thuật toán ISODATA không chỉ thực hiện phân cụm bằng cách điều chỉnh lớp mà các mẫu thuộc về mà còn tự động "gộp" và "tách" lớp để đạt được số lượng lớp hợp lý hơn cho mỗi cụm. Nghiên cứu của Choung, Y.-J. và Jo, M.-H (2017), Sun, W và cộng sự (2023), Shenbagaraj và cộng sự 2014 về khoa học bờ biển đã sử dụng ISODATA để nhận diện đặc trưng [57,158,165]. Các nghiên cứu này cho thấy ISODATA đã đạt được một số thành công khi được tích hợp vào phần mềm trích xuất đường bờ tự động, trong đó các đặc trưng được phân loại và gộp thành hai cụm đất và nước, và ranh giới giữa hai cụm được xác định là đường bờ ngoài.

Phương pháp học bán giám sát là kết hợp giữa phương pháp có giám sát và không giám sát. Mẫu không được gắn nhãn ban đầu được nhóm lại bằng thuật toán không giám sát giúp cho người dùng hiểu được cấu trúc đầu vào, sau đó, sử dụng phương pháp có giám sát để dự đoán cho dữ liệu không dán nhãn. Cuối cùng, tất cả các dữ liệu được dùng để đào tạo mô hình có giám sát. Mục tiêu của phương pháp này là giảm thiểu khoảng cách giữa các cụm và vector đầu vào (trong trường hợp các mẫu không được gắn nhãn), cũng như các lỗi giữa mẫu đầu ra và các vector đầu vào (trong trường hợp các mẫu được gắn nhãn).

Về phương pháp học tăng cường, đây là một kỹ thuật học bằng cách tương tác với môi trường. Quy trình này dựa trên nguyên tắc học từ phản hồi (feedback) và thưởng (reward) để tối đa hóa một hàm được xác định trước. Mục tiêu của thuật toán này là giảm thiểu mất mát thông tin và tối ưu hóa các nhóm phân loại. Trong nghiên cứu của Ferreira và cộng sự (2022) chỉ ra các thuật toán tăng cường không tập trung áp dụng vào một lĩnh vực cụ thể, mà thay vào đó tập trung vào các nhiệm vụ thu thập dữ liệu quan sát Trái Đất [74]. Sau đó đây cũng là một phương pháp được sử dụng khá phổ biến trong giám sát và quản lý tài nguyên và môi trường.

Phương pháp học máy có giám sát bao gồm các thuật toán tạo ra hàm có khả năng ánh xạ đầu vào, cung cấp thông tin hỗ trợ cho đầu ra, dựa trên quá trình đào tạo với dữ liệu mẫu (tức là học các mối quan hệ theo các ví dụ đầu vào và đầu ra). Phương pháp này thường được áp dụng để phân loại một hay nhiều đối tượng khác nhau. Nhiều thuật toán phân loại có thể kể đến trong công tác phân loại các

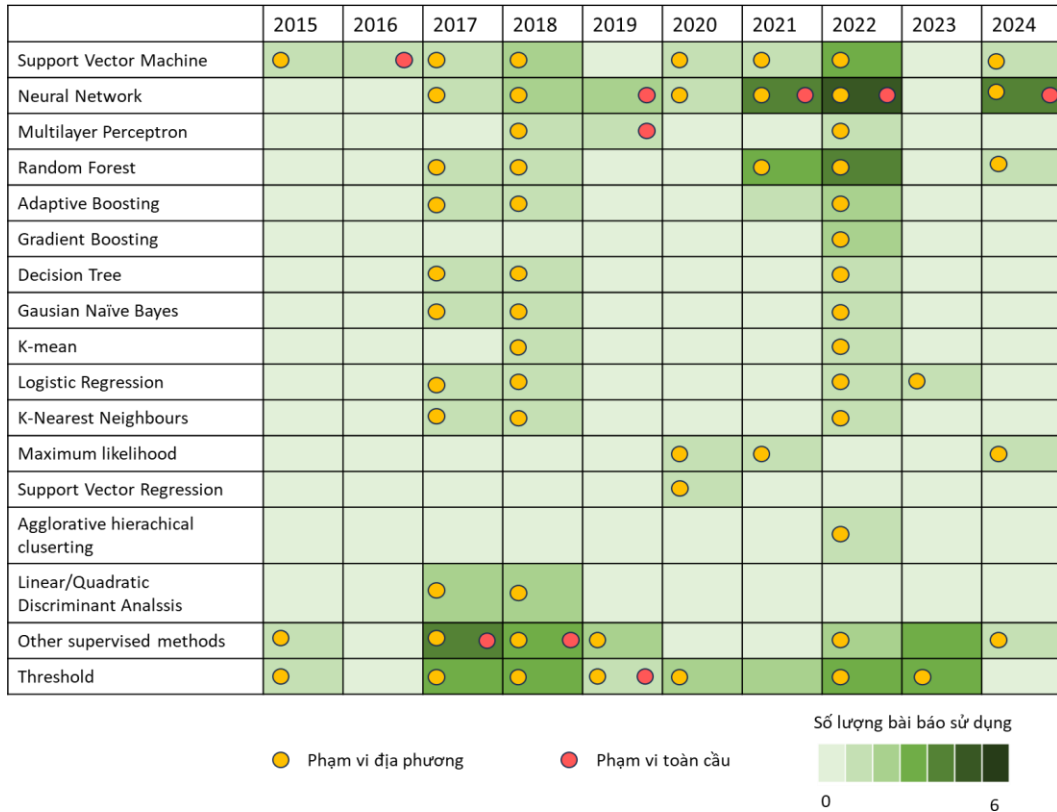
đối tượng ven biển như Support Vector Machine [78], Maximum Likelihood [193], và K- láng giềng gần nhất (KNN) [60]. Boggs, G.S năm 2010 đã chỉ ra rằng phương pháp KNN gặp khó khăn trong việc xử lý giữa các vùng chuyển tiếp ven biển [50]. Trong khi đó, nghiên cứu của Kalkan, K và cộng sự năm 2013 đã sử dụng phương pháp SVM trong phân loại nhị phân giữa đất liền và nước [95]. Kết quả cho thấy phương pháp này có thể phát hiện đường bờ ngoài với độ chính xác cao. Yu, W et al (2022) đã sử dụng phương pháp Maximum Likelihood dựa trên tiêu chuẩn Bayes với xác suất lỗi phân loại tối thiểu [193]. Tuy nhiên, trong trích xuất đường bờ biển, Maximum Likelihood có hiệu suất tương tự như thuật toán Parallelepiped (phân loại hình hộp chữ nhật), nhưng vẫn bị ảnh hưởng bởi vùng chuyển tiếp giữa khu vực đất khô và đất ướt.

Học máy mạng nơ-ron là một nhánh khác của phương pháp học máy có giám sát. Trong đó mô hình được đào tạo bằng cách sử dụng mạng thần kinh nhân tạo với nhiều lớp ẩn cho phép mô hình học được các mối quan hệ phức tạp bên trong cơ sở dữ liệu. Sau khi hoàn chỉnh, các mô hình này có thể phân tích mẫu đầu vào mới và đưa ra dự đoán kết quả đầu ra, giống như trong các thuật toán có giám sát khác, mà không cần huấn luyện lại. Trong nghiên cứu của Vos, K. và cộng sự (2019) và nghiên cứu của Puskarczyk, E. (2019) đã sử dụng mạng Nơ-ron-Nhân tạo (ANN) với nhiều hàm kích hoạt khác nhau để trích xuất các loại đường bờ ngoài khác nhau từ ảnh viễn thám và so sánh với phương pháp cây quyết định (DT), k-láng giềng gần nhất (KNN) và SVM [142,181]. Kết quả cho thấy mô hình ANN phân loại hiệu quả hơn các phương pháp Decision Tree (DT), KNN và SVM. Bên cạnh đó, mạng Nơ-ron Tích chập (CNN) tích hợp đa dạng các lớp tích chập, lớp gộp và lớp kết nối, cũng được áp dụng trong các nghiên cứu trích xuất đường bờ. Trong các nghiên cứu của Yu, L và cộng sự (2017), Tambe và cộng sự (2021) đã đề xuất nhiều mô hình CNN với ưu điểm riêng cho từng tập dữ liệu và nhiệm vụ [167,192]. Mô hình CNN cơ bản đã đạt được nhiều kết quả trong phân đoạn nước-đất. Tuy nhiên, Tambe, R.G và cộng sự (2021) đã chỉ ra rằng, mô hình CNN vẫn còn tồn tại hai vấn đề chính: (1) ranh giới giữa nước và đất còn mờ, nhiều sai số, và (2) yêu cầu lượng lớn tham số huấn luyện và mẫu huấn luyện. Hiện nay, một trong những mô hình được sử dụng rộng rãi trong phân đoạn ảnh là mô hình U-Net do Ronneberger, O et al (2015) nghiên cứu. Nhiều mô hình học máy mạng nơ-ron trích xuất đường bờ biển áp dụng U-Net cơ bản và bổ sung thêm các module mới, cải tiến hơn [125]. Ví dụ, các nhà nghiên cứu Aghdami-Nia, M và cộng sự (2022) đã cải tiến mô hình Standard U-Net (SUN) để tăng hiệu suất và xây dựng khung tự động trích xuất đường bờ biển, đạt kết quả tốt hơn chỉ số AWEI [34]. Một

số mô hình khác được huấn luyện bằng kết nối đa tỷ lệ (full-scale skip connection) trong U-Net 3+ để tăng độ nhạy với ranh giới đường bờ hẹp và chi tiết [83].

Trên thế giới, các nghiên cứu áp dụng các kỹ thuật học máy khác nhau trong nhiều bối cảnh giải đoán đường bờ và giám sát đường bờ. Qua tổng hợp tài liệu ở Phụ lục 1 cho thấy phần lớn nghiên cứu sử dụng các phân loại tổng hợp như Random Forest (RF), Gradient Boosting, Extra Trees và Adaptive Boosting. Ngoài ra, các phương pháp SVM, hay các mô hình trí tuệ nhân tạo như Neural Network, Multilayer Perception CNN cũng được ứng dụng nhiều trong nghiên cứu đường bờ trong những năm gần đây. Còn các phương pháp như Linear/Quadratic Discriminant Analysis và Graph Neural Network được nghiên cứu sớm. Tuy nhiên việc sử dụng những phương pháp này rất hạn chế (Hình 1.4).

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về trích xuất đường bờ chủ yếu tập trung vào việc sử dụng các chỉ số viễn thám và kỹ thuật phân ngưỡng nhằm phân biệt giữa lớp đất liền và lớp nước, đặc biệt là trong việc xác định đường bờ ngoài. Các phương pháp chỉ số chủ yếu dựa trên sự khác biệt về đặc tính hấp thụ và phản xạ phổ của nước và đất trong các dải phổ khác nhau để phân đoạn ảnh. Những chỉ số này được xây dựng thông qua các phép toán tổ hợp giữa các dải phổ nhằm khuếch đại sự tương phản giữa hai lớp đối tượng, từ đó cải thiện khả năng nhận diện và tăng độ chính xác phân đoạn. Như trong nghiên cứu Bùi Thị Kiên Trinh và Nguyễn Mạnh Cường (2018), chỉ số MNDWI kết hợp với phương pháp phân loại có giám sát trong phần mềm ArcGIS đã được sử dụng để chiết tách đường bờ khu vực Nha Trang [27]. Tuy nhiên, kết quả giải đoán trong nghiên cứu này vẫn cần chỉnh sửa thủ công đáng kể trước khi đưa vào phân tích biến động bờ biển. Nhiều nghiên cứu khác cũng khai thác các chỉ số phổ phổ biến như NDWI, MNDWI và AWEI để phân tách lớp nước và đất, tiêu biểu là nghiên cứu của Phạm Duy Huy Bình và cộng sự (2021) tại khu vực cửa sông Tiên Châu, Phú Yên [4]. Tuy nhiên, việc xử lý các chỉ số phổ đa dạng có thể làm gia tăng khối lượng tính toán và độ phức tạp thuật toán, đặc biệt khi áp dụng trên các tập dữ liệu có độ phân giải lớn.



Hình 1.4. Sơ đồ tổng hợp các kỹ thuật học máy được sử dụng trong 70 tài liệu tham khảo trên thế giới và Việt Nam từ năm 2015 đến 2022 về giải đoán đường bờ/bờ biển và giám sát biến động đường bờ biển

Song song với đó, phương pháp phân ngưỡng cũng được ứng dụng rộng rãi, trong đó các ngưỡng được lựa chọn dựa trên đặc tính phổ đặc trưng của lớp nước và lớp đất. Cách tiếp cận này cho phép phân chia ảnh thành hai vùng đồng nhất tương đối: nước và đất. Chẳng hạn, Trần Văn Tình và Doãn Hà Phong (2017) đã sử dụng ngưỡng tại band 5 ảnh Landsat, cũng như các chỉ số được tính từ band 2, band 4 và band 5 để trích xuất đường bờ khu vực Mũi Cà Mau [24]. Năm 2012, đề tài về “Điều tra, đánh giá hiện trạng tính ổn định của đường bờ biển tỉnh Quảng Nam và đề xuất giải pháp thích ứng với điều kiện biến đổi khí hậu” (2012) do Nguyễn Quang Tuấn chủ trì, đã sử dụng phương pháp kết hợp giá trị ngưỡng và tỷ số band để xác định ranh giới giữa biển và đất liền. Năm 2019, nhóm tác giả Nguyễn Hải Đông và cộng sự đã đánh giá biến động đường bờ biển ở khu vực Quảng Nam cũ nay là thành phố Đà Nẵng sử dụng ảnh Landsat và Sentinel-2 [8]. Trong nghiên cứu này nhóm tác giả đã sử dụng phương pháp tỷ lệ kênh ảnh kết hợp phân ngưỡng kênh hồng ngoại giữa nhằm nâng cao độ chính xác khi chiết xuất thông tin đường bờ.

Nhìn chung, phần lớn các nghiên cứu trước đây tại Việt Nam vẫn ưu tiên các kỹ thuật phân loại có giám sát và phân ngưỡng. Cả hai hướng tiếp cận đều dựa

trên pixel và dựa trên đối tượng được áp dụng để nhận diện đường bờ dưới dạng phân loại hoặc phân đoạn. Các phương pháp phân ngưỡng chủ yếu tập trung vào đặc tính phổ của pixel, trong khi các phương pháp dựa trên đối tượng còn tính đến hình thái không gian và bối cảnh lân cận, nhằm cải thiện độ chính xác của kết quả trích xuất đường bờ. Trong những năm trở lại đây, với sự phát triển của công nghệ học máy sâu, một số nhà khoa học như Đặng Kinh Bắc và cộng sự (2022) và Giang Tuấn Linh và cộng sự (2023) đã bắt đầu đi sâu vào phát triển các mô hình như CNN, U-Net để tăng độ chính xác trong nhận dạng đường bờ trong và sự biến động của chúng dưới áp lực từ mực nước biển dâng trong bão [62,83]. Các tác giả cũng chỉ ra những thách thức tại Việt Nam như sự không đồng nhất trong kết quả đánh giá giữa các nghiên cứu truyền thống. *Từ tổng quan các nghiên cứu trong nước có thể nhận thấy, phương pháp trích xuất đường bờ bằng mô hình trí tuệ nhân tạo ở Việt Nam, cũng như các đánh giá độ chính xác ở các phương pháp dựa trên pixel hay phân ngưỡng chưa được làm rõ ở các nghiên cứu.*

1.2.4 Tổng quan nghiên cứu biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng

Ở khu vực nghiên cứu thành phố Đà Nẵng, bờ biển nhiều tài nguyên có giá trị cao đã và đang phục vụ cho các hoạt động tại vùng ven biển. Vì vậy, hai khu vực này nhận được nhiều quan tâm của các nhà quản lý biển và các nhà nghiên cứu ven bờ. Khái quát về xói lở bờ biển miền Trung, trong đó có khu vực Đà Nẵng – Hội An đã được Lê Đức An, Lê Xuân Hồng đưa ra, cả về hiện trạng, diễn biến, nguyên nhân [1,13]. Năm 2002, Lê Đình Mậu đã báo cáo về vùng biển Hội An về các đặc điểm trường sóng và vận chuyển trầm tích dọc bờ. Qua nghiên cứu, khu vực này bị tác động mạnh của quá trình hội tụ và phân kỳ năng lượng sóng. Bờ Nam của cửa Đại thì bị tác động bởi sóng hướng Bắc và Đông Bắc. Bên cạnh đó, tác giả Phạm Bá Trung và Nguyễn Hữu Sửu (2002) đã báo cáo về sự biến động liên tục theo thời gian của khu vực Cửa Đại phụ thuộc vào các yếu tố sóng biển, thủy triều, dòng chảy. Kết quả nghiên cứu chỉ ra quy luật phát triển chung của khu vực Cửa Đại có xu hướng chuyển dịch về phía Nam, bờ phía Bắc phát triển lấn biển về phía cửa sông. Theo các tác giả phần đáy biển phía Bắc bị xói lở, phía Nam được bồi tụ [29].

Năm 2004, với nghiên cứu tính toán vận chuyển bùn cát và biến động đoạn Cửa Đại bằng mô hình UNIBEST, tác giả Trần Thanh Tùng đã đưa ra biến động khu vực này từ năm 1965 đến 1996. Theo đó, mô hình UNIBEST (viết tắt của "UNIform BEach Sediment Transport") đã ra đời từ năm 1989 do Viện Thủy lực Hà Lan phát triển. Phiên bản 5.0 được công bố vào tháng 4/1999 và được ứng dụng rộng rãi trên toàn cầu. Nghiên cứu đã khẳng định kết quả tính toán của UNIBEST phản ánh khá phù hợp với điều kiện bờ biển Việt Nam. Việc sử dụng nhiều công

thức tính vận chuyển bùn cát đã làm tăng tính linh hoạt, phong phú và khả năng ứng dụng trong nhiều điều kiện biên khác nhau của mô hình [30].

Năm 2006, Lê Đình Mầu đã nghiên cứu chi tiết về xói lở, bồi tụ và sự biến đổi đường bờ ở khu vực Hội An để phục vụ công tác quản lý hiệu quả vùng ven biển. Kết quả nghiên cứu chỉ ra một số nhận định chính: i) Khu vực ven bờ Hội An chịu ảnh hưởng của bão với tần suất trung bình 1,2 lần/năm trong giai đoạn 1945-2003, tập trung vào các tháng 9, 10, 11. ii) Vùng biển ven bờ biến động theo mùa gió Tây Nam và Đông Bắc với sóng gió mạnh hơn vào mùa Đông Bắc. iii) Trong 1965-2001, cửa sông Thu Bồn di chuyển về phía Đông Nam khoảng 800m (22m/năm). iv) Biến đổi đường bờ theo mùa với mức độ lớn hơn vào mùa mưa, bờ sông bị xói lở nhiều. v) Dự đoán vị trí đường bờ bị xói lở khá trùng khớp với đo đạc ngoài thực địa, ngoại trừ khu vực cửa sông nơi chịu ảnh hưởng của dòng chảy như mũi Cửa Đại, mũi An Lương, bờ sông [15].

Năm 2019, tác giả Trần Văn Bình, Lê Đình Mầu và Vũ Văn Phái đã nghiên cứu quá trình địa mạo ven biển để phục vụ quản lý môi trường ven biển tỉnh Quảng Nam cũ nay là thành phố Đà Nẵng. Kết quả nghiên cứu cho thấy quá trình địa mạo chủ yếu là xói lở và xảy ra ở hầu hết các bờ được cấu tạo bằng các vật liệu bờ rời. Đồng thời, nghiên cứu cũng đã phân vùng cảnh báo rủi ro với các mức nguy cơ khác nhau nhằm giúp các nhà quản lý lập kế hoạch cũng như chính sách quy hoạch cụ thể cho vùng [46]. Cùng năm, Nguyễn Hải Đông và cộng sự (2019) đã kết hợp ảnh Landsat và ảnh Sentinel 2 để đánh giá biến động đường bờ ngoài tại khu vực Quảng Nam cũ trước và sau khi có các công trình ven bờ. Kết quả nghiên cứu cho thấy bờ biển có xu thế biến động xói lở - bồi tụ đan xen, mặc dù quá trình xói lở vẫn diễn ra thường xuyên [8].

Đào Đình Châm và cộng sự (2020), trong đề tài cấp quốc gia mã số KC.09.03/16-20 đã phân tích đặc điểm biến động bờ biển cửa sông ở Quảng Nam cũ trên cơ sở phân tích các dữ liệu viễn thám và mô hình thủy văn đánh giá các yếu tố thủy thạch động lực tác động tới quá trình biến động [5]. Năm 2020, Ngô Văn Liêm và cộng sự đã tiếp tục mở rộng nghiên cứu biến động từ khu vực Sơn Trà tới khu vực Cửa Đại dựa vào dữ liệu viễn thám từ năm 1965 đến 2019. Qua nghiên cứu, các tác giả đã chia được bờ biển khu vực này thành 30 đoạn và tập hợp thành 8 nhóm theo mức độ xói lở và bồi tụ [119]. Năm 2022, Nguyễn Tiến Thành đã phân tích và đánh giá diễn biến xói lở và bồi tụ ở Quảng Nam cũ bằng ảnh Landsat. Kết quả chỉ ra quá trình xói lở chiếm ưu thế hơn đặc biệt ở khu vực Bắc Cửa Đại. Khu vực Nam Cửa Đại thì hiện tượng xói và bồi xảy ra xen kẽ qua từng giai đoạn [22]. Trong nghiên cứu của Ninh Thu Trang và cộng sự (2023) đã sử dụng nền tảng Google Earth Engine để phân tích biến động bờ biển Đà Nẵng.

Các tác giả đã sử dụng các chỉ số nước và thuật toán phân ngưỡng Otsu để xác định đường bờ ngoài từng thời điểm ảnh. Kết quả nghiên cứu cho thấy bờ biển Đà Nẵng có hiện tượng bồi xói xen kẽ và khu vực bồi tụ mạnh nhất là ở cửa sông Hàn [26].

Trong đề tài cấp bộ Tài nguyên và Môi trường mã số TNMT.562.08, trên cơ sở phân tích các dữ liệu địa hình chi tiết và ảnh viễn thám, các mô hình thủy văn, Phạm Hoàng Hải đã đưa ra được đặc điểm, xu hướng biến động địa hình vùng cửa sông Thu Bồn; xác định được nguyên nhân, cơ chế hình thành đảo cát chắn ở vùng cửa sông Thu Bồn, trong đó lượng bồi tích do xói lở bờ biển Cửa Đại đóng vai trò quan trọng [10].

1.2.5. Khoảng trống nghiên cứu

Tổng quan các nghiên cứu trong và ngoài nước cho thấy việc ứng dụng viễn thám, GIS và học máy trong nghiên cứu biến động đường bờ biển đã đạt được nhiều kết quả quan trọng, đặc biệt trong trích xuất và theo dõi đường bờ ngoài ở các quy mô và điều kiện bờ khác nhau. Tuy nhiên, các nghiên cứu này vẫn bộc lộ một số hạn chế và khoảng trống khoa học cần tiếp tục được làm rõ, cụ thể là:

Thứ nhất, phần lớn các nghiên cứu hiện nay vẫn dựa vào đường bờ ngoài – ranh giới tức thời giữa đất liền và mặt nước – vốn chịu ảnh hưởng mạnh của thủy triều, sóng và điều kiện môi trường tại thời điểm thu nhận ảnh. Điều này làm gia tăng sai số khi phân tích xu thế biến động dài hạn, đặc biệt ở các khu vực có động lực bờ mạnh như vùng ven biển miền Trung Việt Nam.

Thứ hai, đường bờ trong, mặc dù có tính ổn định cao hơn và phản ánh rõ hơn các quá trình xói lở – bồi tụ thực tế, lại chưa được quan tâm đúng mức trong nghiên cứu viễn thám. Việc thiếu một hệ thống chỉ thị phù hợp để xác định đường bờ trong từ ảnh viễn thám độ phân giải cao, đặc biệt trong điều kiện bờ biển nhiệt đới gió mùa, là một khoảng trống nghiên cứu rõ rệt.

Thứ ba, các mô hình học máy và mạng nơ-ron sâu hiện đại đã được chứng minh hiệu quả trong nhiều lĩnh vực quan sát Trái Đất, nhưng việc ứng dụng chúng trong nghiên cứu đường bờ tại Việt Nam vẫn còn hạn chế. Nhiều nghiên cứu vẫn dừng ở các phương pháp phân ngưỡng hoặc chỉ số phổ truyền thống, thiếu các đánh giá chuyên sâu về khả năng nhận dạng đường bờ trong và so sánh hiệu quả giữa các mô hình học máy khác nhau.

Nhận xét chung là cho tới nay, mặc dù đã có khá nhiều công trình nghiên cứu, đánh giá biến động bờ biển, tuy nhiên, các nghiên cứu ở Việt Nam và khu vực Thành phố Đà Nẵng chưa quan tâm tới nhiều về vấn đề biến động đường bờ trong, cũng như ứng dụng của các mô hình trí tuệ nhân tạo trong giám sát và đánh giá các tai biến ven biển.

Những khoảng trống trên cho thấy sự cần thiết của việc phát triển cách tiếp cận tích hợp giữa viễn thám độ phân giải cao, phân tích địa mạo và học máy nhằm nâng cao độ chính xác trong giám sát biến động đường bờ, làm cơ sở khoa học cho nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn trong quản lý vùng bờ.

1.3. Cơ sở lý luận về viễn thám và học máy trong nghiên cứu đường bờ

1.3.1. Bộ chỉ thị đường bờ trong đánh giá biến động bờ biển

1.3.1.1. Khái quát về bộ chỉ thị

Trong nghiên cứu đánh giá biến động đường bờ biển, việc lựa chọn và sử dụng các chỉ thị đường bờ là yêu cầu cốt lõi nhằm bảo đảm tính nhất quán khoa học và khả năng so sánh kết quả theo không gian và thời gian. Mỗi chỉ thị đường bờ đại diện cho một hoặc một nhóm đặc trưng vật lý, sinh học hoặc động lực khác nhau của vùng bờ, phản ánh trạng thái và mức độ tác động của các quá trình biến – lục địa lên ranh giới tiếp giáp giữa đất liền và biển. Do đó, đường bờ không phải là một ranh giới duy nhất, cố định, mà được xác định khác nhau tùy theo mục tiêu nghiên cứu, đặc điểm bờ biển và thang thời gian phân tích.

Về bản chất, các chỉ thị đường bờ có thể phản ánh đường bờ trong hoặc đường bờ ngoài. Đường bờ ngoài thường gắn với các chỉ thị chịu ảnh hưởng trực tiếp của mực nước, sóng và điều kiện thời tiết tại thời điểm quan trắc, như đường ướt, mực nước tức thời hoặc các mực triều chuẩn. Ngược lại, đường bờ trong được xác định dựa trên các dấu hiệu hình thái – sinh học tương đối ổn định hơn, như ranh giới thảm thực vật, đụn cát tiền tiêu, vách xói lở hoặc các mốc hình thái tích lũy theo thời gian. Hình 1.1 minh họa vị trí không gian của các chỉ thị đường bờ thường được sử dụng trong nghiên cứu biến động bờ biển. Các chỉ thị có thể được xác định là đường bờ trong hoặc ngoài, tùy thuộc vào đặc điểm bờ biển tại thời điểm ghi nhận [49].

Tùy theo loại chỉ thị được lựa chọn, cách thức xác định ngoài thực địa và trên ảnh viễn thám có sự khác biệt rõ rệt. Ví dụ, khi mực triều được sử dụng làm chỉ thị đường bờ ngoài, các mực nước chuẩn như mực nước biển trung bình hoặc mực triều cao trung bình thường được áp dụng. Những thông tin này chủ yếu phục vụ mục tiêu bản đồ địa hình, hải đồ, quy hoạch nuôi trồng thủy – hải sản hoặc xác lập các ranh giới pháp lý ven biển. Tuy nhiên, việc đo đạc và chuẩn hóa các mực triều đòi hỏi hệ thống quan trắc dài hạn, chi phí cao và thường chỉ có sẵn ở một số khu vực nhất định.

Trong khi đó, đối với các chỉ thị đường bờ trong trên đất liền, sự phát triển của công nghệ viễn thám, đặc biệt là ảnh độ phân giải cao và dữ liệu UAV, cho phép nhận diện trực tiếp các dấu hiệu hình thái và sinh học của bờ biển mà không phụ thuộc mạnh vào điều kiện thủy triều tức thời. Các chỉ thị này có khả năng phản

ánh xạ thể biến động trung – dài hạn của bờ biển, đồng thời cho phép đánh giá tác động của các sự kiện cực đoan như bão, sóng trào và xói lở đột biến thông qua sự dịch chuyển của các mốc hình thái ổn định.

Trong nghiên cứu biến động đường bờ, đã có nhiều công trình khoa học đề xuất và sử dụng các bộ chỉ thị khác nhau để xác định ranh giới đất – biển. Sự đa dạng này được phản ánh rõ nét trong các nghiên cứu được tổng hợp bởi Seynabou Toure và nnk., [170]. Trên cơ sở rà soát có hệ thống hơn 30 công trình nghiên cứu tiêu biểu đã công bố, hai tác giả đã xây dựng Bảng tổng hợp 45 chỉ thị đường bờ, thể hiện các cách tiếp cận khác nhau trong nhận dạng và theo dõi biến động bờ biển.

Kế thừa trực tiếp từ bảng tổng hợp của Seynabou Toure và nnk., Phụ lục 2 trình bày một bức tranh toàn diện về các chỉ thị quan sát đường bờ trong và ngoài đã được sử dụng trong nghiên cứu biến động bờ biển. Bảng này tổng hợp 45 chỉ thị đường bờ, phản ánh sự đa dạng đáng kể về tên gọi, bản chất khoa học, nguồn dữ liệu, kỹ thuật phát hiện và bối cảnh địa lý áp dụng. Các chỉ thị có thể được chia thành các nhóm chính, bao gồm: (i) các chỉ thị hình thái tự nhiên (đỉnh vách, chân vách, đụn cát, bề mặt bãi); (ii) các chỉ thị liên quan đến thảm thực vật ven biển; (iii) các chỉ thị gắn với mực nước và thủy triều; (iv) các chỉ thị dựa trên công trình nhân tạo ven bờ; và (v) các chỉ thị trích xuất gián tiếp thông qua xử lý ảnh và dữ liệu số. Sự phong phú này cho thấy lĩnh vực nghiên cứu đường bờ đã phát triển mạnh mẽ, song đồng thời cũng bộc lộ sự thiếu thống nhất về thuật ngữ và nội hàm khái niệm.

Phân tích tổng hợp từ Phụ lục 2 cho thấy, mặc dù số lượng chỉ thị được đề xuất là lớn, nhiều chỉ thị có tên gọi khác nhau nhưng phản ánh cùng một bản chất hình thái, trong khi một số chỉ thị khác lại được sử dụng với nội hàm khá chung chung, thiếu mô tả rõ ràng về ranh giới không gian và điều kiện thời gian áp dụng. Đặc biệt, không ít nghiên cứu chưa làm rõ mức độ nhạy cảm của chỉ thị đối với các yếu tố động lực tức thời như mực triều, sóng và điều kiện thời tiết tại thời điểm thu nhận dữ liệu, dẫn đến sự khác biệt đáng kể giữa các kết quả đánh giá biến động đường bờ.

Một hạn chế nổi bật khác là việc lựa chọn chỉ thị chưa gắn chặt với mục tiêu nghiên cứu và đặc điểm địa mạo cụ thể của khu vực khảo sát. Các chỉ thị chịu ảnh hưởng mạnh của mực triều và sóng, nếu được sử dụng trực tiếp làm đường bờ tham chiếu mà không có bước chuẩn hóa hoặc hiệu chỉnh theo thời gian thu nhận dữ liệu, có thể gây ra sai số lớn về vị trí đường bờ. Hiện tượng này đặc biệt rõ rệt tại các bãi biển thấp, thoải và có biên độ dao động triều đáng kể, nơi vị trí đường bờ có thể dịch chuyển mạnh chỉ trong một chu kỳ triều hoặc dưới tác động của một

đợt sóng lớn, từ đó làm sai lệch nhận định về xu thế biến động dài hạn và cân bằng bùn cát.

Bên cạnh đó, các nghiên cứu tổng hợp cũng cho thấy vai trò của các sự kiện cực đoan, như bão và sóng trào, thường chưa được phản ánh đầy đủ trong hệ thống chỉ thị đường bờ. Mặc dù diễn ra trong thời gian ngắn, các sự kiện này có khả năng tái cấu trúc mạnh mẽ hình thái bờ biển, phá vỡ trạng thái cân bằng cũ và thiết lập mặt bằng hình thái mới, qua đó chi phối xu thế biến động đường bờ trong trung và dài hạn. Việc thiếu các chỉ thị đặc thù phản ánh dấu tích và tác động của bão là một khoảng trống đáng chú ý, đặc biệt đối với bờ biển nhiệt đới gió mùa.

Từ những phân tích trên có thể thấy rằng, mặc dù các bộ chỉ thị được tổng hợp trong Phụ lục 2 – kế thừa trực tiếp từ công trình của Seynabou Toure và nnk., – có giá trị quan trọng về mặt học thuật và cung cấp nền tảng tham chiếu toàn diện, chưa có một bộ chỉ thị nào được cấu trúc một cách hệ thống, tối ưu cho điều kiện bờ biển nhiệt đới, đặc biệt là khu vực Trung Bộ Việt Nam. Khu vực này đặc trưng bởi bờ cát thấp, cửa sông động, chế độ gió mùa rõ rệt và tần suất cao của bão nhiệt đới, đòi hỏi các chỉ thị đường bờ vừa phản ánh được quá trình hình thái – động lực dài hạn, vừa giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố tức thời.

Do đó, việc định hướng xây dựng một bộ chỉ thị đường bờ phù hợp hơn cho bờ biển Trung Bộ Việt Nam, trên cơ sở kế thừa có chọn lọc các chỉ thị đã được kiểm chứng trong nghiên cứu quốc tế và điều chỉnh theo điều kiện địa mạo – động lực đặc thù của khu vực, là yêu cầu mang tính tất yếu. Đây chính là cơ sở khoa học để tiếp tục phát triển các tiếp cận nhận dạng đường bờ ổn định hơn và đánh giá biến động bờ biển phục vụ nghiên cứu và quản lý vùng bờ trong các phần tiếp theo của luận án.

1.3.1.2. Bộ chỉ thị đường bờ phục vụ đánh giá biến động bờ biển bằng viễn thám và học máy

Trên cơ sở tổng hợp và phân tích có hệ thống các chỉ thị đường bờ đã được đề xuất và sử dụng trong các nghiên cứu quốc tế, luận án xây dựng một bộ chỉ thị đường bờ phục vụ đánh giá biến động bờ biển bằng viễn thám và học máy, phù hợp với điều kiện tự nhiên và động lực đặc thù của vùng bờ Trung Bộ Việt Nam. Bộ chỉ thị này được kế thừa trực tiếp từ các khung chỉ thị và cách tiếp cận đã được tổng quan ở các mục trước, đồng thời được điều chỉnh và phát triển thêm nhằm khắc phục những hạn chế khi áp dụng máy móc các chỉ thị quốc tế trong bối cảnh bờ biển nhiệt đới chịu tác động mạnh của gió mùa, bão và biến động trầm tích ngắn hạn.

Khác với một số hệ thống phân loại chỉ thị mang tính khái quát cao, bộ chỉ thị trong luận án không tổ chức theo “loại chỉ thị” trừu tượng, mà được cấu trúc

trực tiếp theo các nhóm chỉ thị, phản ánh bản chất hình thái, sinh thái và động lực của các ranh giới đường bờ có thể nhận dạng trên ảnh viễn thám, dữ liệu UAV và ngoài thực địa. Cách tổ chức này giúp tăng tính trực quan, thuận lợi cho việc tích hợp với các phương pháp xử lý ảnh đa thời gian và các mô hình học máy trong các chương tiếp theo. Danh mục đầy đủ và mô tả chi tiết từng chỉ thị được trình bày trong Phụ lục 3, trong khi nội dung mục này tập trung giải thích logic xây dựng và nội hàm khoa học của từng nhóm chỉ thị, theo đó, bộ chỉ thị gồm tám nhóm chỉ thị chính:

1. *Nhóm chỉ thị hình thái ổn định*, gồm 6 chỉ thị, phản ánh các ranh giới hình thái ít biến động theo mùa hoặc ngắn hạn, có ý nghĩa như các mốc tham chiếu dài hạn của tiến hóa đường bờ. Các chỉ thị điển hình trong nhóm này bao gồm đỉnh đụn cát, chân đụn cát cổ, mép hoặc đỉnh đụn cát ổn định, đỉnh vách đá, chân vách đá ổn định và đỉnh thềm biển cổ. Phần lớn các chỉ thị này được kế thừa từ các nghiên cứu hình thái bờ biển kinh điển đã được tổng hợp trong các công trình của Boak và Turner, Dolan và cộng sự, cũng như nhiều nghiên cứu sử dụng ảnh Landsat và ảnh độ phân giải cao. Trong luận án, các chỉ thị này được nhấn mạnh vai trò như đại diện của “đường bờ trong” và được sử dụng chủ yếu để đánh giá xu thế biến động dài hạn.

2. *Nhóm chỉ thị hình thái bán ổn định (theo mùa)*, gồm 4 chỉ thị, phản ánh các ranh giới hình thái có biến động theo chu kỳ sóng – gió mùa nhưng vẫn có khả năng nhận dạng rõ ràng trên chuỗi ảnh đa thời gian. Các chỉ thị tiêu biểu bao gồm đỉnh gờ bãi, chân gờ bãi, chân đụn cát hiện tại và rìa đụn cát hoạt động. Những chỉ thị này đã được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu bãi biển cát ở vùng ôn đới và cận nhiệt đới; tuy nhiên, trong luận án chúng được tách riêng thành một nhóm độc lập nhằm phân biệt rõ biến động theo mùa với biến động ngắn hạn do triều hoặc thời điểm thu nhận ảnh.

3. *Nhóm chỉ thị hình thái xói lở – bồi tụ hoạt động*, gồm 5 chỉ thị, phản ánh trạng thái mất cân bằng hình thái đang diễn ra của bờ biển. Các chỉ thị điển hình trong nhóm này là mép vách xói lở hiện tại, chân vách sạt lở, ranh giới bồi tụ mới, mép bãi bồi mới và đỉnh doi cát cửa sông. Các chỉ thị này kế thừa trực tiếp từ các nghiên cứu về động lực bờ và tiến hóa cửa sông, song được luận án tổ chức lại nhằm phục vụ đánh giá mức độ và xu thế biến động bờ biển trong các giai đoạn ngắn đến trung hạn, đặc biệt trong điều kiện chịu tác động mạnh của bão.

4. *Nhóm chỉ thị hình thái – sinh học*, gồm 4 chỉ thị, thể hiện mối quan hệ tương tác giữa hình thái bờ và thảm thực vật ven biển. Các chỉ thị như chân đụn cát cố định bởi thực vật, mép đụn cát ổn định có thực vật hay mép bãi ổn định nhờ thảm cỏ được phát triển trên cơ sở các nghiên cứu quốc tế về vai trò ổn định hình

thái của thực vật, đồng thời được điều chỉnh để phản ánh rõ hơn khả năng nhận dạng trên ảnh viễn thám độ phân giải cao và điều kiện phục hồi sinh thái sau bão tại Trung Bộ.

5. *Nhóm chỉ thị hình thái nhân sinh*, gồm 5 chỉ thị, phản ánh tác động trực tiếp của con người đến hình thái và vị trí đường bờ, tiêu biểu như mép kè biển, chân công trình chắn sóng, mép lấn biển, ranh giới san lấp ven biển và mép bãi nuôi bãi nhân tạo. Việc đưa nhóm chỉ thị này vào bộ chỉ thị nhằm tránh việc đồng nhất các ranh giới nhân tạo với đường bờ tự nhiên trong phân tích biến động, đồng thời làm rõ vai trò của các can thiệp nhân sinh trong thay đổi cân bằng trầm tích và động lực bờ.

6. *Nhóm chỉ thị sinh học – sinh thái*, gồm 8 chỉ thị, phản ánh trạng thái ổn định, suy giảm hoặc phục hồi của thảm thực vật ven biển, chẳng hạn như ranh giới thảm thực vật ổn định phía biển, ranh giới thực vật đụn cát, ranh giới phục hồi thực vật sau bão hay ranh giới rừng phòng hộ ven biển. Các chỉ thị này được kế thừa từ các nghiên cứu coi thảm thực vật là chỉ báo gián tiếp của đường bờ dài hạn, đồng thời được luận án cụ thể hóa cho điều kiện bờ cát thấp và vùng cửa sông Trung Bộ.

7. *Nhóm chỉ thị thủy động lực tức thời*, gồm 5 chỉ thị, như đường nước, ranh giới ướt – khô, mép sóng vỡ hay độ rộng bãi tức thời. Đây là các chỉ thị đã được sử dụng phổ biến trong các nghiên cứu viễn thám bờ biển; tuy nhiên, trong luận án chúng chỉ được sử dụng với vai trò hỗ trợ hiệu chỉnh và kiểm tra chéo, không được xem là các mốc ổn định cho so sánh biến động dài hạn.

8. *Nhóm chỉ thị cực đoan – bão*, gồm 7 chỉ thị, phản ánh trực tiếp phản ứng của bờ biển trước các sự kiện năng lượng cao, như đường tràn bão, phạm vi ngập bão, mép xói lở đột biến sau bão hay dải bồi tụ sau bão. Nhóm chỉ thị này thể hiện rõ tính đặc thù của vùng bờ Trung Bộ Việt Nam và được luận án nhấn mạnh như một nhóm chỉ thị quan trọng để đánh giá tính dễ bị tổn thương và khả năng phục hồi của bờ biển.

Xét về mức độ kế thừa và đóng góp khoa học, bộ chỉ thị đường bờ được xây dựng trong luận án thể hiện rõ định hướng kế thừa có chọn lọc – điều chỉnh theo bối cảnh – phát triển theo yêu cầu ứng dụng, trên cơ sở các nghiên cứu quốc tế đã được tổng quan ở các mục trước.

Nhóm chỉ thị kế thừa bao gồm các chỉ thị hình thái và sinh học kinh điển đã được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu biến động bờ biển trên thế giới. Tiêu biểu là các chỉ thị như đỉnh và chân đụn cát, mép đụn cát ổn định, đỉnh và chân vách đá, gờ bãi, đường bờ thực vật ổn định phía biển, đường nước tức thời và ranh giới ướt – khô. Đây là những chỉ thị đã được kiểm chứng trong nhiều bối cảnh địa lý khác nhau, từ bờ biển ôn đới đến nhiệt đới, và được xem là nền tảng trong phân

tích hình thái và động lực bờ biển. Việc giữ lại các chỉ thị này nhằm bảo đảm tính tương thích học thuật với các nghiên cứu trước, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho việc so sánh, đối chiếu và kiểm chứng kết quả nghiên cứu trong bối cảnh Trung Bộ Việt Nam.

Nhóm chỉ thị cải tiến thể hiện rõ sự điều chỉnh có chủ đích của luận án nhằm thích ứng với điều kiện vùng bờ nhiệt đới gió mùa và yêu cầu phân tích đa thời gian bằng viễn thám. Các chỉ thị như ranh giới xói lở cổ, chân đụn cát cổ, ranh giới rửa trôi thực vật, ranh giới thực vật theo mùa, giới hạn ổn định của thực vật ven biển hay dải bồi tụ sau bão được phát triển từ các khái niệm và chỉ thị đã tồn tại trong nghiên cứu quốc tế, nhưng được tái định nghĩa về nội hàm và cách nhận diện. Việc cải tiến tập trung nhấn mạnh khả năng phát hiện trên ảnh viễn thám độ phân giải cao, dữ liệu UAV và chuỗi ảnh đa thời gian, đồng thời làm rõ vai trò của các chỉ thị này trong việc hiệu chỉnh sai lệch do ảnh hưởng của mùa, triều và các sự kiện năng lượng cao. Những chỉ thị này đặc biệt phù hợp với bờ cát thấp, vùng cửa sông và các khu vực chịu tác động mạnh của bão nhiệt đới – là những dạng bờ điển hình ở Trung Bộ Việt Nam.

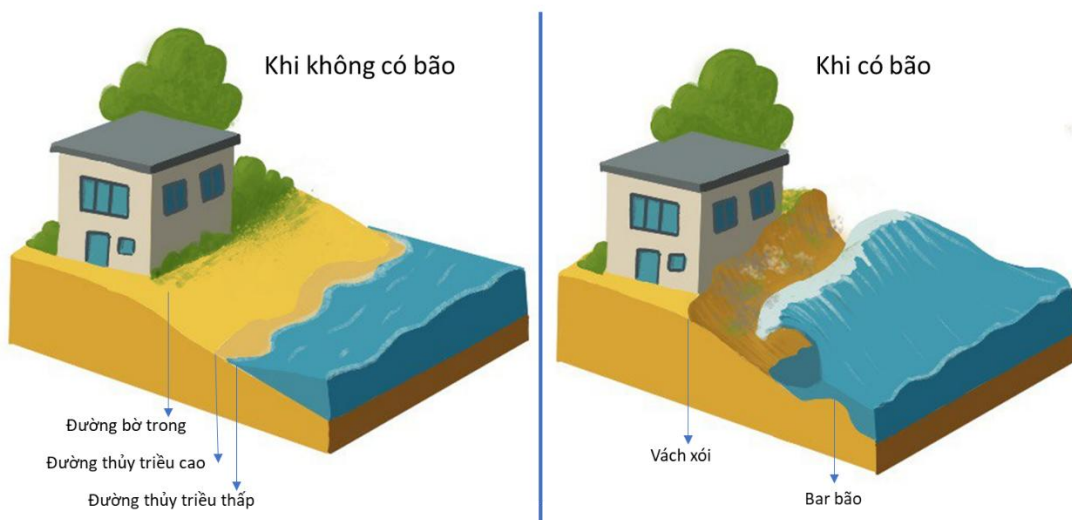
Nhóm chỉ thị mới, được luận án đề xuất và hệ thống hóa, tập trung vào việc phản ánh phản ứng tức thời và khả năng phục hồi của bờ biển trước các sự kiện cực đoan. Các chỉ thị như ranh giới phục hồi thực vật sau bão, mép xói lở đột biến sau bão, vết tích tràn bão nội địa, phạm vi ngập bão tổng hợp hay dải tác động bão chồng lấn không chỉ mở rộng phạm vi đánh giá từ “biến động hình thái” sang “tổn thương và phục hồi hình thái – sinh thái”, mà còn làm rõ dấu ấn không gian của các sự kiện cực đoan trong tiến hóa đường bờ. Đây là những chỉ thị chưa được hệ thống hóa đầy đủ trong các bộ chỉ thị truyền thống, đặc biệt trong bối cảnh nghiên cứu bờ biển nhiệt đới chịu tác động mạnh và lặp lại của bão, và do đó được xem là đóng góp khoa học quan trọng của luận án.

Tổng thể, việc phân loại rõ ràng các chỉ thị theo mức độ kế thừa, cải tiến và mới không chỉ làm nổi bật đóng góp phương pháp luận của nghiên cứu, mà còn tạo nền tảng linh hoạt cho việc lựa chọn, kết hợp và mở rộng bộ chỉ thị trong các nghiên cứu tiếp theo về biến động bờ biển bằng viễn thám, cũng như trong các ứng dụng quản lý và quy hoạch vùng bờ tại Việt Nam và các khu vực nhiệt đới tương tự.

Việc đề xuất các chỉ thị theo Phụ lục 3 cho phép giám sát biến động đường bờ chi tiết và chính xác. Nghiên cứu tổng hợp các chỉ thị sẽ cho thấy sự thay đổi môi trường ven biển theo thời gian. Độ chính xác của việc sử dụng các chỉ thị này phụ thuộc vào nguồn dữ liệu đầu vào và kinh nghiệm của người giải đoán đường bờ.

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và gia tăng tần suất các hiện tượng thời tiết cực đoan, nhu cầu xây dựng bộ chỉ thị phản ánh chính xác mức độ tác động lên

khu vực ven bờ ngày càng trở nên cấp thiết. Trong số các chỉ thị hình thái, đường bờ trong đóng vai trò đặc biệt quan trọng do đặc tính ổn định tương đối và mối liên hệ trực tiếp với các yếu tố kinh tế - xã hội ven biển. Trái ngược với đường bờ ngoài – vốn phản ánh sự dao động ngắn hạn của mực nước do thủy triều hay sóng ngắn hạn, đường bờ trong thể hiện giới hạn cuối cùng của vùng chịu tác động trực tiếp từ biển (Hình 1.5). Do đó, đường bờ trong có xu hướng phản ánh tác động tích lũy từ các quá trình xói lở nghiêm trọng như bão lớn hoặc nước biển dâng kéo dài.



Hình 1.5. Ảnh hưởng của sóng bão lên chỉ thị đường bờ trong và ngoài (Nguồn: Giang Tuấn Linh)

Sự dịch chuyển của đường bờ trong không chỉ là biểu hiện vật lý của quá trình xói lở mà còn là chỉ báo cho mức độ rủi ro đối với các tài sản, hạ tầng, và sinh kế ven biển. Vì vậy, việc lựa chọn đường bờ trong làm chỉ thị cốt lõi phản ánh quan điểm tiếp cận theo hướng phòng ngừa rủi ro và thích ứng dài hạn, thay vì chỉ mô tả biến động ngắn hạn của hệ thống bờ biển. Hiện nay, sử dụng viễn thám vệ tinh là một trong những cách tốt nhất để theo dõi các chỉ thị này tự động hoặc bán tự động. Nội dung này sẽ được phân tích cụ thể hơn ở phần sau.

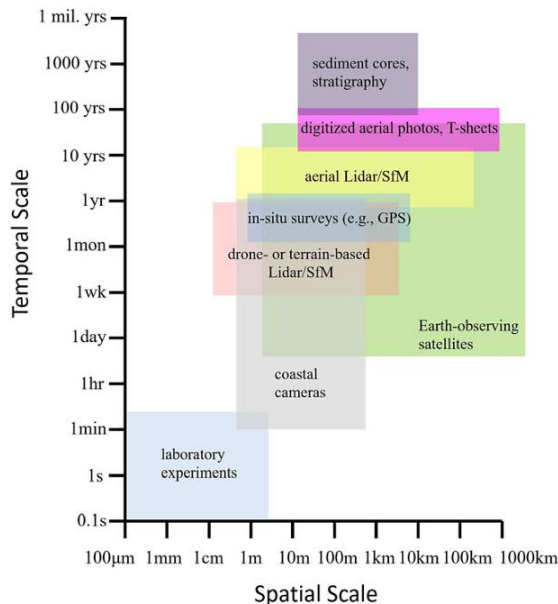
1.3.2. Vai trò của viễn thám trong nghiên cứu biến động đường bờ

Viễn thám là lĩnh vực khoa học công nghệ, cho phép nghiên cứu, thu thập các thông tin về các đối tượng địa lý mà không cần tiếp xúc trực tiếp với chúng. Sóng điện từ hoặc được phản xạ hoặc được bức xạ từ vật thể thường là nguồn tài nguyên chủ yếu trong viễn thám. Thiết bị dùng để cảm nhận sóng điện từ phản xạ hay bức xạ vật thể được gọi là bộ cảm. Viễn thám có thể thu được dữ liệu ở nhiều độ phân giải không gian khác nhau (Hình 1.6). Hình ảnh có thể phát hiện các đặc điểm trong phạm vi kích thước từ hàng chục đến hàng trăm mét hoặc lớn hơn. Bên cạnh đó, vai trò của công nghệ viễn thám trong nghiên cứu về bờ biển ngày càng

trở nên quan trọng dưới áp lực của biến đổi khí hậu toàn cầu, bảo tồn, phát triển kinh tế, và quản lý vùng ven biển. Viễn thám sử dụng các cảm biến từ vệ tinh/ máy bay để thu thập các đặc điểm tự nhiên, quan sát bề mặt bờ biển trên cơ sở có hệ thống, theo dõi những thay đổi của chúng theo thời gian, và tích hợp với các thông tin khác để hỗ trợ việc ra quyết định.

a) Sự đa dạng của dữ liệu viễn thám trong nghiên cứu bờ biển

Mặc dù hiện nay, việc sử dụng dữ liệu miễn phí là một giải pháp tối ưu cho các nguyên cứu khoa học cơ bản, nhiều dạng dữ liệu viễn thám khác vẫn đang được thu nhận hiện nay (Hình 1.6). Tuy nhiên, việc bổ sung dữ liệu từ nhiều nguồn khác không phải lúc nào cũng đảm bảo, do có sự khác biệt về loại dữ liệu, độ phân giải không gian lẫn thời gian. Điều này gây khó khăn cho việc tích hợp và giảm độ chính xác của phân tích. Dưới đây, luận án sẽ mô tả ngắn gọn một số nguồn dữ liệu phổ biến trên thế giới đã và đang được sử dụng trong việc giải đoán đường bờ:



Hình 1.6. Dữ liệu trong nghiên cứu biến động đường bờ [180]

Trong thập kỷ qua, việc sử dụng nhiều loại cảm biến trên máy bay, vệ tinh đã trở nên phổ biến để thu thập thông tin về không gian và thời gian trong các nghiên cứu và quản lý ven biển (Bảng 1.1). Mỗi loại vệ tinh sẽ được lắp các cảm biến khác nhau, qua đó có sự khác biệt giữa các tín hiệu truyền và nhận tới các đối tượng trên đất liền và mặt nước. Dưới đây là một số loại ảnh và cảm biến phổ biến được sử dụng trong việc xác định đường bờ:

Ảnh hàng không: Ảnh hàng không đã được thu thập dọc theo các vùng bờ biển trên toàn thế giới từ những năm 1920, nhưng chỉ đến cuối thập niên 1930 mới có thể tiến hành phân tích lập thể. Các bức ảnh này cung cấp thông tin không gian

tốt, dù phạm vi thời gian còn hạn chế do chỉ ghi nhận ở một số khu vực cụ thể. Nhờ khả năng ghi nhận ngay sau các cơn bão, ảnh hàng không có thể thể hiện rõ vị trí đường bờ, tuy nhiên việc xác định ranh giới đường bờ vẫn phụ thuộc nhiều vào trực quan của người giải đoán. Ảnh hàng không thường bị biến dạng do ảnh hưởng của độ cao bay, góc chụp và khoảng cách từ máy bay đến địa vật, nên cần được chỉnh sửa hình học cẩn thận trước khi phân tích. Ảnh máy bay kỹ thuật số hiện đại cho phép lập thể hóa ba chiều, hỗ trợ cung cấp thông tin độ cao tham chiếu, từ đó giúp xác định chính xác đường bờ dựa trên dữ liệu thủy triều.

Ảnh đa phổ/ siêu phổ: Ảnh vệ tinh đa phổ thường được lựa chọn để giám sát liên tục các vấn đề môi trường và tài nguyên bờ biển trên toàn cầu. Loại ảnh này có độ phân giải tầm trung. Nhiều dữ liệu được cung cấp miễn phí, phổ biến nhất là Landsat và Sentinel với ưu thế độ bao phủ rộng và thu nhận liên tục. Nhờ thu nhận thông tin đa phổ, nhiều chỉ số viễn thám được phát triển để phân biệt giữa các đối tượng đất và nước như các chỉ số: NDVI, NDWI, hay NDMI. Nhược điểm của nguồn dữ liệu này khi nghiên cứu giải đoán đường bờ trong là độ phân giải pixel chưa đủ cao và bị ảnh hưởng bởi yếu tố thời tiết, tạo ra nhiều sai số.

Gần đây, một số ảnh quang học có độ phân giải cao từ các vệ tinh thương mại như IKONOS và Quickbird đã trở thành lựa chọn thay thế cho ảnh hàng không và ảnh đa phổ. Với dữ liệu viễn thám độ phân giải tầm trung, một số phương pháp được đề xuất để xác định đường bờ bằng cách quan sát thủy triều [102]. Cách tiếp cận đầu tiên liên quan đến việc sử dụng mô hình không gian - thời gian và dữ liệu đo đạc để xác định đường bờ từ nhiều đoạn bờ biển. Cách tiếp cận thứ hai là sử dụng các giao điểm của mô hình độ cao khu vực ven biển (bao gồm DEM nội địa và độ sâu) cùng với mô hình thể hiện các mực nước trung bình của thủy triều thấp nhất trong ngày hoặc mực nước triều cao trung bình để tạo ra đường bờ. Kaichang và cộng sự (2003) đã sử dụng ảnh 3 chiều từ ảnh IKONOS để trích xuất đường bờ biển [94]. Đường bờ sau đó được số hoá thủ công trước khi so với đường bờ thực tế, đặc biệt là dữ liệu thủy triều. G.M.Foody và cộng sự (2005) đã áp dụng công nghệ số để phân loại và lập bản đồ các đường bờ biển [79]. So sánh sự khác biệt giữa kết quả giải đoán đường bờ từ ảnh độ phân giải cao IKONOS và các ảnh khác có độ phân giải trung bình, thì kết quả đáp ứng tiêu chuẩn cho bản đồ đường bờ biển tỷ lệ từ 1:2,000 đến 1:5,000.

Cách tiếp cận khác là sử dụng đa nguồn dữ liệu để lập bản đồ đường biển. Yếu tố thủy triều cần được xem xét khi sử dụng các hình ảnh có độ phân giải kém hơn để xác định đường bờ. S. Andrefouet và cộng sự (2003) đã chỉ ra rằng việc

trộn lẫn quang phổ do độ đục của nước và bọt sóng phụ thuộc vào bước sóng cũng hạn chế việc xác định đường bờ [36].

Công nghệ LIDAR:

LIDAR là công nghệ viễn thám chủ động và khảo sát các đối tượng bằng cái tia laser. Công nghệ này hoạt động bằng cách phát ra một tia laser đến đối tượng và sau đó đo thời gian tia laser này phản chiếu lại. Đây là phép đo khoảng cách tới đối tượng bằng tia laser và đo xung phản xạ bằng một cảm biến, do đó có thể quét hàng trăm km biển trong thời gian ngắn và có độ chính xác cao. Điều này đặc biệt quan trọng khi cần đo vẽ lại đường bờ trước và sau bão. Tuy nhiên, dữ liệu LIDAR thường bị hạn chế về mặt chi phí cao. Do đó các nhà khoa học và quản lý khó có thể thu thập đủ dữ liệu để phân tích trên các khu vực đường bờ dài và liên tục. Trong nghiên cứu của Boak và Turner (2005), nhóm tác giả đã tổng hợp nguyên tắc cơ bản về việc sử dụng dữ liệu LIDAR để đo độ cao địa hình ven biển [49].

Đường bờ được thu thập từ dữ liệu LIDAR có thể dùng để xác định mốc thủy triều, giải quyết các vấn đề liên quan đến ranh giới khu vực ướt/khô trên ảnh hàng không. Công nghệ LIDAR của NASA sử dụng tia laser xanh lục (532nm) để đồng thời ánh xạ độ sâu của bờ biển, địa hình bề mặt và cấu trúc thảm thực vật. Dữ liệu này có thể cho thông tin chi tiết về độ sâu gần bờ và địa hình bãi biển trong một khu vực lớn. Nghiên cứu của H.Liu và cộng sự (2007) đã đề xuất việc xử lý ảnh tự động để trích xuất dữ liệu đường bờ từ dữ liệu LIDAR bằng cách kết hợp với LIDAR DEM và mốc thủy triều [104]. Tuy nhiên phương pháp này vẫn chưa được triển khai nhiều trong thực tế.

Bảng 1.1. Các ảnh viễn thám độ phân giải cao/trung trong xác định đường bờ

Loại	Phạm vi không gian	Phân giải không gian	Phạm vi thời gian	Phân giải thời gian	Độ chính xác	Nguồn
Ảnh UAV	1–5km	~0.5m	~5 năm	Hàng tháng/hàng năm	~0.5m	[140,175]
Ảnh hàng không	~100km	~0.5m	Thập kỷ	1–5 năm	1–5m	[80]
Lidar	~100km	~0.1m	Thập kỷ	Hàng năm	~0.5m	[112]
Ảnh vệ tinh (Landsat/Sentinel-2)	Toàn cầu	15—30m	36 năm	2 tuần	~10–15m	[106,130]

Cubesats (PlanetScope)	Toàn cầu	3m	5 năm	Hàng ngày	~5m	[66]
---------------------------	-------------	----	-------	-----------	-----	------

Ảnh SAR (RADAR)

Kể từ khi vệ tinh Seasat ra mắt vào năm 1978, ảnh SAR đã trở thành một trong những lựa chọn trong việc khai thác đường bờ biển. Công nghệ radar sử dụng sóng radio để phát hiện và đo khoảng cách, góc độ và tốc độ của các đối tượng tương tự như LIDAR, nhưng thay vì sử dụng tia laser, công nghệ này sử dụng sóng. Mặc dù có cách tiếp cận khác nhau, nhưng hai công nghệ này đều nhằm mục đích đo đạc thông tin của các điểm trên mặt đất dựa vào chu kỳ và cường độ của tín hiệu phản hồi. Công nghệ RADAR có thể quét các đoạn bờ dài và rộng, nhưng việc quét và xử lý dữ liệu đòi hỏi chi phí khá cao. Dữ liệu điểm độ cao thu được từ RADAR có thể chuyển đổi thành mô hình số, cung cấp thông tin chi tiết về đường bờ và các biến động của thủy triều. Trong nghiên cứu của Lee và Jurkevich (1990), các tác giả đã áp dụng phương pháp phát hiện cạnh (edge detection) kết hợp với phương pháp dò cạnh để trích xuất đường bờ [93]. Nhóm tác giả đã lưu ý rằng tín hiệu RADAR phản chiếu từ bề mặt biển chịu ảnh hưởng lớn từ trạng thái của biển khi chụp ảnh, sóng và gió có thể làm thay đổi bề mặt bờ biển. Điều này khiến cho việc dự đoán đường bờ từ ảnh RADAR thường kém chính xác. Niedermeier et al. (2000) đã đề xuất một thuật toán phát hiện sóng và đường bờ ngoài dựa trên các dữ liệu RADAR [120]. Yu và Acton (2004) đã phân định đường bờ ngoài bằng việc sử dụng một công cụ khuếch tán dị hướng làm giảm nhiễu đốm trên ảnh RADAR [194].

Ảnh UAV

Trong những năm gần đây, công nghệ bay chụp ảnh bằng thiết bị bay không người lái (UAV) đã có bước phát triển vượt bậc, trở thành một công cụ hiệu quả trong giám sát và đánh giá biến động đường bờ. Các UAV được trang bị máy ảnh kỹ thuật số độ phân giải cao có khả năng thu nhận hình ảnh, video chi tiết và dữ liệu địa hình, bao gồm cả mô hình số bề mặt (DSM) và mô hình số địa hình (DEM). Ngoài ra, nhiều hệ thống UAV hiện đại còn tích hợp khả năng chụp ảnh đa phổ, hỗ trợ phân tích lớp phủ bề mặt, thăm thực vật ven biển hoặc các khu vực bị xói mòn.

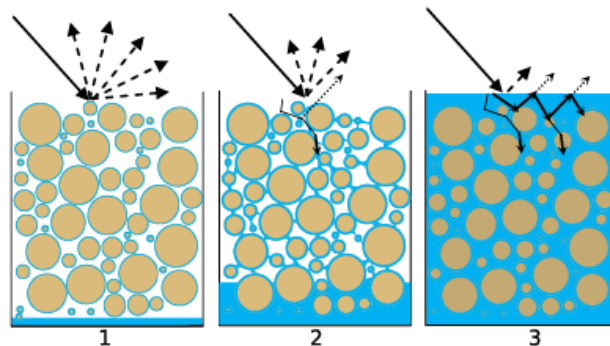
Dữ liệu UAV có thể được xử lý bằng các thuật toán quang học nhằm trích xuất chính xác vị trí, hình dạng và biến động của đường bờ theo thời gian. So với ảnh hàng không truyền thống, ảnh UAV có nhiều ưu thế về độ phân giải không gian và tính linh hoạt trong thu thập dữ liệu. Người vận hành UAV có thể chủ động lựa chọn thời điểm và phạm vi chụp ảnh, đặc biệt hữu ích khi cần khảo sát nhanh trước và sau các sự kiện cực đoan như bão hoặc triều cường. Trên thế giới, UAV

đã được sử dụng hiệu quả trong nhiều nghiên cứu: tại Hà Lan để đo xói lở và bồi tụ cồn cát ven biển; tại Nhật Bản trong giám sát đường bờ sau sóng thần; và tại Úc trong phân tích biến động bờ cát theo mùa. Những ứng dụng này cho thấy UAV là công cụ hiệu quả trong theo dõi, đo vẽ đường bờ chính xác, hỗ trợ phân tích hình thái bờ biển và quản lý vùng bờ một cách chủ động, kịp thời.

b) Vai trò của phổ phản xạ trong dữ liệu viễn thám

Phổ phản xạ từ các đối tượng trên mặt đất, được các vệ tinh thu nhận là những thông tin quan trọng trong việc phân tích và giám sát các đối tượng tự nhiên, bao gồm bãi biển. Phổ phản xạ được hình thành từ sự tương tác của ánh sáng với bề mặt vật liệu, phản ánh các đặc điểm vật lý và hóa học như màu sắc, độ ẩm, cấu trúc và thành phần vật chất. Các dữ liệu phổ này, khi được thu thập từ cảm biến vệ tinh hoặc UAV, tạo thành các kênh ảnh chứa các thông tin được mã hóa, giúp công tác giải đoán đường bờ tại các không gian và thời gian khác nhau trên bãi biển.

Bãi biển, với các thành phần như cát, thực vật, nước và cấu trúc nhân tạo, đều có đặc điểm phổ riêng biệt. Phổ phản xạ của cát thường có giá trị cao ở vùng phổ khả kiến và cận hồng ngoại, trong khi nước hoặc cát ẩm có phổ phản xạ thấp và thể hiện sự hấp thụ mạnh ở các bước sóng dài hơn. Thực vật ven biển thường có dấu hiệu phổ rõ rệt với cửa sổ khí quyển mở ở vùng cận hồng ngoại, giúp phân biệt chúng với các vật liệu khác. Những đặc trưng phổ này là cơ sở để xác định các loại đối tượng, phân vùng bãi biển và phát hiện những thay đổi theo thời gian. Thí nghiệm quang phổ [122] trong phòng cho thấy độ phản xạ quang học của cát bãi biển có sự biến thiên rõ rệt dưới các điều kiện độ ẩm bề mặt khác nhau (Hình 1.7). Cụ thể, khi độ ẩm tăng, độ phản xạ giảm theo xu hướng phi tuyến, đặc biệt rõ rệt tại các bước sóng hồng ngoại gần (NIR) và hồng ngoại sóng ngắn (SWIR) – nơi nước có các đỉnh hấp thụ mạnh, điển hình tại 1470 nm và 1940 nm.



Hình 1.7. Phản xạ ánh sáng ở khu vực bờ biển cát khô tới khu vực cát ẩm [122]

Kết quả đo thực nghiệm [122] cho thấy các đường cong phản xạ của cát ẩm có độ ổn định cao trong vùng phổ từ 400–2100 nm, với hệ số tương quan R^2 lên

tới 0.997. Điều này khẳng định độ ẩm là yếu tố quyết định chính ảnh hưởng đến phản xạ phổ, qua đó cung cấp nền tảng lý thuyết để phát triển các mô hình giải đoán viễn thám. Từ góc độ ứng dụng, việc sử dụng cảm biến viễn thám tại các bước sóng như 1550 nm đã chứng minh khả năng tạo bản đồ độ ẩm bề mặt với độ chính xác cao (sai số chuẩn chỉ 2.6%). Các kết quả trên khẳng định hiệu quả của kỹ thuật quang phổ – đặc biệt là ở vùng NIR và SWIR – đóng vai trò quan trọng trong việc giải đoán bờ cát.

Như vậy, việc sử dụng phổ viễn thám trong phân tích bãi biển mang lại nhiều lợi ích. Thông tin này cho phép nhận diện chính xác các thành phần và đặc trưng của bãi biển, từ đó hỗ trợ trong việc phân loại và lập bản đồ khu vực. Dữ liệu phổ có thể được tích hợp vào các mô hình học máy để tự động hóa quá trình phân tích, giảm thiểu sai số và nâng cao hiệu suất trong giám sát.

1.3.3 Các yếu tố ảnh hưởng đến việc xác định đường bờ trên ảnh viễn thám

Việc xác định đường bờ biển trên ảnh viễn thám là một vấn đề phức tạp, chịu tác động đồng thời của nhiều nhóm yếu tố tự nhiên, đặc điểm bề mặt, điều kiện dữ liệu viễn thám, các tác động nhân sinh cũng như cách tiếp cận và quan điểm phương pháp luận của nghiên cứu. Trên thực tế, không tồn tại một ranh giới đường bờ duy nhất mang tính tuyệt đối; thay vào đó, đường bờ được thể hiện khác nhau tùy thuộc vào trạng thái động lực vùng bờ tại thời điểm thu nhận ảnh và cách thức định nghĩa đường bờ trong từng nghiên cứu cụ thể.

a) Các yếu tố tự nhiên và động lực vùng bờ

Trong số các yếu tố tự nhiên vùng bờ, thủy triều là một trong những yếu tố động lực quan trọng nhất ảnh hưởng đến việc xác định đường bờ trên ảnh viễn thám. Chu kỳ lên xuống của thủy triều làm thay đổi đáng kể vị trí ranh giới đất – nước, đặc biệt đối với đường bờ ngoài, vốn thường được xác định dựa trên ranh giới tức thời giữa mặt nước và bãi biển. Sự dao động mực nước triều không chỉ làm dịch chuyển vị trí đường bờ theo thời gian mà còn ảnh hưởng đến độ rộng bãi triều, dẫn đến sự khác biệt rõ rệt về hình thái không gian bãi biển trên ảnh viễn thám thu nhận ở các thời điểm khác nhau.

Đối với đường bờ trong, vai trò của thủy triều có tính chất khác biệt. Trong nhiều cách tiếp cận địa mạo, đường bờ trong được xác định là ranh giới cao nhất mà sóng trong điều kiện cực đoan (bão, triều cường kết hợp sóng lớn) tác động vào bờ, thường gắn với ranh giới thảm thực vật ổn định không bị sóng phá hủy. Trong những trường hợp này, thủy triều không còn là yếu tố quyết định trực tiếp

đến vị trí đường bờ trong. Tuy nhiên, tại các khu vực có bãi biển rất hẹp, bờ kè hoặc bờ đá, mực triều cao trung bình có thể xấp xỉ hoặc trùng với ranh giới tác động cực đại của sóng. Khi đó, mực triều cao trung bình có thể được xem là một chỉ thị thay thế cho đường bờ trong. Việc hiểu đúng vai trò và giới hạn áp dụng của yếu tố thủy triều là cần thiết để tránh sai lệch trong phân tích biến động đường bờ.

Mặc dù vậy, công tác thu nhận ảnh và giải đoán đường bờ từ ảnh viễn thám, cả đường bờ trong và đường bờ ngoài, vẫn chịu ảnh hưởng đáng kể của trạng thái thủy triều tại thời điểm chụp. Khi thủy triều dâng cao, nước lấn sâu vào đất liền làm bờ biển thu hẹp; ngược lại, khi thủy triều xuống thấp, bãi bồi lộ ra làm bờ biển mở rộng về phía biển. Sự khác biệt này có thể gây ra sai lệch lớn khi phân tích chuỗi ảnh đa thời gian nếu không được xem xét và hiệu chỉnh phù hợp, đặc biệt trong trường hợp ảnh vệ tinh được thu nhận ở các pha triều khác nhau hoặc trong các mùa có biên độ triều biến đổi lớn. Do chu kỳ quét cố định của các vệ tinh như Landsat hoặc Sentinel, việc thu nhận ảnh thường không đồng bộ với chu kỳ thủy triều, dẫn đến nguy cơ nhầm lẫn giữa biến động mực nước tức thời và biến động hình thái thực sự của đường bờ.

Ngoài thủy triều, sóng và các quá trình động lực biển cũng có ảnh hưởng mạnh đến hình thái và vị trí đường bờ, đặc biệt là đường bờ ngoài. Sóng biển, nhất là trong điều kiện gió mùa hoặc bão, có khả năng tái phân bố vật liệu trầm tích trong thời gian ngắn, làm thay đổi hình dạng bãi biển và ranh giới đất – nước. Trên ảnh viễn thám, tác động của sóng thường thể hiện thông qua vùng nước đục, bọt sóng hoặc dải bề mặt ướt trên bãi cát, gây khó khăn cho việc xác định chính xác ranh giới đường bờ nếu chỉ dựa vào đặc trưng phổ tại một thời điểm. Đối với đường bờ trong, tác động của sóng mang tính sự kiện, thể hiện rõ qua các dấu hiệu hình thái như vết xói lở, ranh giới thảm thực vật bị phá hủy hoặc ranh giới địa hình ổn định hơn, cho phép nhận dạng đường bờ trong dựa trên các chỉ thị hình thái thay vì trạng thái mực nước tức thời.

b) Đặc điểm địa mạo, vật liệu bờ và lớp phủ bề mặt

Đặc điểm địa mạo bờ biển và vật liệu cấu tạo bờ chi phối mạnh đến khả năng nhận dạng đường bờ trên ảnh viễn thám. Các bãi biển có độ dốc thoải và vật liệu mịn thường có vùng dao động âm – khô rộng, khiến ranh giới giữa đất liền và mặt nước trở nên mờ và khó xác định. Ngược lại, các bãi biển dốc, bờ đá hoặc bờ kè nhân tạo thường có ranh giới hình thái rõ ràng hơn, thuận lợi cho việc xác định cả đường bờ trong và đường bờ ngoài, ngay cả trên ảnh viễn thám quang học.

Thảm thực vật ven bờ là một yếu tố đặc biệt quan trọng trong xác định đường bờ trong. Ranh giới giữa thảm thực vật ổn định và khu vực chịu tác động

thường xuyên của sóng, gió và xâm nhập mặn thường được xem là chỉ thị đáng tin cậy cho đường bờ trong. Trên ảnh viễn thám độ phân giải cao, sự khác biệt về màu sắc, kết cấu và mức độ đồng nhất bề mặt giữa khu vực có và không có thảm thực vật giúp nhận dạng tương đối rõ ràng ranh giới này. Tuy nhiên, sự phân bố không đồng đều của thảm thực vật, quá trình suy thoái sinh thái hoặc thay đổi loại hình sử dụng đất ven bờ có thể làm mờ ranh giới tự nhiên, gây khó khăn cho việc xác định đường bờ trong theo nghĩa địa mạo.

Độ ẩm bề mặt và trạng thái bề mặt bãi triều cũng ảnh hưởng đáng kể đến khả năng giải đoán đường bờ. Các khu vực cát ẩm, bùn hoặc bãi triều ngập nước nông thường có đặc trưng phản xạ phổ gần giống với mặt nước, dẫn đến nguy cơ nhầm lẫn khi xác định đường bờ ngoài, đặc biệt trên ảnh viễn thám quang học độ phân giải trung bình.

c) Các yếu tố liên quan đến dữ liệu và kỹ thuật viễn thám

Việc xác định đường bờ còn chịu ảnh hưởng mạnh của độ phân giải không gian, độ phân giải phổ, thời điểm thu nhận ảnh và điều kiện khí quyển. Ảnh viễn thám độ phân giải trung bình như Landsat hoặc Sentinel-2 phù hợp cho phân tích biến động đường bờ ở quy mô khu vực và dài hạn, song gặp hạn chế trong việc nhận diện chi tiết đường bờ trong tại các khu vực bãi biển hẹp hoặc bờ biển bị chia cắt mạnh. Ngược lại, ảnh viễn thám độ phân giải cao, bao gồm ảnh UAV và ảnh vệ tinh thương mại hoặc nguồn GE, cho phép nhận dạng rõ ràng hơn các yếu tố hình thái và bề mặt liên quan đến đường bờ trong, nhưng lại đặt ra thách thức về tính đồng nhất dữ liệu và khả năng so sánh chuỗi thời gian.

d) Các yếu tố nhân sinh

Các hoạt động nhân sinh ven biển như xây dựng kè, cảng biển, khu du lịch, đường giao thông ven bờ và khai thác vật liệu đã làm thay đổi mạnh mẽ hình thái tự nhiên của đường bờ. Sự xuất hiện của các công trình nhân tạo có thể tạo ra các ranh giới bờ biển mới, làm thay đổi đặc trưng phản xạ bề mặt và gây khó khăn cho việc xác định đường bờ theo nghĩa tự nhiên, đặc biệt là đường bờ trong. Trong nhiều trường hợp, đường bờ nhân tạo không phản ánh đầy đủ mức độ tác động của các quá trình động lực biển, dẫn đến sự khác biệt giữa biến động hình thái thực tế và biến động thể hiện trên ảnh viễn thám.

e) Yếu tố phương pháp luận và cách tiếp cận nghiên cứu

Cuối cùng, yếu tố phương pháp luận và cách tiếp cận nghiên cứu đóng vai trò quyết định trong việc “định nghĩa” và lựa chọn loại đường bờ được xác định trên ảnh viễn thám. Việc lựa chọn đường bờ ngoài, đường bờ trung bình hay đường bờ trong phản ánh quan điểm khoa học và mục tiêu nghiên cứu khác nhau. Trong

bồi cảnh nghiên cứu biến động đường bờ phục vụ quản lý tổng hợp vùng bờ, cách tiếp cận dựa trên đường bờ trong cho phép giảm thiểu ảnh hưởng ngắn hạn của thủy triều và sóng, đồng thời phản ánh tốt hơn ranh giới ổn định tương đối giữa đất liền và vùng chịu tác động thường xuyên của biển.

Như vậy, việc xác định đường bờ trên ảnh viễn thám không chỉ là một bài toán kỹ thuật, mà là một vấn đề mang tính lý luận, gắn liền với hiểu biết về động lực vùng bờ, đặc điểm địa mạo, tác động nhân sinh và định hướng tiếp cận nghiên cứu. Nhận thức đầy đủ các yếu tố ảnh hưởng này là cơ sở khoa học quan trọng cho việc lựa chọn phương pháp, chỉ thị và quy trình phân tích được trình bày trong các chương tiếp theo của luận án.

1.3.4. Khả năng ứng dụng ảnh viễn thám độ phân giải cao (UAV và ảnh từ nguồn GE) và mô hình học máy trong nghiên cứu, giám sát biến động đường bờ

1.3.4.1. Khả năng ứng dụng ảnh viễn thám độ phân giải cao trong giám sát biến động bờ biển

Trong giám sát bờ biển, ảnh UAV RGB có thể ghi nhận các thay đổi về địa hình và hình thái đường bờ, giúp đánh giá quá trình xói lở, bồi tụ cũng như tác động của các yếu tố tự nhiên và nhân tạo. Mặc dù loại ảnh này không có thông tin về dải phổ như các ảnh vệ tinh như Sentinel 2 hay Landsat nhưng nhờ độ phân giải không gian cao, ảnh UAV có thể phát hiện những biến đổi nhỏ mà các ảnh vệ tinh tầm trung khó có thể nhận diện. Ảnh từ UAV thường có độ phân giải dao động từ vài cm đến vài dm, tùy thuộc vào độ cao bay và thiết bị cảm biến. Điều này cho phép phân loại chính xác các đối tượng trên bề mặt bờ biển, bao gồm cát, nước, thảm thực vật và công trình xây dựng. Bằng cách sử dụng các thuật toán xử lý ảnh và học máy, ảnh UAV có thể hỗ trợ phân đoạn khu vực bờ biển thành các lớp thông tin có ý nghĩa, phục vụ cho công tác quy hoạch và bảo vệ môi trường. Điều này đặc biệt quan trọng trong các khu vực có bờ biển động lực mạnh, nơi các thay đổi diễn ra nhanh chóng và có ảnh hưởng lớn đến sinh thái và phát triển kinh tế - xã hội.

Bên cạnh đó, ảnh UAV RGB còn được ứng dụng rộng rãi trong việc giám sát các hoạt động ven bờ, như đánh bắt cá, phát triển du lịch và xây dựng cơ sở hạ tầng. Các dữ liệu này giúp cơ quan quản lý có thể tổng hợp nhanh các vấn đề hiện trạng sử dụng đất, từ đó đưa ra các quyết định phù hợp nhằm đảm bảo phát triển bền vững. So với các phương pháp truyền thống như đo đạc thực địa hoặc sử dụng ảnh vệ tinh, UAV mang lại ưu thế về tốc độ thu thập dữ liệu, chủ động thời gian

thu nhận dữ liệu, dễ dàng tiếp cận các khu vực khó khăn và giảm thiểu tác động tới môi trường.

Một hệ thống UAV cơ bản bao gồm khung máy bay, hệ thống đẩy, bộ điều khiển tự động trên máy bay và trạm điều khiển mặt đất. Hai loại nền tảng UAV phổ biến nhất là UAV đa rotor (thường có 4, 6 hoặc 8 cánh quạt cố định) và UAV cánh cố định. UAV đa rotor có khả năng cơ động cao hơn so với UAV cánh cố định nhưng thường có thời gian bay ngắn hơn. UAV có thể được điều khiển từ xa bằng thiết bị điều khiển vô tuyến (trạm điều khiển mặt đất) hoặc bay tự động nhờ vào bộ điều khiển tự động trên máy bay. Bộ điều khiển tự động có khả năng theo dõi đường bay được lập trình trước bằng cách xử lý dữ liệu vị trí và góc nghiêng từ hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu (GNSS) và bộ đo lường quán tính (IMU). Trạm điều khiển mặt đất nhận dữ liệu chuyến bay như vị trí máy bay, độ cao, tốc độ và tình trạng pin thông qua liên kết vô tuyến. Người vận hành theo dõi các thông số bay trong suốt chuyến bay và có thể giành quyền kiểm soát thủ công bất cứ lúc nào. Các biện pháp an toàn được tích hợp vào hầu hết các UAV đa rotor nhằm giảm thiểu nguy cơ gặp sự cố do pin yếu hoặc mất liên lạc với trạm điều khiển mặt đất. UAV có thể tự động quay về vị trí xuất phát hoặc hạ cánh nếu mất tín hiệu hoặc nếu pin giảm xuống dưới một mức giới hạn cài đặt trước. Các tính năng an toàn bổ sung như phát hiện và tránh chướng ngại vật đang được cải tiến, giúp mở rộng ứng dụng của UAV và thúc đẩy việc áp dụng công nghệ này trong các nghiên cứu kỹ thuật.

Ảnh thu thập từ UAV có thể được xử lý bằng phần mềm quan trắc dựa trên kỹ thuật “Cấu trúc từ Chuyển động” (Structure-from-Motion - SfM) để tạo ra ảnh trực giao có độ phân giải cao và dữ liệu độ cao có độ chính xác tương đương với các khảo sát đo đạc mặt đất. SfM là quá trình tính toán bề mặt 3D từ các hình ảnh 2D chụp từ các góc nhìn khác nhau. Để trích xuất thông tin 3D từ ảnh 2D, trước tiên cần căn chỉnh tập hợp hình ảnh bằng cách sử dụng các thuật toán quan trắc. Các bước bao gồm phát hiện và trích xuất điểm đặc trưng, đối sánh các điểm tương đồng giữa các ảnh, xác định hướng tương đối của cặp ảnh, lọc nhiễu và điều chỉnh theo mô hình khối tổng thể.

Quy trình này thường được thực hiện bằng cách lập kế hoạch bay UAV theo mô hình “lưới cắt cỏ” để thu thập ảnh chồng lấn. Phần mềm lập kế hoạch chuyến bay chuyên dụng giúp tối ưu hóa đường bay dựa trên độ cao bay, thông số ống kính máy ảnh và mức độ chồng ảnh mong muốn (ảnh hưởng đến độ phân giải kết quả). Các tham số này được điều chỉnh để tối ưu hóa diện tích khảo sát trên mỗi lần sạc pin. Sau khi lập kế hoạch bay, đường bay có các điểm tham chiếu sẽ được

tải lên UAV. UAV sẽ tự động khởi động động cơ, cất cánh, bay đến độ cao thích hợp và điểm bắt đầu theo dõi khu vực quan trắc. Trong quá trình bay, UAV sẽ tự động chụp ảnh (orthophoto). Sau khi hoàn thành đường bay hoặc khi mức pin thấp, UAV sẽ quay lại điểm xuất phát để hạ cánh. Ảnh trực giao thu được từ UAV được tự động gán tọa độ địa lý. Các điểm kiểm soát mặt đất (GCP) có thể được thiết lập xung quanh khu vực khảo sát để tăng độ chính xác vị trí. Độ chính xác của sản phẩm dữ liệu đầu ra thường dưới 0,1 m, phù hợp với nhiều nghiên cứu kỹ thuật bờ biển.

Song song với ảnh UAV, ảnh viễn thám độ phân giải cao từ nguồn GE ngày càng được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu giám sát và đánh giá biến động đường bờ biển, đặc biệt tại các khu vực ven biển có mức độ biến động nhanh và chịu tác động mạnh của các hoạt động nhân sinh. GE là nền tảng tổng hợp ảnh viễn thám từ nhiều nguồn vệ tinh và ảnh hàng không thương mại khác nhau, cung cấp chuỗi ảnh có độ phân giải không gian cao, phổ biến trong khoảng 0,3–1,0 m, phủ trùm rộng và dễ dàng tiếp cận. Độ phân giải không gian cao của ảnh GE cho phép nhận dạng rõ ràng các yếu tố hình thái đường bờ như mép thực vật, ranh giới bãi cát – mặt nước, công trình ven bờ và các dấu hiệu xói lở cục bộ. Điều này đặc biệt hữu ích trong việc xác định đường bờ trong, vốn thường gắn với ranh giới thảm thực vật hoặc các yếu tố hình thái ổn định hơn so với đường bờ ngoài chịu ảnh hưởng trực tiếp của thủy triều.

Ưu thế nổi bật của ảnh GE trong nghiên cứu biến động đường bờ là phạm vi không gian bao phủ lớn, cho phép theo dõi liên tục toàn bộ đường bờ biển ở quy mô khu vực và liên vùng mà không bị giới hạn bởi phạm vi bay chụp như ảnh UAV. Điều này đặc biệt quan trọng đối với các nghiên cứu đánh giá đường bờ kéo dài hàng chục đến hàng trăm kilômét. Một lợi thế quan trọng khác của ảnh GE là khả năng truy xuất chuỗi ảnh đa thời gian. Người sử dụng có thể tiếp cận các ảnh chụp tại nhiều thời điểm khác nhau trong quá khứ, từ đó phục vụ phân tích xu thế biến động đường bờ theo thời gian. Trong bối cảnh nhiều khu vực ven biển Việt Nam thiếu dữ liệu ảnh viễn thám độ phân giải cao liên tục, ảnh GE trở thành nguồn dữ liệu bổ sung có giá trị để nghiên cứu diễn biến xói lở – bồi tụ đường bờ trong trung và dài hạn.

Việc sử dụng ảnh GE làm dữ liệu đầu vào cho các mô hình phân đoạn ảnh cho phép khai thác tối đa thông tin hình thái và không gian, góp phần nâng cao độ chi tiết và khả năng phát hiện biến đổi nhỏ của đường bờ mà các ảnh vệ tinh độ phân giải trung bình khó đáp ứng. Khi được sử dụng kết hợp với ảnh UAV và các dữ liệu viễn thám khác, ảnh GE có thể phát huy hiệu quả trong việc theo dõi biến

động đường bờ trong, hỗ trợ công tác quản lý, quy hoạch và bảo vệ bờ biển theo hướng bền vững.

1.3.4.2. Khả năng ứng dụng mô hình học máy trong nghiên cứu biến động đường bờ

Trong những năm gần đây, mô hình học máy đã trở thành công cụ quan trọng trong lĩnh vực phân tích không gian, đặc biệt là trong xử lý ảnh viễn thám phục vụ nghiên cứu bờ biển. Khác với các phương pháp truyền thống dựa trên mô hình vật lý hoặc kỹ thuật phân loại thủ công, mô hình học máy cho phép các hệ thống tự học và rút ra quy luật từ dữ liệu đầu vào mà không cần lập trình theo luật cứng nhắc. Các thuật toán như RF, SVM hay K-Nearest Neighbors đã từng được ứng dụng phổ biến trong phân loại lớp phủ bề mặt, nhưng dần được thay thế hoặc tích hợp trong các mô hình nơ-ron, nhờ khả năng tự học đặc trưng của mô hình. Thay vì dựa hoàn toàn vào đặc trưng quang phổ đơn lẻ hay các chỉ số thực nghiệm, học máy bằng mô hình mạng nơ-ron cho phép khai thác đồng thời nhiều đặc trưng hình thái, không gian và quang phổ để nâng cao độ chính xác trong phân định ranh giới giữa biển và đất liền.

Trong số các kiến trúc mạng nơ-ron được áp dụng rộng rãi trong nghiên cứu đường bờ, mạng nơ-ron tích (CNN) nổi bật nhờ khả năng tự động học các đặc trưng không gian từ dữ liệu ảnh. CNN được thiết kế với các lớp tích chập, lớp phi tuyến và lớp pooling, cho phép giảm chiều dữ liệu đầu vào đồng thời giữ lại thông tin quan trọng của ảnh đầu vào. Trong bài toán phân đoạn đường bờ, CNN giúp nhận diện các đặc điểm phức tạp của ranh giới giữa đất liền và biển mà các thuật toán truyền thống khó xử lý. Một ưu điểm của CNN là khả năng học và phân biệt đặc trưng ở nhiều cấp độ (từ chi tiết nhỏ đến cấu trúc tổng thể), giúp mô hình thích ứng tốt với nhiều hệ sinh thái ven biển, bao gồm bãi cát, vách đá, cửa sông hay vùng ngập mặn.

Tuy nhiên, CNN thông thường chủ yếu phục vụ bài toán phân loại hoặc phát hiện đối tượng, trong khi đối với nhiệm vụ trích xuất đường bờ, yêu cầu chính là phân đoạn ảnh chính xác từng điểm ảnh (pixel-level classification). Để đáp ứng yêu cầu này, mô hình U-Net đã ra đời và nhanh chóng trở thành kiến trúc tiêu chuẩn trong các nghiên cứu phân đoạn ảnh viễn thám. U-Net có cấu trúc encoder-decoder đối xứng với các kết nối skip connection, giúp kết hợp thông tin không gian chi tiết từ các lớp nông với đặc trưng trừu tượng từ các lớp sâu. Điều này đặc biệt quan trọng khi trích xuất đường bờ, nơi ranh giới giữa các lớp (đất, nước) thường hẹp và phức tạp. So với CNN cơ bản, U-Net cho phép tái tạo các biến dạng

chính xác hơn và khắc phục nhược điểm làm mờ ranh giới thường gặp ở các mô hình CNN thông thường. Đây là tiền đề quan trọng để xây dựng các mô hình dự đoán biến động đường bờ, phát hiện khu vực xói lở, hoặc phân loại các loại địa hình ven biển. Các cấu trúc mô hình tương tự như U-Net – một kiến trúc đặc biệt dành cho bài toán phân đoạn ảnh – cũng đang được thử nghiệm để xác định chính xác đường bờ trong trên ảnh viễn thám với độ chính xác cao. Việc áp dụng học máy vào nghiên cứu đường bờ không chỉ nâng cao khả năng tự động hóa trong phân tích dữ liệu lớn, mà còn mở ra hướng tiếp cận mới trong đánh giá rủi ro, giám sát tài nguyên, và lập kế hoạch không gian ven biển dựa trên dữ liệu động.

1.4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

1.4.1. Cách tiếp cận nghiên cứu

1.4.1.1. Tiếp cận hệ thống và liên ngành

Nghiên cứu áp dụng tiếp cận hệ thống và liên ngành nhằm xem xét biến động đường bờ biển một cách tổng thể, xuyên suốt và có tính liên kết giữa các hợp phần tự nhiên – xã hội trong toàn bộ không gian nghiên cứu là vùng bờ thành phố Đà Nẵng, từ phường Hòa Hiệp Bắc đến xã Tam Nghĩa. Đây là khu vực có quy mô lãnh thổ lớn, động lực bờ biển mạnh và chịu tác động đồng thời của các quá trình tự nhiên và hoạt động nhân sinh, đòi hỏi cách tiếp cận mang tính tích hợp cao.

Tiếp cận hệ thống cho phép phân tích mối quan hệ và tương tác giữa các yếu tố cấu thành hệ thống vùng bờ, bao gồm điều kiện địa mạo – địa chất, thủy – hải văn, môi trường, hệ sinh thái và các hoạt động kinh tế – xã hội. Trên cơ sở đó, biến động đường bờ được xem như kết quả tổng hợp của chuỗi quá trình động lực và tác động liên ngành, thay vì là hiện tượng đơn lẻ hay thuần túy hình thái.

Tính liên ngành của nghiên cứu thể hiện ở việc tích hợp các tri thức và phương pháp của địa lý, địa mạo, viễn thám – GIS, khoa học môi trường và khoa học xã hội trong cùng một khung phân tích thống nhất. Cách tiếp cận này cho phép gắn kết ba nhóm vấn đề trọng tâm gồm: (i) bảo vệ hệ sinh thái vùng bờ; (ii) giảm thiểu xói lở và nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu, nước biển dâng; và (iii) đáp ứng yêu cầu phát triển đô thị ven biển bền vững.

Việc áp dụng tiếp cận hệ thống và liên ngành là cơ sở khoa học quan trọng để bảo đảm tính logic, tính liên kết và khả năng vận dụng của các kết quả nghiên cứu, đồng thời tạo nền tảng cho việc triển khai các phương pháp chuyên ngành và phân tích kết quả ở các chương tiếp theo của luận án.

1.4.1.2. Tiếp cận địa lý

Tiếp cận địa lý nghiên cứu các mối liên kết không gian thông qua nghiên cứu cấu trúc – liên kết thông tin (cấu trúc đứng, cấu trúc ngang và liên kết thông

tin). Hệ thống thông tin địa lý (GIS) giúp tiếp cận địa lý trở nên hữu ích không chỉ trong ngành địa lý mà còn trong nhiều khoa học liên ngành khác. Tiếp cận địa lý xem xét logic và khoa học các mâu thuẫn trong sự phát triển đô thị ven biển, xác định ngưỡng phát triển để tối giản hóa các tác động tiêu cực đến tài nguyên thiên nhiên và môi trường.

Về bản chất, tiếp cận địa lý bao gồm tính không gian (tính lãnh thổ), tính thời gian, tính tổng hợp, tính cụ thể, quan hệ tương hỗ và ngôn ngữ bản đồ. Trong đó, tính không gian là tâm điểm, là “nhân” của tiếp cận địa lý. Vì vậy theo nghĩa hẹp, tiếp cận địa lý được xem xét là cách tiếp cận không gian. Đây là sự khác biệt cơ bản của tiếp cận địa lý đối với tiếp cận khác.

Tính không gian và thời gian trong cách tiếp cận địa lý có ý nghĩa lớn đối với mục tiêu của luận án, đặc biệt là trong việc (1) xác định quy luật phân bố các đối tượng tự nhiên, kinh tế - xã hội ven biển, (2) thể hiện chúng trên các bản đồ chuyên đề và tổng hợp và (3) xác định sự thay đổi trong không gian và thời gian. Từ đó, có thể xác định các giải pháp hợp lý nhằm giảm thiểu thiệt hại do tai biến xói lở gây nên tại khu vực nghiên cứu.

1.4.1.3. Tiếp cận lịch sử - kế thừa

Tiếp cận lịch sử là nghiên cứu theo chiều thời gian (dòng lịch sử) của vấn đề. Cách tiếp cận này cho phép khai thác nguồn thư tịch cổ, nguồn tư liệu lưu trữ, đặc biệt là các tài liệu ảnh viễn thám, bản đồ ở các giai đoạn khác nhau. Trong nghiên cứu này, cách tiếp cận lịch sử giúp (1) tái hiện lại các quá trình tự nhiên động lực dòng chảy ven bờ từ năm 2000 đến 2024, (2) xác định nguyên nhân các mối quan hệ theo quy luật nhân – quả, và từ đó (3) dự báo những dịch chuyển đường bờ biển trong tương lai. Với việc kết hợp với các phương pháp mô hình hóa toán học, hiện nay cách tiếp cận lịch sử - địa lý mang lại nhiều kết quả định lượng, đặc biệt là dự báo được xu thế xói lở - bồi tụ của đường bờ biển, và hoạt động sóng bão hàng năm gây tổn thương cho người dân ven biển.

1.4.1.4. Tiếp cận công nghệ viễn thám và học máy

Tiếp cận công nghệ viễn thám – GIS và học máy được lựa chọn như một hướng tiếp cận tổng hợp, hiện đại, đóng vai trò then chốt trong toàn bộ quá trình nghiên cứu đánh giá biến động đường bờ trong khu vực ven biển Thành phố Đà Nẵng. Cách tiếp cận này cho phép khai thác hiệu quả ưu thế của dữ liệu viễn thám đa thời gian, năng lực tích hợp và phân tích không gian của GIS, đồng thời phát huy khả năng học, suy luận và tự động hóa của các mô hình học máy.

Trong nghiên cứu này, viễn thám giữ vai trò là nguồn cung cấp dữ liệu quan sát bề mặt Trái đất có tính khách quan, đồng bộ và liên tục theo không gian – thời gian. Các tư liệu ảnh viễn thám đa thời gian được sử dụng nhằm phản ánh đầy đủ

diễn biến hình thái đường bờ trong qua các giai đoạn nghiên cứu. Việc lựa chọn ảnh viễn thám có độ phân giải không gian và phổ phù hợp cho phép tăng cường khả năng nhận dạng ranh giới đường bờ trong, hạn chế ảnh hưởng của nhiễu phổ, điều kiện khí quyển và các yếu tố động lực ven bờ.

Hệ thống thông tin địa lý (GIS) đóng vai trò là nền tảng tích hợp, quản lý và phân tích các dữ liệu không gian đa nguồn, cho phép thực hiện các phép phân tích không gian, chồng lớp, thống kê và mô hình hóa nhằm làm rõ đặc điểm phân bố, mức độ và xu thế biến động của đường bờ trong theo không gian và thời gian. GIS đồng thời là công cụ chủ đạo để xây dựng các bản đồ chuyên đề và bản đồ tổng hợp phục vụ đánh giá và so sánh kết quả nghiên cứu.

Trên nền tảng dữ liệu viễn thám và môi trường phân tích GIS, các mô hình học máy – đặc biệt là các mô hình học máy sâu – được ứng dụng nhằm tự động hóa quá trình trích xuất và phân loại đường bờ trong. Dữ liệu ảnh sau khi được tiền xử lý, gắn nhãn và tổ chức trong GIS sẽ được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho các mô hình học máy, cho phép mô hình học được các đặc trưng phổ, không gian và ngữ cảnh phức tạp của đối tượng đường bờ. Cách tiếp cận này giúp nâng cao độ chính xác, tính nhất quán và khả năng tái lập của kết quả so với các phương pháp giải đoán ảnh truyền thống, đồng thời giảm thiểu tính chủ quan của người nghiên cứu.

Như vậy, tiếp cận công nghệ viễn thám – GIS và học máy không chỉ cho phép mô tả và phân tích hiện trạng, diễn biến đường bờ trong một cách định lượng và hệ thống, mà còn mở rộng khả năng suy luận và dự báo xu thế biến động trong tương lai. Cách tiếp cận này bảo đảm tính hiện đại, tính khoa học và tính ứng dụng cao của luận án, đồng thời cung cấp luận cứ tin cậy phục vụ công tác quản lý, quy hoạch không gian ven biển và giảm thiểu rủi ro xói lở bờ biển tại khu vực nghiên cứu.

1.4.2. Phương pháp nghiên cứu

1.4.2.1 Nhóm phương pháp thu thập, phân tích thống kê và tổng hợp

Các tài liệu và số liệu phục vụ nghiên cứu được thu thập từ các nguồn chính thức, có độ tin cậy và giá trị pháp lý, bao gồm số liệu thống kê của các cơ quan Trung ương và địa phương trong khu vực nghiên cứu. Các dữ liệu được hệ thống hóa, xử lý, phân tích và tổng hợp nhằm làm rõ hiện trạng khai thác, sử dụng tài nguyên vùng bờ; điều kiện môi trường và các rủi ro môi trường; tình hình và xu thế tai biến thiên nhiên ven biển, đặc biệt là biến động đường bờ, xói lở và bồi tụ.

Bên cạnh đó, nghiên cứu kế thừa và tổng hợp các kết quả nghiên cứu, quan điểm lý luận và kinh nghiệm thực tiễn từ các công trình khoa học trong và ngoài nước liên quan đến nghiên cứu biến động đường bờ và quản lý vùng bờ. Nhóm phương pháp này được sử dụng xuyên suốt trong việc xây dựng cơ sở lý luận, phân tích bối cảnh nghiên cứu và hỗ trợ đánh giá kết quả của luận án.

1.4.2.2. Nhóm phương pháp khảo sát và điều tra thực địa

Phương pháp khảo sát và điều tra thực địa được sử dụng nhằm thu thập, kiểm chứng và cập nhật thông tin thực tế tại các khu vực nghiên cứu, phục vụ việc hoàn thiện cơ sở dữ liệu về đặc điểm tự nhiên, tài nguyên, môi trường và hiện trạng phát triển ven biển. Các hoạt động khảo sát tập trung vào việc ghi nhận hình thái bờ biển, dấu hiệu xói lở – bồi tụ, đặc điểm bề mặt và các yếu tố liên quan đến biến động đường bờ.

Kết quả khảo sát thực địa, bao gồm dữ liệu quan sát và ảnh chụp độ phân giải cao từ thiết bị bay không người lái (UAV), được sử dụng làm nguồn thông tin tham chiếu và kiểm chứng cho quá trình giải đoán ảnh viễn thám và xây dựng, đánh giá các mô hình học máy trong các chương tiếp theo của luận án.

1.4.2.3. Nhóm các phương pháp nghiên cứu địa mạo

Luận án sử dụng tổng hợp các phương pháp nghiên cứu địa mạo nhằm làm rõ mối quan hệ giữa hình thái bờ biển, vật liệu cấu tạo và các quá trình động lực chi phối biến động đường bờ. Các phương pháp này đóng vai trò nền tảng trong việc giải thích cơ sở hình thái – động lực của biến động đường bờ và hỗ trợ lựa chọn các chỉ thị phù hợp trong phân tích viễn thám.

Phương pháp phân tích hình thái – thạch học được sử dụng để đánh giá mối liên hệ giữa đặc điểm hình thái bờ/bãi biển với tính chất vật liệu trầm tích, như mức độ gắn kết và kích thước hạt. Đặc điểm hình thái bãi biển, đặc biệt là độ dốc bãi, phản ánh sự chi phối của năng lượng sóng và chế độ động lực bờ, qua đó cung cấp thông tin quan trọng về xu thế xói lở hoặc bồi tụ.

Phương pháp phân tích hình thái – động lực tập trung làm rõ mối quan hệ nhân – quả giữa hình thái địa hình bờ biển và các quá trình động lực thành tạo, bao gồm sóng, dòng chảy ven bờ và dòng chảy cửa sông. Các dạng địa mạo đặc trưng như doi cát, bar cát hay bãi bồi ven bờ được phân tích như những chỉ thị phản ánh hướng và cường độ vận chuyển trầm tích.

Phương pháp phân tích hình thái – nguồn gốc được sử dụng để nhận diện sự phân hóa địa hình vùng bờ theo nguồn gốc hình thành, qua đó hỗ trợ phân loại kiểu bờ và đánh giá mức độ ổn định tương đối của các đoạn bờ khác nhau.

Phương pháp trắc lượng hình thái cho phép định lượng các đặc trưng hình thái như độ cao, độ dốc và mức độ phân cắt địa hình bờ biển, cung cấp các tham số đầu vào phục vụ phân tích không gian và hỗ trợ đánh giá xu thế xói lở – bồi tụ.

Bên cạnh đó, phương pháp nguồn gốc – lịch sử được sử dụng để xem xét sự biến động địa hình đường bờ trong bối cảnh tiến hóa tự nhiên và tác động của

các quá trình động lực dài hạn, làm cơ sở cho việc đánh giá diễn biến xói lở bờ biển và các tai biến liên quan.

Nhóm phương pháp nghiên cứu địa mạo được sử dụng xuyên suốt trong quá trình phân tích đặc điểm bờ biển, luận giải cơ sở hình thái của biến động đường bờ và hỗ trợ xây dựng bộ chỉ thị phục vụ nghiên cứu ở các chương tiếp theo.

1.4.2.4. Nhóm các phương pháp nghiên cứu và điều tra xã hội học

Nhóm phương pháp nghiên cứu và điều tra xã hội học được sử dụng nhằm thu thập các dữ liệu sơ cấp không thể khai thác đầy đủ từ các nguồn tài liệu, báo cáo hoặc cơ sở dữ liệu thống kê hiện có. Phương pháp này tập trung thu thập thông tin ở cấp cộng đồng và hộ gia đình liên quan đến diễn biến xói lở bờ biển, lũ lụt, thiệt hại do bão và các hoạt động sinh kế ven biển tại các khu vực nghiên cứu trọng điểm.

Nhóm phương pháp nghiên cứu và điều tra xã hội học được sử dụng nhằm bổ sung và làm rõ các thông tin thực tế ở cấp cộng đồng và hộ gia đình, đặc biệt là những nội dung không thể phản ánh đầy đủ thông qua dữ liệu viễn thám và phân tích địa mạo. Các thông tin thu thập được được sử dụng như nguồn dữ liệu hỗ trợ cho quá trình xây dựng, hoàn thiện và hiệu chỉnh bộ chỉ thị đánh giá biến động đường bờ, đồng thời làm cơ sở đối chiếu và kiểm chứng các kết quả phân tích trong các giai đoạn tiếp theo của nghiên cứu.

Bên cạnh đó, phỏng vấn chuyên gia và cán bộ quản lý địa phương được áp dụng trong những trường hợp thiếu hụt thông tin về các biện pháp và mức độ đầu tư cho công tác phòng, chống xói lở bờ biển. Kết quả điều tra xã hội học không được sử dụng như dữ liệu đầu vào trực tiếp cho các mô hình viễn thám và học máy, mà đóng vai trò hỗ trợ giải thích và tăng cường độ tin cậy cho việc đánh giá biến động đường bờ và tác động nhân sinh trong luận án.

1.4.2.5. Phương pháp bản đồ, viễn thám và GIS

Phương pháp bản đồ, viễn thám và GIS được sử dụng như khung phương pháp chủ đạo để nghiên cứu phân bố không gian và biến động đường bờ biển theo thời gian. Với ưu thế trong việc biểu diễn, phân tích và tích hợp thông tin không gian, phương pháp bản đồ cho phép thể hiện trực quan sự phân dị lãnh thổ, các đặc trưng hình thái bờ biển và sự thay đổi vị trí đường bờ qua các thời kỳ khác nhau.

Trong nghiên cứu này, viễn thám và GIS được sử dụng nhằm khai thác chuỗi dữ liệu ảnh đa thời gian, đa độ phân giải để nhận diện và theo dõi biến động đường bờ, đồng thời hỗ trợ phân tích không gian các khu vực có xu thế xói lở – bồi tụ khác nhau. Việc tích hợp ảnh viễn thám với các dữ liệu nền địa hình và địa lý trong môi trường GIS cho phép chuẩn hóa hệ quy chiếu, quản lý và phân tích thống nhất các lớp thông tin không gian phục vụ đánh giá biến động đường bờ ở quy mô khu vực.

Các nguồn dữ liệu viễn thám được sử dụng bao gồm ảnh vệ tinh độ phân giải trung bình và cao, đáp ứng yêu cầu phân tích biến động dài hạn và chi tiết cục bộ của đường bờ. Vai trò của phương pháp bản đồ, viễn thám và GIS trong luận án chủ yếu mang tính định hướng phương pháp và tổ chức không gian dữ liệu, trong khi các quy trình xử lý ảnh, kỹ thuật trích xuất đường bờ, phân tích biến động và đánh giá độ chính xác sẽ được trình bày chi tiết trong Chương 3.

1.4.2.6. Nhóm các phương pháp xử lý, khai phá dữ liệu và học máy

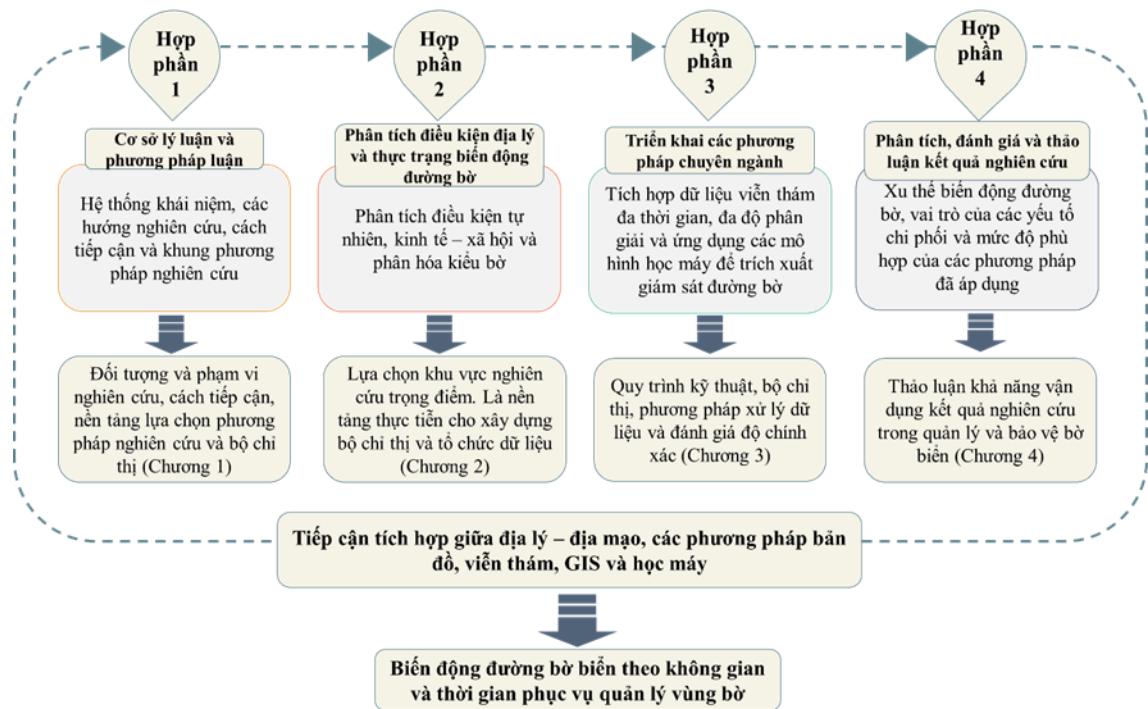
Các phương pháp xử lý và khai phá dữ liệu, bao gồm học máy và học sâu, được sử dụng nhằm khai thác hiệu quả mối quan hệ giữa các đặc trưng phổ, không gian và hình thái bề mặt trên ảnh viễn thám, phục vụ nhận dạng và phân tích biến động đường bờ. Trong bối cảnh dữ liệu viễn thám ngày càng phong phú và có tính phi tuyến cao, các phương pháp học máy cho phép vượt qua những hạn chế của các mô hình thống kê truyền thống trong việc mô tả và dự báo các quá trình tự nhiên phức tạp.

Trong nghiên cứu biến động đường bờ, các phương pháp học máy được xem là công cụ hỗ trợ quan trọng để xử lý dữ liệu đa nguồn, đánh giá mối tương quan giữa các biến ảnh hưởng và nâng cao độ chính xác của quá trình trích xuất thông tin từ ảnh viễn thám. Các kỹ thuật này đặc biệt có ý nghĩa trong việc nhận dạng ranh giới đất – nước, xác định đường bờ trong và ngoài, cũng như phân tích xu thế biến động đường bờ theo không gian và thời gian.

Trong luận án này, các phương pháp xử lý và khai phá dữ liệu được sử dụng như khung tiếp cận công nghệ, hỗ trợ các giai đoạn xử lý dữ liệu, phân tích và mô hình hóa. Các thuật toán, mô hình học máy cụ thể, quy trình huấn luyện – kiểm định, cũng như cách thức tích hợp với dữ liệu viễn thám và GIS sẽ được trình bày và phân tích chi tiết trong Chương 3. Việc triển khai các công cụ xử lý dữ liệu và học máy được thực hiện trong môi trường tính toán phù hợp nhằm bảo đảm tính nhất quán và khả năng lặp lại của kết quả nghiên cứu.

1.5. Khung nghiên cứu tổng thể của luận án

Khung nghiên cứu tổng thể của luận án được xây dựng trên cơ sở tiếp cận tích hợp giữa địa lý – địa mạo với các phương pháp bản đồ, viễn thám, GIS và học máy, nhằm nghiên cứu biến động đường bờ biển theo không gian và thời gian phục vụ quản lý vùng bờ. Khung nghiên cứu phản ánh mạch logic xuyên suốt từ cơ sở lý luận, phân tích bối cảnh địa lý - thực tiễn đến triển khai phương pháp chuyên ngành và đánh giá kết quả nghiên cứu. Về cấu trúc, khung nghiên cứu của luận án được tổ chức thành bốn hợp phần chính, tương ứng và liên kết chặt chẽ với bốn chương nội dung của luận án (Hình 1.8).



Hình 1.8. Sơ đồ khung nghiên cứu tổng thể của luận án

Hợp phần thứ nhất tập trung vào cơ sở lý luận và phương pháp luận, bao gồm hệ thống khái niệm, các hướng nghiên cứu về biến động đường bờ, cách tiếp cận địa lý – địa mạo và khung phương pháp nghiên cứu tích hợp. Hợp phần này làm rõ đối tượng và phạm vi nghiên cứu, lựa chọn cách tiếp cận dựa trên đường bờ trong, đồng thời đặt nền tảng khoa học cho việc xây dựng bộ chỉ thị và lựa chọn phương pháp phân tích phù hợp. Nội dung của hợp phần này được trình bày trong Chương 1.

Hợp phần thứ hai là phân tích điều kiện địa lý và thực trạng biến động đường bờ tại khu vực nghiên cứu. Trên cơ sở phân tích các điều kiện tự nhiên, kinh tế – xã hội và sự phân hóa kiểu bờ, luận án làm rõ đặc điểm xói lở – bồi tụ, xác định các kiểu bờ chủ đạo và lựa chọn các khu vực nghiên cứu trọng điểm. Hợp phần này đóng vai trò nền tảng thực tiễn cho việc xây dựng bộ chỉ thị và tổ chức dữ liệu nghiên cứu, được trình bày trong Chương 2.

Hợp phần thứ ba là triển khai các phương pháp chuyên ngành, trong đó tích hợp dữ liệu viễn thám đa thời gian, đa độ phân giải trong môi trường GIS và ứng dụng các mô hình học máy để trích xuất, giám sát và phân tích biến động đường bờ. Hợp phần này tập trung vào quy trình kỹ thuật, xây dựng và sử dụng bộ chỉ thị đường bờ trong, phương pháp xử lý dữ liệu và đánh giá độ chính xác của kết quả trích xuất. Đây là hợp phần mang tính trọng tâm phương pháp và công nghệ của luận án, được trình bày chi tiết trong Chương 3.

Hợp phần thứ tư là phân tích, đánh giá và thảo luận kết quả nghiên cứu, nhằm làm rõ xu thế biến động đường bờ theo không gian và thời gian, vai trò của các yếu

tổ chi phối tự nhiên và nhân sinh, cũng như mức độ phù hợp của các phương pháp đã áp dụng. Trên cơ sở đó, luận án thảo luận khả năng vận dụng kết quả nghiên cứu trong quản lý, bảo vệ và quy hoạch vùng bờ biển. Nội dung của hợp phần này được trình bày trong Chương 4.

Tổng thể, khung nghiên cứu được xây dựng theo hướng liên ngành, tích hợp và nhất quán, bảo đảm sự gắn kết logic giữa các hợp phần và các chương nội dung của luận án, đồng thời tạo nền tảng khoa học cho việc triển khai chi tiết các nội dung nghiên cứu về biến động đường bờ biển phục vụ quản lý vùng bờ trong toàn bộ luận án.

Tiểu kết Chương 1

Tổng quan các nghiên cứu về ứng dụng viễn thám, GIS và học máy trong nghiên cứu biến động đường bờ biển cho thấy phần lớn các nghiên cứu hiện nay vẫn tập trung vào đường bờ ngoài, vốn chịu ảnh hưởng mạnh của thủy triều, sóng và điều kiện môi trường tức thời, nên còn hạn chế trong đánh giá xu thế biến động dài hạn.

Các nghiên cứu cũng cho thấy đường bờ trong có tính ổn định cao hơn và phản ánh rõ hơn quá trình xói lở – bồi tụ thực tế, tuy nhiên vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ, đặc biệt đối với bờ biển miền Trung Việt Nam có động lực mạnh và biến động phức tạp. Bên cạnh đó, việc ứng dụng học máy và mạng nơ-ron sâu trong nghiên cứu đường bờ ở Việt Nam còn hạn chế, chủ yếu vẫn dựa trên các phương pháp truyền thống và bán tự động.

Từ những khoảng trống nghiên cứu đó, luận án định hướng xây dựng bộ chỉ thị đường bờ trong phù hợp với các kiểu bờ đặc trưng và ứng dụng viễn thám độ phân giải cao kết hợp học máy nhằm nâng cao độ chính xác và khả năng tự động hóa trong giám sát biến động đường bờ biển.

CHƯƠNG 2: ĐIỀU KIỆN TỰ NHIÊN, KINH TẾ - XÃ HỘI VÀ THỰC TRẠNG BIẾN ĐỘNG BỜ BIỂN THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG

2.1. Khái quát vùng ven biển thành phố Đà Nẵng

2.1.1 Vị trí địa lý

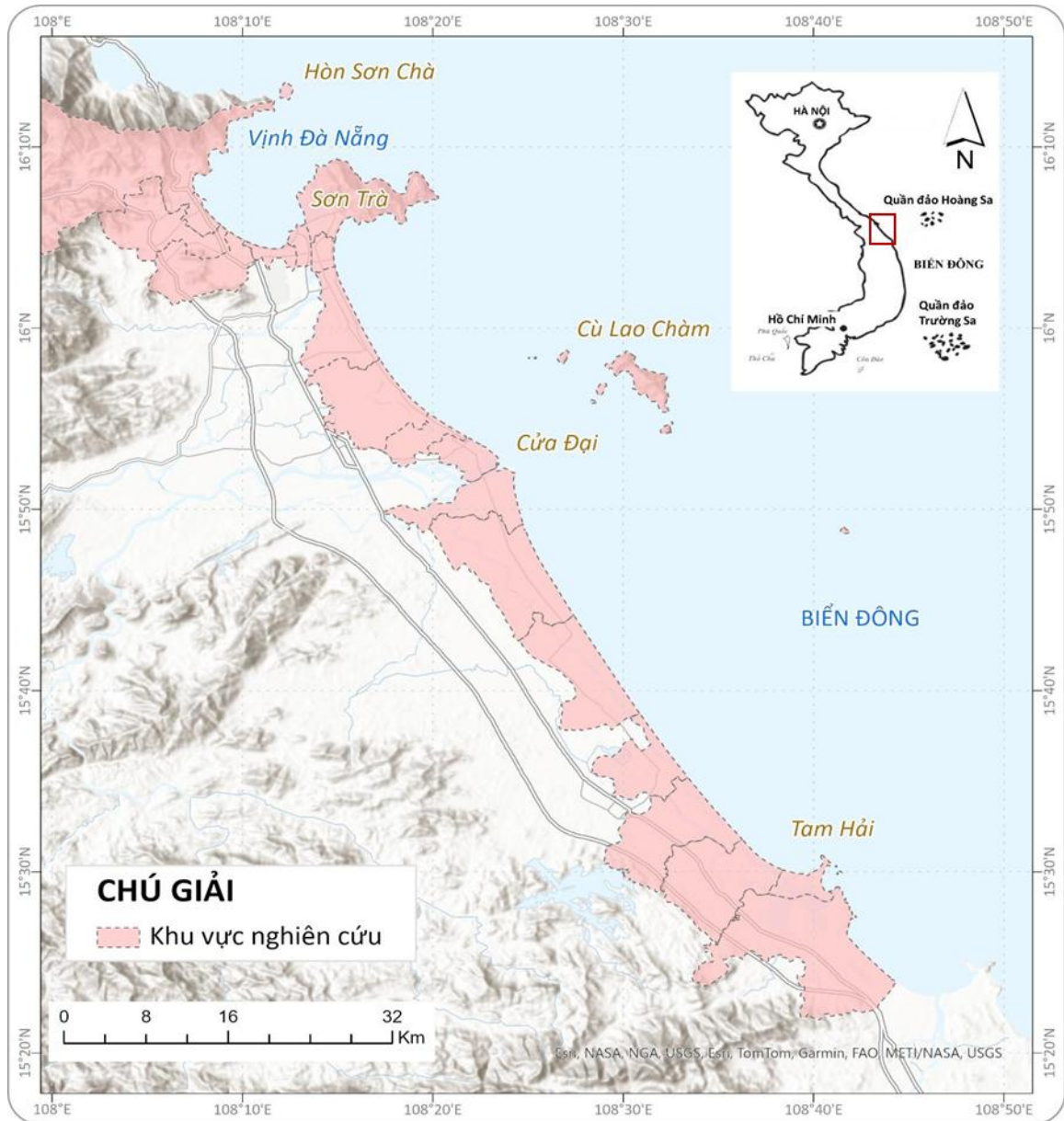
Dải ven biển khu vực nghiên cứu hiện nay thuộc phạm vi hành chính của thành phố Đà Nẵng, kéo dài từ mũi Hải Vân ở phía bắc đến khu vực bờ biển xã Núi Thành (trước đây là xã Tam Quang, huyện Núi Thành, tỉnh Quảng Nam) (Hình 2.1). Thành phố Đà Nẵng được thành lập theo Nghị quyết số 202/2025/QH15 của Quốc hội khóa XV, thông qua ngày 12/6/2025, về việc hợp nhất toàn bộ diện tích tự nhiên và dân số của tỉnh Quảng Nam và thành phố Đà Nẵng thành một đơn vị hành chính mới mang tên thành phố Đà Nẵng; nghị quyết có hiệu lực từ ngày 01/7/2025.

Dải ven biển của thành phố Đà Nẵng giữ vị trí đặc biệt quan trọng trong phát triển kinh tế – xã hội, quốc phòng – an ninh và hội nhập quốc tế. Nằm trên trục giao thông Bắc – Nam và là cửa ngõ hướng ra Biển Đông, thành phố Đà Nẵng đóng vai trò trung tâm liên kết vùng của khu vực miền Trung, đồng thời là điểm kết nối chiến lược giữa hai đầu đất nước. Trung tâm đô thị và các không gian phát triển trọng điểm của thành phố phân bố dọc theo dải ven biển, gắn với các tuyến giao thông huyết mạch như Quốc lộ 1A, đường sắt Bắc – Nam và hệ thống cao tốc.

Thành phố Đà Nẵng sở hữu cụm cảng biển quan trọng gồm cảng Tiên Sa, cảng Kỳ Hà và cảng nước sâu Chu Lai, tạo thành hệ thống cảng biển liên hoàn phục vụ vận tải hàng hóa trong nước và quốc tế. Hệ thống hàng không với sân bay quốc tế Đà Nẵng và sân bay Chu Lai (mở rộng) đều nằm trong khu vực ven biển, kết nối trực tiếp với các trục giao thông chính, cho phép khai thác đồng thời vận tải hành khách và hàng hóa quy mô lớn. Bên cạnh đó, các tuyến giao thông đối ngoại như cao tốc Đà Nẵng – Quảng Ngãi, quốc lộ 14B và 14D kết nối với khu vực Tây Nguyên và hành lang kinh tế Đông – Tây, mở rộng không gian liên kết với Lào, Thái Lan và tiểu vùng Mekong mở rộng.

Về điều kiện tự nhiên, dải ven biển thành phố Đà Nẵng có bờ biển dài, nhiều vịnh kín gió, các mũi nhô và bán đảo đặc trưng như Hải Vân, Sơn Trà, Kỳ Hà, cùng hệ thống đảo ven bờ tiêu biểu là Cù Lao Chàm. Khu vực ven biển còn gắn với các đồng bằng thấp, hệ thống sông và cửa sông quan trọng như Vu Gia – Thu Bồn, Thúy Loan – Hàn, Cỏ Cò và Trường Giang. Sự kết hợp chặt chẽ giữa biển, đồng bằng và các khối núi sót trong một không gian liên tục đã tạo cho thành phố Đà Nẵng lợi thế nổi bật về địa kinh tế, địa chiến lược và sinh thái, là nền tảng quan

trọng cho phát triển dịch vụ, công nghiệp công nghệ cao, logistics, du lịch và kinh tế biển trong giai đoạn tới.



Hình 2.1. Khu vực vùng ven biển thành phố Đà Nẵng

Bên cạnh những lợi thế, nằm ở vị trí chuyển tiếp giữa Bắc và Nam Trung Bộ với bờ biển dài, vùng ven biển thành phố Đà Nẵng cũng gặp một số khó khăn, trước tiên là xói lở bờ biển, bồi lấp cửa sông và các tác động của bão, áp thấp nhiệt đới và hiện tượng thời tiết cực đoan trong gió mùa Đông Bắc [2].

2.1.2. Đặc điểm địa lý tự nhiên

2.1.2.1. Đặc điểm địa chất

Trong nghiên cứu này, dữ liệu địa chất không được sử dụng như biến đầu vào trực tiếp cho mô hình học máy, mà đóng vai trò là nguồn thông tin nền để giải

thích và kiểm chứng kết quả phân tích biến động đường bờ. Sự khác biệt về loại hình địa chất (đá nền rắn chắc so với trầm tích bờ rời) được xem là yếu tố chi phối quan trọng đến mức độ ổn định và xu thế biến động của đường bờ, đặc biệt khi so sánh giữa các đoạn bờ đá, bờ cát và bờ cửa sông.

Theo các kết quả đo vẽ bản đồ địa chất của Cát Nguyên Hùng và cộng sự (1995) [14], vùng bờ biển khu vực nghiên cứu được cấu tạo bởi các đá rắn chắc có tuổi từ Proterozoi đến Triat và các trầm tích bờ rời tuổi Đệ Tứ. Sự phân bố không đồng nhất giữa các khối đá nền rắn chắc và các thành tạo trầm tích trẻ đã tạo nên sự khác biệt rõ rệt về tính ổn định hình thái bờ biển trong thành phố Đà Nẵng.

Các đá rắn chắc cấu tạo bờ biển thành phố Đà Nẵng chỉ gặp ở khu vực Hải Vân – Sơn Trà và một số mũi biển thuộc phạm vi huyện Núi Thành tỉnh Quảng Nam cũ. Đây là những khu vực có nền địa chất bền vững, thường hình thành các mũi đá, vách bờ hoặc bờ đá dốc, có khả năng chống chịu cao trước tác động của sóng.

Các thành tạo cổ nhất lộ ra trên bờ biển là các đá biến chất thuộc *hệ tầng Khâm Đức* ($PR_2 kd$) lộ ra và tạo nên các mũi An Hòa, mũi Kỳ Hà, với thành phần chủ yếu là đá phiến thạch anh - mica, gneis mica có granat-silimanit, xen kẹp các lớp mỏng hoặc thấu kính amphibolit. Trên bề mặt, các đá này bị phong hóa mạnh, hình thành lớp laterit đá ong dày; trên bờ biển Bãi Rạng, các khối đá ong ở từ trên bề mặt đỉnh xuống đã góp phần làm giảm năng lượng sóng tới bờ.

Đá trầm tích Devon thuộc *hệ tầng Tân Lâm* (D_2tl) phân bố trên các đồi núi sót hai bên cửa sông Cu Đê, chúng tạo nên mũi Nam Ô (phường Hòa Hiệp Nam). *Hệ tầng Ngũ Hành Sơn tuổi Carbon – Permi* ($C - P_2nhs$) gồm chủ yếu là đá vôi bị hoa hóa (đá hoa) màu xám trắng, xám sẫm, đôi nơi có màu phớt vàng, phớt hồng, lộ ra ở khu vực ven biển Ngũ Hành Sơn.

Đá magma xâm nhập lộ ra trên bờ biển ở Hải Vân, Sơn Trà, gồm các đá magma axit thuộc phức hệ Hải Vân tuổi Triat thượng (γT_3nhv) gồm chủ yếu đá granit biotit sẫm màu hạt vừa, đôi nơi bị muscovit hóa trở nên sáng màu hơn. Đó là các đá khá rắn chắc, tạo nên nền địa chất tương đối ổn định của các đoạn bờ này.

Các trầm tích bờ rời tuổi Đệ tứ: Ngoài các đá rắn chắc tồn tại trên các khối núi, đồi sót phân bố sát bờ biển cấu tạo bởi đá rắn chắc, trong phạm vi nghiên cứu phân bố chủ yếu các trầm tích bờ rời tuổi Đệ tứ, từ Pleistocen muộn đến Holocen. Các thành tạo nguồn gốc biển phân bố trên các thềm cát, đụn cát, bãi biển với thành phần là cát hạt trung đến thô, đa dạng về màu sắc, trong đó trầm tích biển tuổi cuối Pleistocen muộn là cát màu trắng tinh khiết. Các thành tạo nguồn gốc sông và hỗn hợp sông biển tuổi Pleistocen muộn gồm cát lẫn bột sét màu vàng nâu, cấu tạo nên

bề mặt thành phố Đà Nẵng. Tại các vùng cửa sông, trầm tích Holocen chủ yếu là bột sét lẫn cát màu xám đen, có tính cố kết yếu và nhạy cảm cao trước tác động của động lực biển.

Về mặt kiến tạo, nền móng thành phố Đà Nẵng chịu tác động của hệ thống đứt gãy phương Tây Bắc – Đông Nam, Đông Bắc – Tây Nam và á kinh tuyến, nổi bật là các đứt gãy Hà Nha – Ngũ Hành Sơn, Hòa Trung – Hòa Tiến, Hòa Khánh – Cẩm Lệ và Ngũ Hành Sơn – Kỳ Hà. Hoạt động kiến tạo hiện đại và xu thế lún hạ cục bộ dọc các đới đứt gãy này được xem là yếu tố nền, góp phần làm gia tăng tính nhạy cảm của một số đoạn bờ trước các quá trình xói lở và bồi tụ, đặc biệt tại các khu vực cửa sông và đồng bằng ven biển thấp.

Dữ liệu địa chất được mô tả ở trên trong nghiên cứu này giữ vai trò giải thích cơ chế và bối cảnh hình thành biến động đường bờ, giúp làm rõ mối liên hệ giữa nền địa chất – cấu trúc kiến tạo với các kiểu và mức độ biến động đường bờ được nhận diện từ dữ liệu viễn thám và phân tích học máy.

2.1.2.2. Đặc điểm địa mạo

Tổng hợp các kết quả nghiên cứu của Cát Nguyên Hùng, Vũ Văn Phái, Đặng Văn Bào, Nguyễn Hiệu và kết quả khảo sát thực địa bổ sung, có thể khái quát đặc điểm địa mạo khu vực ven biển Thành phố Đà Nẵng với 17 dạng địa hình và 6 kiểu đường bờ chính dưới đây [11,14,17]

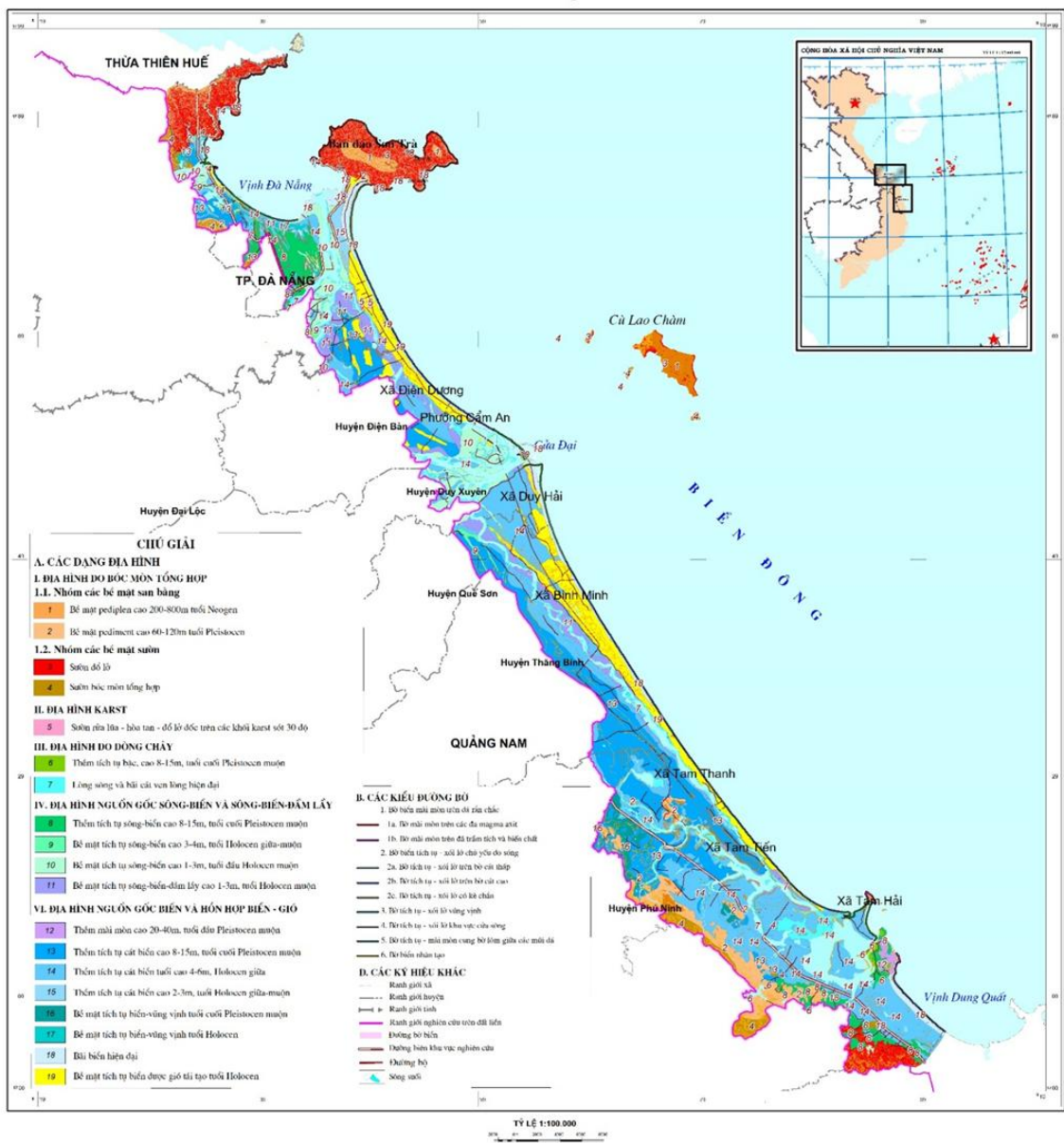
Dải ven biển thành phố Đà Nẵng phân bố 17 đơn vị địa mạo/dạng địa hình thuộc 6 nhóm nguồn gốc, được thể hiện trên bản đồ địa mạo (hình 2.2).

I. Địa hình do quá trình bóc mòn tổng hợp gồm : a. **Nhóm các bề mặt san bằng** gồm 2 đơn vị, phân bố trên đỉnh và sườn mũi Hải Vân, bán đảo Sơn Trà: 1. *Bề mặt Pediplen cao 200-800m, tuổi Neogen* và 2. *Pediment cao 80-200m, tuổi Pleistocen sớm* phân bố ở đỉnh và sườn của khối núi Hải Vân, Sơn Trà ; b. **Nhóm bề mặt sườn** gồm sườn đổ lở và sườn bóc mòn tổng hợp gồm 02 dạng địa hình : 3. *Sườn đổ lở, dốc > 45⁰* và 4. *Sườn bóc mòn tổng hợp dốc 20-40⁰* phân bố xung quanh khối núi bán đảo Sơn Trà, phần thấp của khối núi Hải Vân.

II. Địa hình karst phân bố trên diện tích hẹp ở Ngũ Hành Sơn, được xếp chung vào một đơn vị địa mạo số 5. *Khối karst* sót với *sườn rửa lữa – hòa tan – đổ lở*.

III. Địa hình do dòng chảy trên dải ven biển cũng chỉ gồm một đơn vị địa mạo là 6. *Lòng sông và bãi cát thấp ven lòng hiện đại*. Các bãi cát thấp ven lòng phân bố dạng đảo nổi ở phần cửa sông Cu Đê ở thành phố Đà Nẵng và sông Thu Bồn.

IV. Địa hình do hỗn hợp sông - biển và sông - biển - đầm lầy gồm 4 đơn vị địa mạo: 7. Bề mặt tích tụ sông - biển cao 8 - 15m, tuổi cuối Pleistocen muộn phân bố từ khu vực đỉnh tam giác châu sông Thu Bồn; 8. Bề mặt tích tụ sông - biển cao 3 - 4 m, tuổi Holocen giữa - muộn phân bố ở phần hạ lưu sông Thu Bồn, sông Hàn; 9. Bề mặt tích tụ sông - biển cao 1 - 3 m, tuổi đầu Holocen muộn phân bố dọc hai bờ sông Thu Bồn, sông Hàn, chỉ cao hơn mặt nước sông khoảng 2m; 10. Bề mặt tích tụ sông - biển - đầm lầy cao 1-3m, tuổi Holocen muộn phân bố dọc các dải trũng cát vào thềm cao 8 - 12m tuổi Pleistocen muộn phân bố ở Thanh Khê, tây Hòa Khánh - Nam Ô (Đà Nẵng), Thăng Bình (Đà Nẵng). Các bề mặt biển - đầm lầy được cấu tạo bởi tầng sét bùn xám đen chứa than bùn.



Hình 2.2. Bản đồ địa mạo dải ven biển thành phố Đà Nẵng (Nguồn: Cát Nguyễn Hùng và cộng sự, 1995 [14])

V. Địa hình nguồn gốc biển và hỗn hợp biển – gió gồm 7 đơn vị địa mạo: 11. *Thềm tích tụ cát biển cao 10 – 15m, tuổi Pleistocen* được cấu tạo bởi trầm tích hệ tầng Nam Ô, chủ yếu là cát hạt trung đến thô màu trắng tinh khiết; 12. *Thềm tích tụ cát biển cao 4-6m, tuổi Holocen giữa* phân bố tại khu vực tây Ngũ Hành Sơn và phía nam Cửa Đại. Cấu tạo nên chúng là cát thạch anh hạt trung lẫn 8 - 12 % bột sét; 13. *Thềm tích tụ cát biển cao 2-3m, tuổi đầu Holocen muộn* tạo nên các bề mặt nghiêng thoải về phía biển, trên đó nổi lên các đụn cát thiên nhiên cao từ 5 m - 10 m (từ Ngũ Hành Sơn đến Cửa Đại qua sông Trường Giang); 14. *Bề mặt tích tụ vũng vịnh cao 8-12m, tuổi cuối Pleistocen muộn* chỉ gặp các diện tích hẹp ở tây nam Thanh Khê, tây Thăng Bình, cấu tạo bởi sét bột kaolin lẫn cát bị phong hoá mạnh cho màu trắng loang lổ đỏ với nhiều kết vón, kết cục laterit; 15. *Bề mặt tích tụ vũng vịnh cao 4-6m, tuổi Holocen giữa* tạo nên bề mặt đồng bằng bằng phẳng trên độ cao từ 4 m - 6 m, phân bố rộng rãi ở khu vực Kỳ Lam, Vĩnh Điện, nam Duy Xuyên. Cấu tạo nên bề mặt này là thành tạo khá đặc trưng cho tương vũng vịnh; 16. *Bãi biển hiện đại* phân bố hầu như liên tục từ Liên Chiểu đến cửa Hàn, từ đông nam Sơn Trà đến mũi Sa Kỳ. Các bãi biển khu vực nghiên cứu khá thoải, có chiều rộng trên 50m, gồm bãi triều thấp và bãi cao, cấu tạo bởi cát hạt trung, là nơi phân bố các bãi tắm đẹp của Đà Nẵng; 17. *Bề mặt tích tụ biển được gió tái tạo tuổi Holocen giữa – muộn* tạo nên các đê cát thiên nhiên, đụn cát cao từ 5 đến 20m, có tác dụng che chắn cho khu vực bằng phẳng phía lục địa.

2.1.2.3. Đặc điểm khí hậu

Khu vực ven biển thành phố Đà Nẵng nằm trong vùng khí hậu Nam Trung Bộ, chịu ảnh hưởng trực tiếp của Biển Đông và tương tác mạnh với địa hình ven bờ, mang đặc trưng khí hậu nhiệt đới gió mùa biển. Nền nhiệt độ cao và tương đối ổn định quanh năm, với nhiệt độ trung bình năm khoảng 25–26°C, biên độ nhiệt nhỏ, tạo điều kiện thuận lợi cho các quá trình động lực biển và tái phân bố trầm tích ven bờ diễn ra thường xuyên.

Chế độ mùa thể hiện rõ rệt với hai thời kỳ chính là mùa khô và mùa mưa, song tác động khí hậu đối với vùng bờ chủ yếu thể hiện thông qua chế độ gió, sóng, bão và nước dâng. Mùa khô kéo dài từ khoảng tháng 1 đến tháng 8, trong đó giai đoạn từ tháng 5 đến tháng 7 thường chịu ảnh hưởng của gió Tây Nam và gió phơn, làm gia tăng nhiệt độ bề mặt, giảm độ ẩm và thúc đẩy các quá trình khô hạn, tái cấu trúc bề mặt bãi biển và đụn cát ven bờ [6,7]. Trong thời kỳ này, động lực sóng thường ở mức trung bình, thuận lợi cho quá trình bồi tụ cục bộ tại một số đoạn bờ.

Mùa mưa tập trung từ tháng 9 đến tháng 12, gắn liền với hoạt động mạnh của gió mùa Đông Bắc và các nhiễu động nhiệt đới trên Biển Đông. Đây là giai đoạn biển động mạnh, sóng cao, kết hợp với triều cường và nước dâng do bão, tạo ra áp lực lớn lên hệ thống bờ biển. Các đợt mưa lớn trong thời gian ngắn chủ yếu đóng vai trò gia tăng xói lở bờ biển thông qua việc làm suy yếu vật liệu bãi và đụn cát, hơn là tác động trực tiếp từ dòng chảy thượng nguồn.

Gió mùa Đông Bắc (từ tháng 11 đến tháng 4 năm sau) là yếu tố khí hậu biển quan trọng nhất đối với khu vực ven biển Đà Nẵng, với tần suất hoạt động cao và tốc độ gió trung bình khoảng 4–6 m/s. Hướng gió thịnh hành là Đông Bắc, Bắc và Tây Bắc, thường gây sóng lớn hướng vào bờ, thúc đẩy mạnh các quá trình xói lở bãi biển và chân đụn cát. Ngược lại, gió mùa Tây Nam vào mùa hè chủ yếu gây tác động gián tiếp thông qua nắng nóng kéo dài và thay đổi trạng thái bề mặt bãi, ít gây sóng lớn ven bờ.

Khu vực ven biển thành phố Đà Nẵng có tần suất cao chịu ảnh hưởng của bão và áp thấp nhiệt đới, trung bình khoảng 1–2 cơn mỗi năm, tập trung trong giai đoạn từ tháng 7 đến tháng 11. Các cơn bão mạnh thường kèm theo sóng lớn, gió giật mạnh và hiện tượng nước dâng do bão, là nguyên nhân trực tiếp gây xói lở nghiêm trọng và tái cấu trúc hình thái bờ biển trong thời gian ngắn. Những sự kiện tiêu biểu gồm bão Xangsane (2006), Ketsana (2009), Nari (2013) và gần đây là bão Noru (2022), đều để lại dấu ấn rõ nét trong biến động đường bờ ven biển Đà Nẵng. Các sự kiện cực đoan này có vai trò đặc biệt quan trọng trong việc chi phối xu thế biến động bờ biển dài hạn, mặc dù thời gian tác động thường ngắn.

2.1.2.4. Đặc điểm thủy văn

Dải ven biển thành phố Đà Nẵng có mạng lưới sông ngòi tương đối dày, phần lớn bắt nguồn từ sườn đông dãy Trường Sơn và đổ trực tiếp ra Biển Đông. Các sông trong khu vực nhìn chung có lưu vực hẹp, địa hình dốc, chiều dài ngắn, chế độ dòng chảy mang tính đặc trưng của miền Trung với nhịp điệu lũ lên nhanh – rút nhanh, gắn chặt với mưa bão và gió mùa. Các hệ thống sông chính theo thứ tự từ bắc xuống nam gồm sông Cu Đê, sông Hàn (hệ Cẩm Lệ – Túy Loan), sông Vu Gia – Thu Bồn và sông Tam Kỳ; ngoài ra còn có các sông ven biển chảy song song với bờ như sông Cò Cò và sông Trường Giang.

Sông Cu Đê là hệ thống sông ngắn nhưng có ý nghĩa quan trọng đối với vùng bờ phía bắc thành phố Đà Nẵng. Sông bắt nguồn từ khu vực núi cao, chảy theo hướng tây – đông và đổ ra biển tại cửa Nam Ô. Với lưu vực khoảng 426 km² và địa hình dốc, sông Cu Đê có dòng chảy xiết vào mùa mưa, cung cấp một lượng

phù sa đáng kể (ước tính 0,2–0,3 triệu tấn/năm) cho khu vực cửa sông và vùng ven biển lân cận. Nguồn vật liệu này góp phần duy trì cân bằng trầm tích cho bãi biển, rạn triều và hệ sinh thái ven bờ khu vực phía bắc thành phố.

Sông Hàn là đoạn hạ lưu của hệ thống sông Cẩm Lệ – Túy Loan – Yên, chảy qua trung tâm đô thị Đà Nẵng và đổ ra biển qua cửa sông Hàn. Do chịu tác động mạnh của quá trình đô thị hóa và điều tiết dòng chảy thượng nguồn, tải lượng phù sa của sông Hàn hiện nay không lớn; tuy nhiên, dòng chảy vẫn đóng vai trò quan trọng trong trao đổi nước ngọt – nước mặn, duy trì các bãi bồi cửa sông và ảnh hưởng đến động lực trầm tích trong vịnh Đà Nẵng.

Hệ thống sông Vu Gia – Thu Bồn là lưu vực lớn nhất miền Trung, có vai trò chi phối mạnh mẽ đến thủy văn và cân bằng trầm tích vùng bờ phía nam thành phố Đà Nẵng. Hai nhánh chính hợp lưu tại khu vực Giao Thủy và đổ ra biển qua cửa Đại. Với diện tích lưu vực khoảng 10.350 km² và lưu lượng dòng chảy trung bình 11,5–12 tỷ m³/năm, hệ thống này từng cung cấp nguồn phù sa lớn (ước tính 15–20 triệu tấn/năm) cho đồng bằng ven biển và bờ biển Cửa Đại. Tuy nhiên, sự phát triển mạnh của các công trình thủy điện và hồ chứa thượng nguồn đã làm suy giảm đáng kể lượng phù sa ra biển (chỉ còn khoảng 30–40%), là một trong những nguyên nhân chính dẫn đến xói lở nghiêm trọng bờ biển Cửa Đại trong những thập kỷ gần đây.

Sông Tam Kỳ bắt nguồn từ vùng núi phía tây, chảy theo hướng tây – đông và đổ ra biển tại cửa An Hòa. Lưu vực có diện tích khoảng 775 km², với lưu lượng và tải lượng phù sa trung bình (0,4–0,6 triệu tấn/năm), tập trung chủ yếu vào mùa mưa. Dòng sông này góp phần bồi tụ khu vực cửa sông, đầm phá và các vùng nuôi trồng thủy sản ven biển phía nam thành phố.

Bên cạnh các sông đổ trực tiếp ra biển, khu vực ven biển thành phố Đà Nẵng còn có các sông ven biển chạy song song với bờ như sông Cổ Cò và sông Trường Giang, phát triển trên các trũng đầm phá và vũng vịnh cổ. Sông Cổ Cò nối Đà Nẵng với Hội An, có lưu vực nhỏ và tải lượng phù sa hạn chế nhưng giữ vai trò quan trọng trong điều tiết thủy văn ven biển, phân phối bùn cát cục bộ và kết nối không gian sông – biển. Sông Trường Giang dài khoảng 65 km, chảy dọc ven biển phía nam, với dòng chảy hiền hòa và tải lượng phù sa trung bình khoảng 0,5–1,0 triệu tấn/năm, góp phần duy trì bãi bồi, đầm phá và nguồn dinh dưỡng cho các hệ sinh thái và sinh kế ven biển.

2.1.2.5. Đặc điểm hải văn

Chế độ sóng khu vực ven biển thành phố Đà Nẵng chịu chi phối chủ yếu bởi gió mùa, bão và đặc điểm hình thái vùng bờ. Trong mùa đông, khi gió mùa Đông Bắc hoạt động mạnh, sóng biển có độ cao trung bình khoảng 1–2 m, đạt cực đại vào tháng 12, với hướng sóng thịnh hành là Đông Bắc. Trong các đợt gió mùa tăng cường hoặc khi bão, áp thấp nhiệt đới ảnh hưởng trực tiếp, độ cao sóng có thể tăng mạnh, gây xói lở bờ biển và thiệt hại đáng kể cho các hoạt động kinh tế – xã hội ven bờ. Vào mùa hè, sóng có độ cao trung bình khoảng 1,4–2,0 m, đạt cực đại vào tháng 8; hướng sóng chủ đạo là Đông Nam, tương đối ổn định với tần suất chiếm khoảng 80%.

Dòng chảy biển trong khu vực chịu tác động tổng hợp của gió mùa và địa hình ven bờ. Ở vùng khơi, trong các tháng từ tháng 1 đến tháng 4 và từ tháng 10 đến tháng 12, dòng chảy có hướng chủ đạo Tây Nam, với tốc độ trung bình khoảng 25–75 cm/s. Ngược lại, trong mùa hè (từ tháng 5 đến tháng 9), dòng chảy chuyển sang hướng Đông Bắc, với tốc độ phổ biến từ 10–25 cm/s. Tại vùng ven bờ, dòng chảy dọc bờ theo hướng Bắc – Nam chiếm ưu thế và tồn tại gần như quanh năm; vào mùa đông, khi gió mùa Đông Bắc mạnh, tốc độ dòng chảy ven bờ có thể đạt tới 80–90 cm/s, đóng vai trò quan trọng trong vận chuyển trầm tích dọc bờ.

Chế độ thủy triều trong khu vực nghiên cứu chủ yếu là bán nhật triều không đều, song có sự phân hóa theo không gian. Khu vực ven biển Đà Nẵng và phía bắc Quảng Nam cũ trước đây chịu ảnh hưởng của chế độ bán nhật triều không đều, với biên độ triều trong kỳ nước cường trung bình khoảng 0,8–1,2 m. Về phía nam, chế độ triều chuyển dần sang nhật triều không đều, với biên độ triều trong kỳ nước cường tăng lên khoảng 1,2–2,0 m. Ngoài ra, hiện tượng nước dâng do gió mùa và bão thường xuyên xảy ra, có thể đạt giá trị từ 1,5 đến 3,0 m tùy theo cường độ, hướng gió và hình thái bờ, làm gia tăng đáng kể nguy cơ ngập lụt và xói lở vùng ven biển.

2.1.3. Đặc điểm dân cư, kinh tế - xã hội và sử dụng đất

2.1.3.1. Đặc điểm dân cư và kinh tế - xã hội

Dải ven biển thành phố Đà Nẵng là nơi tập trung dân cư đông đúc và phát triển năng động bậc nhất miền Trung. Tính đến năm 2023, thành phố Đà Nẵng (cũ) có quy mô dân số khoảng 1,20–1,25 triệu người, mật độ trung bình xấp xỉ 880–900 người/km². Dân cư phân bố rất không đồng đều, tập trung cao tại các quận ven biển và cận biển. Quận Thanh Khê và Hải Châu có mật độ rất cao, lần lượt trên 15.000–20.000 người/km², phản ánh mức độ đô thị hóa lõi. Quận Sơn Trà và Ngũ

Hành Sơn có mật độ trung bình 3.000–5.000 người/km², gắn với phát triển du lịch – dịch vụ ven biển. Ngược lại, quận Liên Chiểu và huyện Hòa Vang (cũ) có mật độ thấp hơn, dưới 1.000 người/km², đóng vai trò không gian mở rộng đô thị và công nghiệp. Tỉnh Quảng Nam (cũ) năm 2023 có dân số khoảng 1,5–1,6 triệu người, mật độ trung bình 150–160 người/km², thấp hơn nhiều so với Đà Nẵng. Tuy nhiên, tại các địa phương ven biển, mật độ tăng rõ rệt. Thành phố Hội An đạt gần 100.000 người trên diện tích ~61,5 km², mật độ khoảng 1.500–1.600 người/km². Thị xã Điện Bàn có trên 220.000 người, mật độ xấp xỉ 1.000 người/km²; trong khi các huyện ven biển Duy Xuyên, Thăng Bình, Núi Thành chỉ đạt 280–450 người/km². Sự phân hóa mạnh về quy mô và mật độ dân cư giữa các khu vực ven biển đô thị hóa cao và vùng ven biển nông – ngư nghiệp là yếu tố xã hội quan trọng tác động trực tiếp đến áp lực sử dụng đất, hạ tầng và biến động đường bờ tại khu vực nghiên cứu.

Dải ven biển thành phố Đà Nẵng là không gian phát triển kinh tế – xã hội năng động, nơi tập trung đồng thời các hoạt động khai thác thủy sản, công nghiệp, cảng biển và du lịch. Ngư dân tại các địa phương ven biển như quận Sơn Trà, Liên Chiểu (Đà Nẵng cũ), thành phố Hội An, thị xã Điện Bàn, huyện Núi Thành và xã Tam Quang (Quảng Nam cũ) duy trì đội tàu đánh bắt xa bờ quy mô lớn, đồng thời phát triển nuôi trồng thủy sản nước mặn và nước lợ tại các cửa sông, đầm phá như cửa sông Hàn, cửa Đại, An Hòa và hệ đầm phá Trường Giang. Cảng cá Thọ Quang (quận Sơn Trà) là trung tâm hậu cần nghề cá lớn nhất khu vực, cùng với các cảng cá Kỳ Hà và Tam Quang (Núi Thành cũ) hình thành mạng lưới dịch vụ khai thác – chế biến thủy sản ven biển, giải quyết việc làm cho lực lượng lao động địa phương.

Hoạt động công nghiệp ven biển phát triển theo mô hình cụm – tuyến. Tại Đà Nẵng (cũ), các khu công nghiệp lớn gồm Hòa Khánh (quận Liên Chiểu), Liên Chiểu, Hòa Cầm (quận Cẩm Lệ) và Khu công nghiệp thủy sản Thọ Quang, tập trung các ngành cơ khí, điện – điện tử, chế biến thủy sản và vật liệu xây dựng. Ở khu vực Quảng Nam (cũ), trọng tâm là Khu kinh tế mở Chu Lai (huyện Núi Thành) với các khu công nghiệp Bắc Chu Lai, Tam Hiệp, Tam Thăng và Điện Nam – Điện Ngọc, gắn với công nghiệp ô tô, dệt may, da giày và chế biến gỗ. Mạng lưới công nghiệp – cảng biển này tạo động lực tăng trưởng quan trọng cho toàn vùng ven biển phía nam thành phố Đà Nẵng.

Song song với công nghiệp, du lịch ven biển phát triển mạnh tại các địa danh như Mỹ Khê, Non Nước, bán đảo Sơn Trà (Đà Nẵng); Cửa Đại, An Bàng, Hà My, Tam Thanh (Quảng Nam cũ), hình thành chuỗi đô thị – du lịch liên tục dọc bờ

biển. Tuy nhiên, sự tập trung cao của dân cư, hạ tầng và các khu du lịch ven biển cũng làm gia tăng mức độ phơi lộ trước các tai biến tự nhiên.

Dải bờ biển thành phố Đà Nẵng thường xuyên chịu tác động của bão, sóng lớn, triều cường và biến đổi khí hậu, dẫn tới nhiều đoạn bờ bị xói lở nghiêm trọng, đặc biệt tại Nguyễn Tất Thành, Mỹ Khê – Non Nước, Cửa Đại – Hội An, Điện Dương – Điện Ngọc và Tam Thanh. Để bảo vệ dân cư, hạ tầng và các khu du lịch, chính quyền địa phương đã triển khai nhiều công trình phòng chống sạt lở. Ở Đà Nẵng, hệ thống kè biển Nguyễn Tất Thành dài hơn 15 km bằng bê tông và rọ đá được xây dựng nhằm bảo vệ tuyến giao thông ven biển; tại Mỹ Khê – Non Nước, kè cứng kết hợp trồng rừng phi lao được sử dụng để giảm tác động trực tiếp của sóng. Ở Quảng Nam (cũ), khu vực Cửa Đại – Hội An được đầu tư hệ thống kè bê tông, rọ đá và bao cát địa kỹ thuật; từ năm 2022, đê biển ngầm cách bờ khoảng 150 m đã góp phần giảm xói lở tại chỗ nhưng đồng thời làm dịch chuyển xu thế xói lở về phía bắc, nơi chưa có công trình bảo vệ. Ngoài ra, các khu vực Tam Hải, Núi Thành cũng xây dựng kè bảo vệ khu dân cư và hạ tầng du lịch. Nhìn chung, hệ thống công trình cứng kết hợp với giải pháp sinh thái (trồng rừng phi lao, rừng ngập mặn ven cửa sông) đã giúp giảm thiểu thiệt hại trước mắt, song vẫn bộc lộ hạn chế về hiệu quả lâu dài, đặt ra yêu cầu tiếp cận quản lý tổng hợp và bền vững vùng bờ.

2.1.3.2. Hiện trạng sử dụng không gian ven biển

Khu vực ven biển thành phố Đà Nẵng là một không gian địa lý đa dạng về hình thái địa mạo, hệ sinh thái và điều kiện tự nhiên – xã hội, từ đó hình thành nhiều loại hình khai thác và sử dụng tài nguyên khác nhau (Bảng 2.1). Các hình thức sử dụng không gian ven biển vừa phản ánh sự thích ứng lâu dài của cộng đồng cư dân với điều kiện tự nhiên, vừa chịu tác động mạnh mẽ của quá trình đô thị hóa, phát triển du lịch – công nghiệp và các chính sách quản lý vùng bờ.

Tại các dải bờ biển cát thoải, thấp, điển hình như khu vực ven biển Điện Nam – Điện Ngọc (thị xã Điện Bàn cũ), Duy Hải – Duy Nghĩa (huyện Duy Xuyên cũ) và một phần ven sông Trường Giang (huyện Núi Thành cũ), cảnh quan chủ đạo là bãi cát dài, bằng phẳng, phía sau phát triển hệ đụn cát thấp và rừng phòng hộ ven biển với phi lao, muồng biển và các loài cây chịu mặn. Các khu vực này nhìn chung có mức độ ổn định hình thái tương đối cao trong điều kiện tự nhiên bình thường, thuận lợi cho bố trí đất ở nông thôn ven biển, nông nghiệp quy mô nhỏ (rau màu, hoa màu trên đất cát) và nuôi trồng thủy sản nước lợ. Đây cũng là không gian cư trú truyền thống của nhiều làng chài ven biển, với sinh kế gắn bó chặt chẽ với khai thác thủy sản gần bờ và cửa sông.

Ngược lại, các đoạn bờ đá và bờ dốc, phân bố rõ tại phía bắc bán đảo Sơn Trà (quận Sơn Trà cũ) và khu vực Gành đá Bàn Than – mũi An Hòa (huyện Núi Thành cũ), có địa hình dốc, nền đá gốc lộ thiên (granit, đá biến chất hoặc đá trầm tích). Do hạn chế về quỹ đất và điều kiện sản xuất, các khu vực này ít phát triển dân cư tập trung và nông nghiệp, nhưng lại được ưu tiên cho các loại hình du lịch sinh thái, du lịch nghỉ dưỡng cao cấp và hạ tầng cảng biển. Điển hình là khu du lịch sinh thái bán đảo Sơn Trà và các Resort, được bố trí bám theo sườn núi ven biển, khai thác cảnh quan tự nhiên đá gốc và hệ sinh thái rừng. Đồng thời, các khu bờ đá có nền móng ổn định cũng là vị trí thuận lợi để xây dựng cảng Tiên Sa và các công trình hạ tầng biển quan trọng của thành phố.

Giữa các khu vực bờ đá và bờ cát ổn định là các dải bờ cát động, như bãi Bắc, bãi Rạng (Sơn Trà cũ) và bãi biển Tam Thanh (thành phố Tam Kỳ cũ). Đây là những không gian có tính biến động hình thái cao, thường xuyên chịu tác động của sóng, gió mùa và bão, đồng thời cũng là nơi diễn ra sự chuyển tiếp giữa xói lở và bồi tụ. Các khu vực này hiện được sử dụng theo hướng đa mục đích: kết hợp rừng chắn cát – chắn gió, nuôi trồng thủy sản quy mô nhỏ, phát triển du lịch cộng đồng và các khu nghỉ dưỡng vừa và nhỏ. Trường hợp Tam Thanh là ví dụ điển hình cho mô hình kết hợp giữa bảo tồn làng chài truyền thống, không gian văn hóa ven biển và phát triển du lịch cộng đồng.

Một dạng không gian đặc thù khác là vùng cửa sông – ven biển, nơi tương tác mạnh giữa thủy triều và dòng chảy sông, hình thành các doi cát, cồn bãi và bãi triều. Các khu vực như cửa sông Cổ Cò, cửa Đại (Hội An cũ) và cửa sông Trường Giang – An Hòa (Núi Thành cũ) có cơ cấu sử dụng đất đa dạng, gồm nuôi trồng thủy sản nước lợ, khu nghỉ dưỡng ven sông – ven biển, đất ở của cộng đồng ngư dân và các khu đô thị mới. Quá trình đô thị hóa nhanh, tiêu biểu tại dải Điện Ngọc – Hội An, phản ánh xu thế mở rộng không gian đô thị về phía biển.

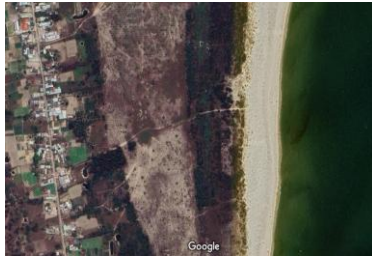
Tuy nhiên, cường độ khai thác cao cũng kéo theo nhiều vấn đề môi trường và quản lý. Việc lấn chiếm bãi biển và hành lang bảo vệ bờ tại Mỹ Khê, Non Nước (Đà Nẵng cũ) và Cửa Đại (Hội An cũ) làm suy giảm rừng phòng hộ, phá vỡ cân bằng bùn cát và gia tăng nguy cơ xói lở. Hoạt động nuôi trồng thủy sản công nghiệp tại Cẩm Thanh (Hội An cũ) và Tam Giang – Tam Hải (Núi Thành cũ) tiếp tục gây áp lực lên môi trường nước và đất. Điều này cho thấy sử dụng không gian ven biển thành phố Đà Nẵng là một hệ thống tương tác phức tạp giữa tự nhiên – xã hội và phát triển kinh tế, đòi hỏi quy hoạch tổng hợp vùng bờ nhằm hài hòa giữa bảo tồn và phát triển bền vững

Bảng 2.1. Bảng mô tả các loại hình cảnh quan và ví dụ minh họa trên ảnh thu thập từ GE

1. Vùng bờ biển thoải			
<p>Bờ có rừng phòng hộ sát biển hoặc bờ cát tiền tiêu ổn định, có cây mọc. Ví dụ: ở Duy Xuyên</p> 	<p>Bờ có rừng thưa (có thể do khai thác phục vụ sản xuất, hoặc cây mọc thấp) Ví dụ: ở Núi Thành</p> 	<p>Bờ có rừng phủ rất thưa, trơ bờ cát Ví dụ: ở Duy Xuyên</p> 	<p>Nuôi trồng thủy - hải sản Ví dụ: ở Thăng Bình</p> 
<p>Nông nghiệp khác ven biển Ví dụ: ở Núi Thành</p> 	<p>Bờ có dân cư sát biển Ví dụ: ở Sơn Trà</p> 	<p>Bờ có dân cư phân bố sau 1 hàng cây khoảng 5-50m Ví dụ: ở Điện Dương</p> 	<p>Bờ có dân cư phân bố sau dải rừng phòng hộ 50-100m Ví dụ: ở Núi Thành</p> 

Bờ có dân cư phân hàng cây > 100m – bán kính đến 200m sẽ được xét là loại 2.

Ví dụ: ở Duy Hải



Bờ có dân cư sinh sống sau bờ kè

Ví dụ: ở Liên Chiểu



Bờ có khu du lịch sát biển

Ví dụ: ở Ngũ Hành Sơn



Bờ có công trình nhà nước – cầu cảng

Ví dụ: ở Kỳ Hà



Bờ có khu công nghiệp sát biển
Ví dụ: ở Liên Chiểu



Bờ có công trình đang thi công/đã quy hoạch sát biển
Ví dụ: ở Ngũ Hành Sơn



2. Vùng bờ đá

Bờ đá có rừng phòng hộ

Ví dụ: ở Sơn Trà



Bờ đá dùng cho phát triển khu du lịch/khu công nghiệp/cầu cảng - Đã xây dựng xong và đã đi vào hoạt động

Ví dụ: ở Sơn Trà



Bờ đá lộ tro đá gốc/thực vật thưa thớt

Ví dụ: ở Tam Hải



Phân lô quy hoạch khu du lịch/khu công nghiệp/cầu cảng

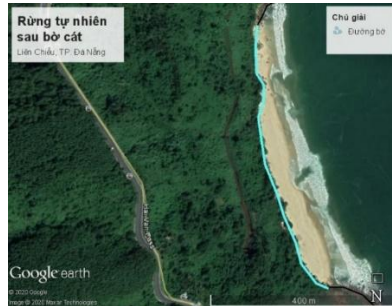
Ví dụ: ở Sơn Trà



3. Vùng bờ cát giữa bờ đá - chỉ xét đến các bờ cát có chiều dài trên 50m

Có rừng tự nhiên sau bờ cát

Ví dụ: ở Liên chiểu



Nuôi trồng thủy hải sản và nông nghiệp sau bờ cát (Thăng Bình)



Khu dân cư sát biển sau bờ cát (Ví dụ: ở Tam Tiến)



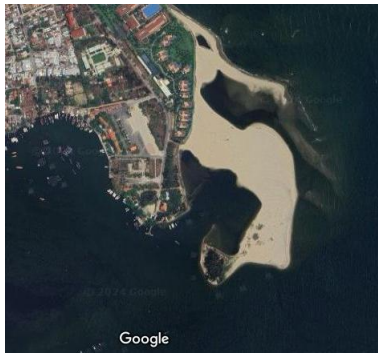
Khu du lịch sau bờ cát

Ví dụ: ở Sơn Trà



4. Vùng cửa sông

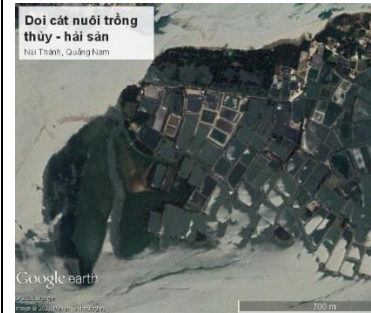
Doi cát phôi thai
Ví dụ: ở Cửa Đại



Doi cát có thực vật
Ví dụ: ở Tam Hải



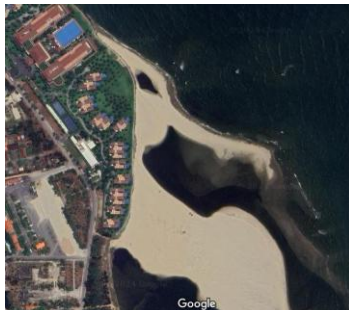
Doi cát dùng cho nuôi
trồng thủy – hải sản
Ví dụ: ở Núi Thành



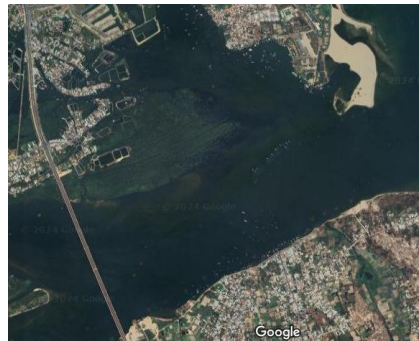
Doi cát có dân cư phân bố
sau một tới một vài hàng
cây > 100m – bán kính đến
200m; rộng hơn sẽ được xét
là loại 2.
Ví dụ: ở Tam Hải



Doi cát có khu du lịch
Ví dụ ở Cửa Đại



Cửa sông
Ví dụ: ở Cửa Đại

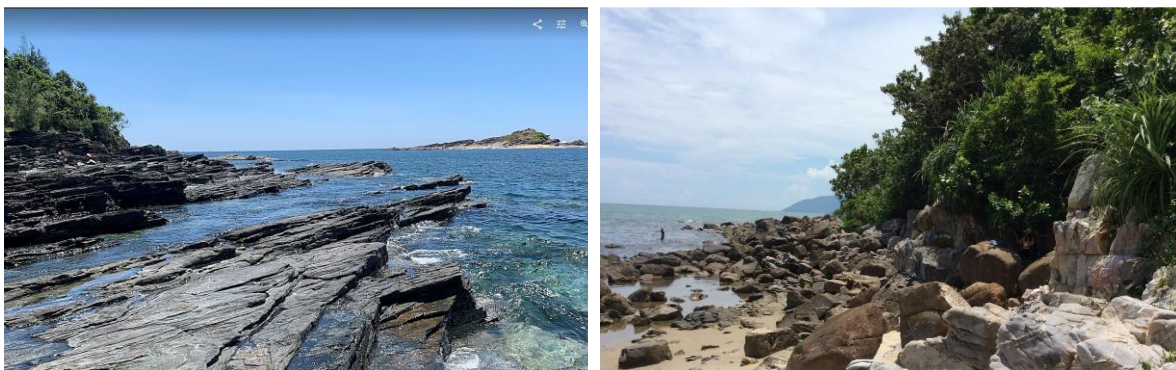


2.1.4. Phân hóa kiểu bờ và vùng bờ khu vực nghiên cứu

2.1.4.1. Các kiểu bờ biển thành phố Đà Nẵng

Nhằm mục đích đánh giá biến động bờ biển, việc phân kiểu, phân đoạn bờ biển là hết sức quan trọng. Trên cơ sở phân tích đặc điểm hình thái, vật chất cấu tạo bờ, nguồn gốc hình thành, có thể phân chia bờ biển thành phố Đà Nẵng thành các kiểu chính được mô tả sơ bộ dưới đây.

1. Nhóm kiểu bờ biển mài mòn trên đá rắn chắc được phân chia thành các kiểu bờ sau: (1a) Bờ mài mòn trên các đá magma axit được phân loại cho các bờ được cấu tạo cả bởi đá xâm nhập thành phần axit. Các đá magma này đều có cấu tạo dạng khối/phân lớp dày, bị đập vỡ mạnh, độ bền vững cao, quá trình mài mòn của sóng biển có năng lượng lớn, tạo nên các vách biển dốc hoặc lộ trơ đá góc. Với độ bền vững cao, các đá magma axit là thành phần chính cấu tạo nên các mũi nhô và đảo ven bờ. Điển hình cho kiểu bờ này là bờ biển khu vực mũi Hải Vân, bán đảo Sơn Trà cấu tạo bởi đá granit phức hệ Hải Vân (T_3hv). Bờ có vách dốc trên 45^0 do mài mòn và đổ lở bắt đầu từ sát mép nước, lên tới độ cao 20 – 30m, chiều rộng 40 – 50m. Phía trên vẫn là sườn dốc, song vẫn còn lớp phủ thực vật thưa ; (1b) Bờ mài mòn trên đá trầm tích và biến chất phân bố ở mũi Nam Ô thuộc thành phố Đà Nẵng và khu vực mũi An Hòa, Kỳ Hà thuộc Núi Thành.



Hình 2.3. Vách và nền mài mòn trên đá biến chất hệ tầng Khâm Đức tại Kỳ Hà, Thành phố Đà Nẵng (ảnh trái) và trên đá trầm tích hệ tầng Tân Lâm tại Nam Ô (ảnh phải) (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 6/2023)

Hình thái bờ biển mài mòn trên các đá trầm tích lục nguyên có đặc điểm khác nhau theo tương quan của bờ biển với hướng dốc của đá. Bờ phát triển ngược hướng dốc của đá thường tạo vách dốc (kliff) với nền mài mòn (bench) rộng; trái lại, các bờ phát triển theo hướng dốc của trầm tích thường có địa hình phù hợp hướng và góc dốc của đá góc (Hình 2.3). Các đá trầm tích biến chất hệ tầng A Vương lộ ra ở mũi An Hòa và Kỳ Hà chủ yếu là đá phiến sericit có góc cắm thoải

ngiên về phía đất liền, bờ phía đông bị mài mòn với các vách dốc, nền mài mòn rộng.

2. *Nhóm bờ biển tích tụ - xói lở chủ yếu do sóng* phân bố khá rộng rãi dọc bờ biển thành phố Đà Nẵng, được chia thành một số kiểu sau: (2a) *Kiểu bờ tích tụ - xói lở trên bờ cát thấp* phân bố từ bãi biển Thọ Quang giáp chân núi bán đảo Sơn Trà đến Đông Mỹ An (Đà Nẵng) và từ Nam Cửa Đại – Duy Hải (Quảng Nam cũ) (Hình 2.4). Đây là khu vực bờ biển tích tụ hoặc xem kẽ tích tụ - xói lở. Phía tây bãi biển là bề mặt tích tụ thêm 2 – 3m, nghiêng thoải xuống bãi biển. Khu vực Thọ Quang đã được xây dựng đê/kè biển từ khoảng năm 2003 – 2005. Sau khi xây dựng, bãi biển tiếp tục được tích tụ, mở rộng. Giáp chân kè/đê biển phát triển bãi sau, được phủ bởi thực vật tự nhiên dày. Hoạt động xói lở một số năm đã tác động mạnh vào bãi sau này.



Hình 2.4. Kiểu bờ biển tích tụ - xói lở bờ cát thấp ở nam Cửa Đại (Nguồn: Giang Tuấn Linh 6/2023)

(2b) *Kiểu bờ tích tụ - xói lở trên bờ cát cao*: Đặc trưng của kiểu bờ này là các bãi biển lấn sát chân đụn cát cao, chính là đường bờ trong – đường bờ xói lở. Phía trong bãi biển là các đụn cát có độ cao 5-20m. Hoạt động xói lở bờ vẫn xảy ra, song do các vách xói lở đột biến trong các trận bão lớn cắt vào đụn cát cao, lôi kéo cát xuống bước. Lượng cát bị xói lở này tham gia vào quá trình cân bằng bãi, làm giảm khả năng xói lở của các thời kỳ tiếp theo. Kiểu bờ biển này phân bố khá phổ biến suốt chiều dài từ Non Nước – Thanh Khê, Mỹ Khê (Đà Nẵng) đến Hà My và các đoạn bờ còn lại thuộc.

3. *Nhóm bờ biển tích tụ - xói lở vũng vịnh* gồm bờ tích tụ - xói lở vũng vịnh nửa kín (Đà Nẵng) và bờ tích tụ - xói lở vũng vịnh mở (vịnh Dung Quất). Nhìn chung bờ có bãi biển rộng, thoải, cấu tạo bởi cát hạt nhỏ đến trung. Tích tụ là chủ yếu, song vẫn có hiện tượng xói lở. Hoạt động xói lở gia tăng khi nhiều nơi xây dựng kè chắn (Thanh Khê – Nam Ô, Đà Nẵng).

4. *Bờ tích tụ - xói lở khu vực cửa sông* phân bố ở ba khu vực : i) vùng cửa sông Cu Đê (Đà Nẵng) ; ii) Vùng cửa sông Thu Bồn và iii) vùng cửa Kỳ Hà. Nhìn

chung, đây là khu vực có bờ biển biến động mạnh nhất, cả xói lở và bồi tụ, tác động mạnh tới kinh tế - xã hội. Khu vực cửa sông này đã được quy hoạch hệ thống khách sạn, resort khá dày. Từ khoảng năm 2006 đến nay, bờ biển bị xói lở liên tục, nay hầu như không còn bãi biển.

5. *Bờ tích tụ - mài mòn cung bờ lõm giữa các mũi đá* phân bố ở khu vực Sơn Trà và Hải Vân. Tại bán đảo Sơn Trà, không phải tất cả các cung bờ lõm đều có bãi biển, đặc biệt là các cung bờ lõm ở phía bắc, nơi các vách đá vẫn lấn xuống sát mép nước, tạo nên sự hiểm trở nơi đây.

6. *Bờ biển nhân tạo* là các đoạn bờ biển được san lấp và xây dựng các công trình kè sát bờ biển tự nhiên, làm thay đổi hoàn toàn bản chất của bờ biển tự nhiên và không nhận dạng được hình thái tự nhiên của bờ biển này. Trong phạm vi thành phố Đà Nẵng, đường bờ nhân tạo phân bố từ điểm bắt đầu của ranh giới phía tây quận Sơn Trà, chân cầu Thuận Phước tới phía tây mũi Tiên Sa, nơi có cảng biển nước sâu Tiên Sa. Nhóm bờ biển nhân tạo này được phân chia chi tiết thành 3 đoạn bờ sau: i) Bờ nhân tạo do lấn biển cho khu đô thị mới Thuận Phước ; ii) Bờ nhân tạo do lấn biển cho âu thuyền/cảng cá Thọ Quang và iii) Bờ nhân tạo do lấn biển xây dựng cơ ở hạ tầng cảng Tiên Sa.

2.1.4.2. *Đặc điểm phân hóa các kiểu vùng bờ khu vực nghiên cứu*

Khu vực nghiên cứu từ ven biển thành phố Đà Nẵng đến hết dải ven biển Núi Thành là không gian vùng bờ có mức độ phân hóa cao về địa mạo và động lực biển – sông. Trên cơ sở tổng hợp các đặc điểm tự nhiên kết hợp với thông tin dân cư, kinh tế – xã hội và sử dụng đất (mục 2.1.3), đặc biệt là các loại hình cảnh quan trong Bảng 2.1, có thể phân hóa khu vực nghiên cứu thành các kiểu vùng bờ tự nhiên chủ yếu gắn với các địa danh điển hình sau.

a. *Vùng bờ biển mở – vùng bờ cát*

Đây là kiểu vùng bờ chiếm ưu thế, phân bố liên tục dọc ven biển Đà Nẵng – Hội An – Điện Bàn – Duy Xuyên – Núi Thành. Theo đặc điểm hình thái và nền địa mạo, vùng bờ biển mở cấu tạo bởi cát có thể chia thành:

- Bờ cát cao, đặc trưng bởi sự phát triển của các đụn cát tiền tiêu và dải cồn cát ven biển, phân bố điển hình từ Sơn Trà đến Cẩm An. Các đụn cát này đóng vai trò như lá chắn tự nhiên, góp phần ổn định tương đối đường bờ trong, song đang chịu áp lực lớn từ phát triển du lịch và hạ tầng ven biển.

- Bờ cát thấp, thường phân bố gần các khu vực cửa sông, nơi cao độ địa hình thấp và trầm tích bờ rời dễ tái phân bố. Dạng bờ này phổ biến ở các đoạn ven

biển lân cận cửa Thu Bồn và hệ thống Trường Giang – Tam Kỳ, với biến động đường bờ mang tính linh động cao theo mùa.

- Bờ cát xen kẽ giữa các đoạn bờ đá, có chiều dài ngắn, chịu ảnh hưởng cục bộ của địa hình nền, thường xuất hiện ở các đoạn chuyển tiếp giữa các mũi đá và bãi cát ven biển miền Trung.

b. Vùng bờ cửa sông

Vùng bờ cửa sông là các không gian chuyển tiếp điển hình giữa hệ thống sông và biển, có mức độ biến động hình thái cao. Trong khu vực nghiên cứu, kiểu vùng bờ này phân bố tại các cửa sông chính gồm Cu Đê, Hàn, Thu Bồn và hệ thống Trường Giang (khu vực Tam Kỳ – Núi Thành). Địa hình đặc trưng bởi các doi cát, bãi bồi, cồn cát cửa sông và vùng đất ngập nước ven bờ; biến động đường bờ tại đây chịu tác động tổng hợp của dòng chảy sông, sóng biển và các hoạt động sử dụng đất ven sông – ven biển.

c. Vùng bờ vũng vịnh

Vùng bờ vũng vịnh phân bố chủ yếu tại vịnh Đà Nẵng, nơi được che chắn một phần bởi cấu trúc địa hình nền, có mức độ năng lượng sóng thấp hơn so với bờ biển mở. Hình thái bờ tương đối ổn định, quá trình bồi tụ chiếm ưu thế cục bộ, song chịu tác động rõ của các hoạt động cảng biển, giao thông và đô thị hóa ven vịnh.

c. Vùng bờ đá

Vùng bờ đá phân bố rải rác tại các khu vực có nền đá gốc lộ diện, điển hình là Hải Vân, Sơn Trà, và một đoạn nhỏ ở phía Nam cửa Kỳ Hà. Kiểu vùng bờ này có ranh giới đất – nước rõ ràng, biến động đường bờ thường mang tính cục bộ và chịu chi phối mạnh bởi cấu trúc địa chất và các sự kiện sóng bão cực đoan.

Nhìn chung, sự phân hóa các kiểu vùng bờ tự nhiên gắn với các địa danh cụ thể cho thấy biến động đường bờ trong khu vực nghiên cứu mang tính không đồng nhất cao, phụ thuộc chặt chẽ vào nền địa mạo, động lực biển – sông và mức độ can thiệp của con người. Đây là cơ sở khoa học trực tiếp để luận án tiếp tục lựa chọn và luận giải các khu vực nghiên cứu trọng điểm, đồng thời xây dựng bộ chỉ thị và phương pháp phân tích phù hợp trong các mục tiếp theo.

2.2. Thực trạng xói lở - bồi tụ bờ biển và cửa sông

2.2.1. Thực trạng xói lở – bồi tụ bờ biển

Trong nhiều thập kỷ gần đây, bờ biển thành phố Đà Nẵng thể hiện rõ xu thế biến động mạnh, với xói lở và bồi tụ diễn ra không đồng đều theo không gian và thời gian. Quá trình này chịu chi phối đồng thời bởi các yếu tố tự nhiên như sóng,

dòng chảy ven bờ, bão, nước dâng do gió mùa, cũng như các tác động nhân sinh ngày càng gia tăng dọc dải ven biển.

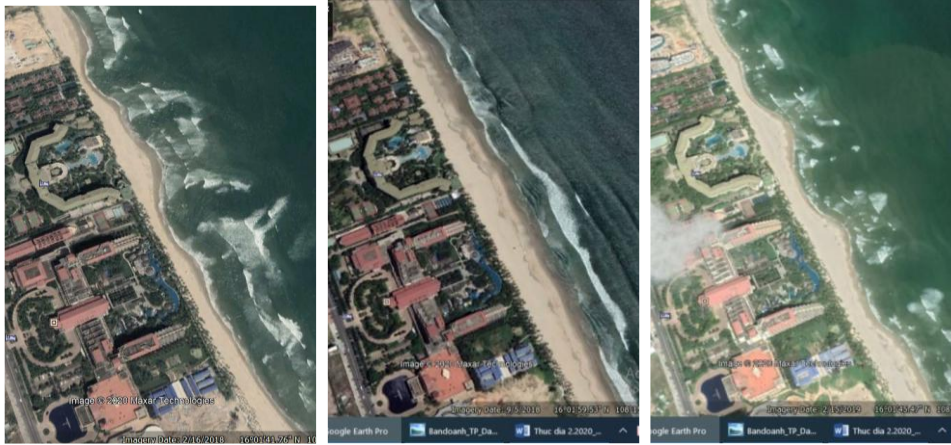
Các nghiên cứu tổng hợp và khảo sát thực địa cho thấy, hiện tượng xói lở đã xuất hiện kéo dài tại nhiều đoạn bờ quan trọng, đặc biệt ở các khu vực ven đô thị và khu công nghiệp. Trong vịnh Đà Nẵng, xói lở bờ biển ghi nhận rõ tại một số đoạn phía bắc, gắn với các khu vực có hoạt động công nghiệp và hạ tầng ven biển, trong đó khu vực lân cận Nhà máy xi măng Hải Vân được nhắc tới như một ví dụ điển hình về biến đổi hình thái bờ gắn với hoạt động nhân sinh. Mặc dù một số đoạn bờ trong vịnh được kè bảo vệ và có xu thế ổn định về mặt hình học, song sự ổn định này mang tính cưỡng bức, không phản ánh trạng thái cân bằng tự nhiên của hệ thống bờ.

Ở khu vực bờ biển từ Mân Thái – Mỹ Khê đến Non Nước, biến động bờ biển diễn ra liên tục trong thời gian dài, với xói lở chiếm ưu thế trong nhiều giai đoạn. Đây là dải bờ biển mở, chịu tác động trực tiếp của sóng gió mùa Đông Bắc, bão và triều cường, đồng thời là khu vực tập trung cao các hoạt động du lịch, đô thị hóa và xây dựng hạ tầng ven biển. Do đó, ngay cả những dịch chuyển nhỏ của đường bờ cũng gây ảnh hưởng rõ rệt đến không gian bãi biển và cảnh quan du lịch. Xói lở tại khu vực này thường xảy ra theo dạng cục bộ, từng đoạn ngắn, đặc biệt tại các vị trí bờ cát thấp, bờ bị can thiệp nhân sinh hoặc chưa được bảo vệ đồng bộ. Trong các đợt bão mạnh, đường bờ có thể dịch chuyển nhanh trong thời gian ngắn, gây sạt lở bãi tắm và hư hỏng các công trình dịch vụ ven biển. Ngược lại, bồi tụ chỉ xuất hiện tạm thời theo mùa và không đủ để bù đắp xu thế xói lở tổng thể. Hiện trạng này phản ánh tính nhạy cảm cao của dải bờ Mân Thái – Mỹ Khê – Non Nước trước các tác động tự nhiên kết hợp với quá trình phát triển đô thị ven biển.



Hình 2.5. Xói lở bờ biển khu du lịch Melia Đà Nẵng do bão tháng 12.2017

(Nguồn: Đặng Văn Bào, 12/2017)



Hình 2.6. Các ảnh vệ tinh thể hiện bờ biển đang chịu tác động mạnh của sóng vào mùa mưa.

Trong mùa mưa bão cuối năm 2017, bờ biển khu vực Non Nước bị xói lở nghiêm trọng. Xói lở tác động vào các công trình xây dựng ven biển, gây thiệt hại đáng kể. Do lấn biển (lấn bãi biển), bể bơi của khu du lịch Melia Đà Nẵng đã bị thiệt hại bởi xói lở bờ cục bộ trong mùa mưa bão cuối năm 2017 (Hình 2.5 và Hình 2.6). Bờ biển khu vực quận Ngũ Hành Sơn có sự khác biệt đáng kể giữa mùa khô và mùa mưa. Đường bờ đều có dạng lồi lõm, biểu hiện của các khu vực bị xói lở cục bộ. Và bờ được san phẳng vào mùa khô. Tại khu vực phía nam bãi tắm Mỹ Thủy, đường bờ khá ổn định, xói lở cũng chỉ có tính cục bộ, trong mùa mưa bão.

Khu vực từ An Bàng – Hà My đến Cửa Đại (Hội An cũ) là điểm nóng xói lở nghiêm trọng và kéo dài. Từ sau năm 2010 đến 2025, nhiều đoạn bờ biển Cửa Đại đã lùi sâu hàng chục đến hàng trăm mét, cuốn trôi bãi tắm, phá hủy hạ tầng du lịch, buộc nhiều khu nghỉ dưỡng phải gia cố khẩn cấp hoặc ngừng hoạt động. Nguyên nhân chính là sự suy giảm mạnh nguồn cung trầm tích từ hệ thống sông Vu Gia – Thu Bồn do chuỗi hồ chứa thượng nguồn, kết hợp với tác động của sóng, dòng dọc bờ và các công trình chỉnh trị cửa sông.

Tại khu vực bờ biển Tam Thanh – Tam Kỳ (cũ), biến động bờ biển thể hiện sự đan xen giữa xói lở và bồi tụ theo không gian và thời gian. Một số đoạn bờ chịu xói lở trong mùa mưa bão, trong khi các đoạn khác xuất hiện bồi tụ cục bộ, gắn với sự phân bố lại trầm tích ven bờ và ảnh hưởng của các công trình chỉnh trị. Xói lở bờ biển ở đây xảy ra mạnh trước năm 2020, nhiều vách xói lở đã tác động tới các đụn cát cao, nơi cư trú ổn định từ lâu của người dân làng Bích họa Tam Thanh. Nhằm bảo vệ các cụm dân cư này, chính quyền đã dây dựng hệ thống kè chắc ngay dưới chân gụn cát (Hình 2.7).



Hình 2.7. Dấu vết xói lở bờ biển cắt vào đụn cát cao, hiện đã được xây kè bảo vệ tại Tam Thanh, Tam Kỳ (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 6/2023)

Nhìn chung, các đoạn bờ biển nêu trên phản ánh xu thế xói lở – bồi tụ có tính dài hạn và chịu tác động tổng hợp của cả yếu tố tự nhiên và nhân sinh. Mặc dù không được lựa chọn làm khu vực nghiên cứu trọng điểm trong luận án, hiện trạng biến động tại các khu vực này đóng vai trò quan trọng trong việc làm rõ bối cảnh chung của biến động đường bờ thành phố Đà Nẵng, đồng thời củng cố cơ sở khoa học cho việc lựa chọn các khu vực nghiên cứu tiêu biểu ở các mục tiếp theo.

2.2.2. Thực trạng xói lở – bồi tụ vùng cửa sông

Các vùng cửa sông ven biển của thành phố Đà Nẵng là những không gian có động lực hình thái phức tạp nhất, nơi quá trình xói lở – bồi tụ diễn ra mạnh mẽ và có xu thế biến đổi dài hạn. Sự tương tác giữa dòng chảy sông, sóng biển, thủy triều và các hoạt động chỉnh trị nhân sinh đã tạo nên những biến động lớn về vị trí đường bờ, hình thái cửa sông và phân bố trầm tích ven bờ.

Trong phạm vi vịnh Đà Nẵng, cửa sông Cu Đê là khu vực tiêu biểu cho trạng thái mất ổn định hình thái kéo dài. Mặc dù nằm trong vùng vịnh kín gió tương đối so với bờ biển mở, cửa sông Cu Đê vẫn ghi nhận hiện tượng xói lở cục bộ tại bờ biển lân cận và biến động mạnh của các doi cát cửa sông. Quá trình bồi tụ – xói lở luân phiên tại cửa Cu Đê diễn ra theo mùa và theo các đợt mưa lũ lớn, ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng thoát lũ, ổn định luồng lạch và sinh kế cộng đồng ven sông. Các tác động nhân sinh như chỉnh trị cửa sông, khai thác cát và phát triển hạ tầng ven bờ đã làm gia tăng mức độ nhạy cảm của khu vực này trước tác động của sóng, triều và nước dâng do bão.

Ở khu vực cửa Đại (hệ thống Vu Gia – Thu Bồn), xói lở – bồi tụ thể hiện rõ tính chất mất cân bằng bùn cát ở quy mô lớn và kéo dài nhiều thập kỷ, tác động

manh tới bãi tắm Cửa Đại và các khu du lịch lân cận. Trong khi một số khu vực phía ngoài cửa sông và trong lòng cửa xuất hiện bồi tụ mạnh, hình thành các cồn cát và đảo bồi mới (tiêu biểu là các đảo bồi tại cửa Thu Bồn), thì các đoạn bờ biển lân cận lại chịu xói lở nghiêm trọng, gây thiệt hại lớn cho hạ tầng du lịch, khu dân cư và không gian bãi biển. tại cửa sông Thu Bồn lại diễn ra bồi tụ rất mạnh, hình thành các cồn cát lớn giữa cửa sông, tiêu biểu là “đảo Khủng Long”. Cồn bồi này phát triển nhanh trong hơn một thập kỷ qua, làm thu hẹp mặt cắt dòng chảy, thay đổi hướng và phân bố dòng triều – dòng sông, gây khó khăn cho giao thông thủy, gia tăng nguy cơ ngập lụt phía thượng lưu và góp phần làm mất cân bằng trầm tích ven bờ, gián tiếp thúc đẩy xói lở bờ biển Cửa Đại.

Tại khu vực cửa sông Kỳ Hà – Núi Thành, xói lở – bồi tụ diễn ra song song và có mối liên hệ chặt chẽ với quá trình phát triển cảng biển, khu công nghiệp và hạ tầng ven biển. Bồi tụ cửa sông và luồng lạch gây khó khăn cho hoạt động hàng hải, trong khi xói lở bờ biển lân cận đe dọa trực tiếp các khu dân cư và không gian phát triển công nghiệp – dịch vụ ven biển. Các biến động này có xu thế gia tăng theo thời gian, đặc biệt trong bối cảnh gia tăng tần suất bão mạnh và nước dâng do biến đổi khí hậu.

Nhìn chung, xói lở – bồi tụ tại các vùng cửa sông của thành phố Đà Nẵng không mang tính cục bộ hay ngắn hạn mà phản ánh quá trình biến đổi hình thái bờ – cửa sông có tính hệ thống và dài hạn, với tác động sâu sắc tới kinh tế – xã hội, môi trường và quy hoạch không gian ven biển. Đây chính là cơ sở khoa học quan trọng để lựa chọn các vùng cửa sông tiêu biểu làm khu vực nghiên cứu trọng điểm trong luận án, nhằm phân tích sâu cơ chế biến động đường bờ và đề xuất các giải pháp theo dõi, quản lý phù hợp.

2.2.3. Tác động của xói lở – bồi tụ và các giải pháp công trình đã triển khai

a. Tác động của xói lở - bồi tụ

Xói lở bờ biển và bồi tụ cửa sông tại thành phố Đà Nẵng không chỉ là hiện tượng địa mạo – thủy động lực đơn thuần mà đã và đang tạo ra những tác động sâu sắc tới phát triển kinh tế – xã hội trong dài hạn. Các quá trình này làm thu hẹp không gian bãi biển, đe dọa hạ tầng giao thông, khu du lịch ven biển, khu dân cư và các công trình công nghiệp, đồng thời gây bồi lấp luồng lạch, ảnh hưởng đến hoạt động cảng biển và khai thác thủy sản.

Điểm đáng chú ý là nhiều khu vực chịu tác động xói lở – bồi tụ mạnh lại trùng với các không gian phát triển trọng điểm của thành phố, nơi mật độ dân cư cao, giá trị kinh tế lớn và mức độ can thiệp nhân sinh mạnh. Sự kéo dài của các

quá trình này theo thời gian đã làm gia tăng chi phí phòng chống, duy tu công trình và đặt ra yêu cầu cấp thiết về theo dõi, đánh giá biến động bờ biển một cách hệ thống và định lượng.

Chính từ bối cảnh đó, các khu vực như vịnh Đà Nẵng, vùng ven biển Cửa Đại và ven biển Núi Thành được lựa chọn làm khu vực nghiên cứu trọng điểm trong luận án, nhằm phản ánh đầy đủ các dạng biến động bờ biển tiêu biểu, mức độ tác động nhân sinh khác nhau và những thách thức đặt ra cho công tác quản lý, quy hoạch vùng ven biển trong điều kiện biến đổi khí hậu và phát triển kinh tế – xã hội mạnh mẽ.

b. Các giải pháp công trình hạn chế thiệt hại do xói lở – bồi tụ

Trước diễn biến xói lở – bồi tụ ngày càng phức tạp và gây nhiều thiệt hại, chính quyền thành phố Đà Nẵng (mới) đã triển khai nhiều giải pháp công trình nhằm bảo vệ dân cư, hạ tầng và các khu kinh tế – du lịch ven biển. Các giải pháp này chủ yếu thuộc nhóm công trình cứng và bán cứng.

Tại khu vực Đà Nẵng cũ, hệ thống kè biển Nguyễn Tất Thành dài hơn 15 km được xây dựng bằng kết cấu bê tông, rọ đá và mái kè gia cố nhằm bảo vệ tuyến đường ven biển và khu dân cư trước sóng và triều cường. Ở dải Mỹ Khê – Non Nước, các đoạn kè cứng kết hợp trồng rừng phi lao đã góp phần giảm xói lở và ổn định bãi biển phục vụ du lịch.

Tại Hội An – Cửa Đại, hệ thống kè bảo vệ bờ biển được đầu tư với nhiều dạng kết cấu như kè bê tông, rọ đá và bao cát địa kỹ thuật. Đặc biệt, từ năm 2022, công trình đê biển ngầm cách bờ khoảng 150 m được xây dựng nhằm giảm năng lượng sóng. Công trình bước đầu hạn chế xói lở tại một số đoạn bờ, song đồng thời làm xuất hiện xu thế dịch chuyển xói lở sang các khu vực lân cận chưa được bảo vệ, cho thấy hiệu quả còn mang tính cục bộ.

Ở khu vực Tam Thanh – Tam Kỳ và Cửa Lở – Núi Thành, nhiều đoạn kè bảo vệ bờ biển và cửa sông được xây dựng khẩn cấp để bảo vệ khu dân cư, hạ tầng giao thông và các vùng nuôi trồng thủy sản. Bên cạnh đó, các biện pháp trồng rừng phi lao ven biển và rừng ngập mặn tại cửa sông được triển khai nhằm tăng cường khả năng phòng hộ tự nhiên và giảm sóng.

Mặc dù các giải pháp công trình đã góp phần giảm thiểu thiệt hại trước mắt, song hiệu quả lâu dài còn hạn chế do chưa giải quyết căn bản nguyên nhân mất cân bằng trầm tích ở quy mô vùng. Thực tiễn này cho thấy cần có các đánh giá khoa học chi tiết về biến động đường bờ và hình thái bờ biển, làm cơ sở cho việc lựa chọn giải pháp tổng hợp, kết hợp hài hòa giữa công trình kỹ thuật và giải pháp

sinh thái, hướng tới quản lý bền vững vùng ven biển thành phố Đà Nẵng trong dài hạn.

2.3. Các khu vực nghiên cứu trọng điểm

2.3.1. Cơ sở lựa chọn các khu vực nghiên cứu trọng điểm

Việc lựa chọn các khu vực nghiên cứu trọng điểm trong luận án được thực hiện trên cơ sở kết hợp giữa yêu cầu khoa học của nghiên cứu biến động đường bờ bằng viễn thám – học máy và đặc thù tự nhiên, kinh tế – xã hội của vùng ven biển thành phố Đà Nẵng. Các khu vực được lựa chọn không chỉ đại diện cho các kiểu bờ biển điển hình mà còn phản ánh rõ mức độ và cơ chế tác động khác nhau của các yếu tố tự nhiên và nhân sinh đến diễn biến đường bờ.

Thứ nhất, các khu vực nghiên cứu phải đại diện cho sự đa dạng về kiểu bờ biển trong không gian ven biển thành phố Đà Nẵng, bao gồm bờ cát hở, bờ cửa sông, bờ đầm phá – cửa vịnh và bờ nhân tạo. Sự đa dạng này cho phép đánh giá khả năng nhận dạng và theo dõi biến động đường bờ trong của các mô hình học máy trong những điều kiện hình thái và động lực bờ khác nhau.

Thứ hai, các khu vực được lựa chọn đều là những nơi có diễn biến xói lở – bồi tụ rõ rệt và phức tạp, đã được ghi nhận trong nhiều năm gần đây và gây tác động trực tiếp đến dân cư, hạ tầng và hoạt động kinh tế ven biển. Đây là điều kiện cần thiết để kiểm chứng tính hiệu quả của việc sử dụng ảnh viễn thám độ phân giải cao trong phát hiện và phân tích biến động đường bờ theo thời gian.

Thứ ba, các khu vực nghiên cứu thể hiện sự khác biệt về mức độ tác động nhân sinh, từ khu vực đô thị hóa và chính trị bờ mạnh (vịnh Đà Nẵng), khu vực cửa sông chịu ảnh hưởng tổng hợp của dòng chảy – sóng biển và các công trình phòng chống xói lở (Cửa Đại – Hội An), đến khu vực đang công nghiệp hóa với hoạt động san lấp, phát triển cảng biển và khu kinh tế ven biển (Núi Thành). Sự khác biệt này tạo cơ sở cho việc so sánh và đánh giá vai trò của các yếu tố nhân sinh trong biến động đường bờ.

Trên cơ sở các tiêu chí nêu trên, luận án lựa chọn ba khu vực nghiên cứu trọng điểm gồm: Vịnh Đà Nẵng, vùng ven biển Cửa Đại (Hội An) và vùng ven biển Núi Thành. Ba khu vực này vừa mang tính đại diện, vừa có tính điển hình về động lực và hình thái biến động đường bờ, đồng thời phù hợp để triển khai và kiểm chứng phương pháp nghiên cứu dựa trên viễn thám độ phân giải cao và mô hình học máy trong các nội dung tiếp theo của luận án.

2.3.2. Khu vực nghiên cứu trọng điểm: Vịnh Đà Nẵng

2.3.2.1. Vị trí địa lý và mối liên hệ cửa sông – bờ biển

Vịnh Đà Nẵng nằm ở phía bắc không gian ven biển thành phố Đà Nẵng, được giới hạn bởi mũi Hải Vân ở phía bắc, bán đảo Sơn Trà ở phía đông và dải bờ biển đô thị phía tây – tây nam. Vịnh mở ra biển Đông theo hướng đông nam, có dạng vịnh nửa kín, được che chắn tương đối bởi địa hình núi và bán đảo, tạo điều kiện thuận lợi cho phát triển cảng biển, đô thị ven biển và các hoạt động kinh tế biển.

Trong cấu trúc thủy – hải văn của vịnh, các cửa sông đóng vai trò quan trọng trong cung cấp nước ngọt, bùn cát và điều tiết động lực bờ. Đáng chú ý nhất là cửa sông Cu Đê ở phía bắc vịnh, nơi diễn ra sự tương tác trực tiếp giữa dòng chảy sông và sóng biển. Cửa sông Cu Đê có hình thái biến động mạnh theo mùa và theo năm, với bồi tụ thường chiếm ưu thế trong mùa mưa do gia tăng tải lượng bùn cát từ thượng lưu, trong khi xói lở có thể xảy ra tại các đoạn bờ cát lân cận dưới tác động của sóng mùa Đông Bắc và triều cường. Sự dịch chuyển vị trí cửa sông và biến đổi hướng dòng chảy ảnh hưởng trực tiếp đến cân bằng bùn cát và hình thái đường bờ trong khu vực Nam Ô – Hòa Hiệp.

Ở khu vực trung tâm và phía nam vịnh, hệ thống sông Hàn và các nhánh hợp lưu (Cẩm Lệ – Túy Loan) chủ yếu đóng vai trò tiêu thoát nước đô thị và điều tiết thủy triều, với tải lượng bùn cát ra biển không lớn. Tuy nhiên, trong bối cảnh đô thị hóa và chỉnh trị bờ mạnh, sự kết hợp giữa dòng chảy sông, thủy triều và các công trình ven bờ vẫn góp phần điều chỉnh trường sóng – dòng chảy cục bộ trong vịnh.

2.3.2.2. Điều kiện tự nhiên và đặc trưng động lực bờ biển

Vịnh Đà Nẵng chịu tác động tổng hợp của sóng biển, dòng chảy ven bờ và chế độ thủy triều bán nhật triều không đều. Sóng trong vịnh có xu thế suy giảm năng lượng so với khu vực biển hở do được che chắn bởi bán đảo Sơn Trà và dãy Hải Vân, song vẫn chịu ảnh hưởng mạnh trong các đợt gió mùa Đông Bắc và bão. Đặc điểm này tạo nên sự phân hóa rõ rệt về động lực bờ giữa khu vực phía bắc vịnh (Nam Ô – cửa sông Cu Đê), khu vực trung tâm vịnh và khu vực ven biển đô thị phía nam.

Hệ thống bờ biển trong vịnh Đà Nẵng có tính đa dạng cao về kiểu bờ. Phía bắc vịnh là khu vực cửa sông Cu Đê, nơi diễn ra quá trình tương tác phức tạp giữa dòng chảy sông và sóng biển, thường xuyên xuất hiện hiện tượng bồi tụ cục bộ xen kẽ với xói lở theo mùa. Khu vực trung tâm vịnh, bao gồm tuyến bờ biển Nguyễn Tất Thành và khu vực cảng Liên Chiểu, là dạng bờ nhân tạo chiếm ưu thế, với hệ

thống kê cứng, bến cảng và các công trình chỉnh trị bờ quy mô lớn. Phía đông và đông nam vịnh là các bờ đá và bờ cát xen kẽ quanh bán đảo Sơn Trà, nơi địa hình dốc, nền đá gốc lộ thiên và ít chịu tác động trực tiếp của bồi tụ trầm tích.

2.3.2.3. Đặc điểm kinh tế – xã hội và can thiệp nhân sinh

Vịnh Đà Nẵng là khu vực đô thị hóa và công nghiệp hóa nhanh nhất trong không gian ven biển thành phố, tập trung nhiều công trình hạ tầng biển quy mô lớn và có tính chi phối mạnh đến cấu trúc bờ biển. Các công trình tiêu biểu gồm cảng Tiên Sa, khu bến cảng Liên Chiểu đang xây dựng, tuyến đường ven biển – kè biển Nguyễn Tất Thành, các khu công nghiệp Liên Chiểu, Hòa Khánh, cùng các khu đô thị và khu du lịch ven bờ.

Việc xây dựng tuyến đường – kè Nguyễn Tất Thành với kết cấu kè cứng liên tục đã góp phần bảo vệ hạ tầng giao thông ven biển và ổn định bờ ngoài, song đồng thời làm “cố định hóa” đường bờ, làm suy giảm khả năng điều chỉnh tự nhiên của bãi biển và thay đổi chế độ vận chuyển bùn cát dọc bờ. Tại khu vực lân cận Thuận Phước – Đa Phước, quá trình san lấp mặt bằng và mở rộng không gian đô thị đã làm biến đổi mạnh hình thái bờ vịnh, thu hẹp không gian bãi triều và ảnh hưởng đến cân bằng trầm tích trong vịnh.

Ở phía bắc vịnh, khu vực cảng Liên Chiểu đang được xây dựng với quy mô lớn, bao gồm hệ thống đê chắn sóng, bến cảng và khu hậu cần cảng. Các công trình này có khả năng làm thay đổi trường sóng, dòng chảy ven bờ và phân bố bùn cát khu vực lân cận, từ đó làm gia tăng nguy cơ xói lở cục bộ ở các đoạn bờ chưa được bảo vệ đồng bộ. Tương tự, tại khu vực cảng Kỳ Hà (Núi Thành), các hoạt động nạo vét, chỉnh trị luồng tàu và phát triển hạ tầng cảng đã và đang tác động rõ rệt đến chế độ bồi tụ – xói lở khu vực cửa sông – ven biển, tạo ra những biến động hình thái đáng kể theo thời gian.

Bên cạnh đó, khu du lịch sinh thái Nam Ô đang trong quá trình đầu tư xây dựng đã làm gia tăng mức độ can thiệp nhân sinh lên bờ biển phía bắc vịnh. Việc san gạt địa hình, xây dựng công trình ven bờ và thay đổi lớp phủ bề mặt có nguy cơ làm mất ổn định các đụn cát ven biển và gia tăng tính dễ bị tổn thương của đường bờ trước tác động của sóng và bão (Hình 2.8).



Hình 2.8. Lấn biển xây dựng khu đô thị - du lịch Nam Ô tại khu vực cửa sông Cu Đê (ảnh chụp từ UAV - Giang Tuấn Linh, 6/2023)

Nhìn chung, quá trình phát triển hạ tầng giao thông, cảng biển, đô thị và du lịch tại vịnh Đà Nẵng đã tạo ra những biến đổi sâu sắc đối với hình thái và động lực bờ biển. Các can thiệp nhân sinh này không chỉ làm thay đổi vị trí và hình dạng đường bờ theo không gian và thời gian, mà còn làm gia tăng tính phức tạp của quá trình xói lở – bồi tụ, đặt ra yêu cầu cần có các nghiên cứu định lượng chi tiết nhằm nhận diện đúng vai trò của từng yếu tố tác động trong bối cảnh đô thị hóa ven biển nhanh chóng.

2.3.2.4. Thực trạng xói lở – bồi tụ và các điểm nóng tiêu biểu

Thực trạng xói lở – bồi tụ tại vịnh Đà Nẵng thể hiện rõ tính phức tạp và không đồng nhất theo không gian, phản ánh sự tương tác mạnh giữa động lực sóng – dòng chảy, đặc điểm hình thái bờ và các can thiệp nhân sinh kéo dài trong nhiều thập kỷ. Đây là khu vực tiêu biểu cho dạng bờ vịnh đô thị hóa nhanh, nơi biến động đường bờ không chỉ chịu chi phối bởi yếu tố tự nhiên mà còn bị điều chỉnh mạnh bởi các công trình ven biển và hoạt động phát triển hạ tầng.

Khu vực Hòa Hiệp Bắc – Liên Chiểu, đặc biệt là đoạn bờ phía nam kho xăng dầu Liên Chiểu và nhà máy xi măng Hải Vân, là một trong những điểm nóng xói lở nghiêm trọng nhất của vịnh Đà Nẵng (Hình 2.9). Xói lở đã được ghi nhận từ trước năm 2000 và trở nên đặc biệt nghiêm trọng trong các giai đoạn 2006–2009 và 2016–2017, tập trung vào mùa mưa bão và gió mùa Đông Bắc kết hợp triều cường. Nhiều thời điểm, bờ biển bị xâm thực sâu, làm sập nhà dân, cuốn trôi rừng phòng hộ, đe dọa trực tiếp tuyến đường sắt Bắc – Nam. Sau khi hệ thống đê/kè được xây dựng giai đoạn 2010–2017, xu thế bồi tụ xuất hiện trở lại với tốc độ lớn, song điều tra thực địa cho thấy khu vực này vẫn chịu tác động mạnh của sóng trong các đợt bão lớn, phản ánh tính không bền vững dài hạn của giải pháp công trình đơn thuần.



Hình 2.9. Xói lở bờ vịnh Đà Nẵng tại khu vực nhà máy xi măng Quân khu 5 (cũ) năm 1999 (ảnh trái) và tại khu vực nhà máy xi măng Hải Vân năm 2000 (ảnh phải)
(Nguồn: Đặng Văn Bào, 1999-2000)

Tại khu vực cửa sông Cu Đê, xu thế bồi tụ cục bộ thường xuất hiện trong mùa mưa do gia tăng tải lượng bùn cát từ thượng lưu, song đồng thời vẫn ghi nhận xói lở tại các đoạn bờ cát lân cận, đặc biệt ở phía nam cửa sông. Sự thay đổi hướng dòng chảy cửa sông kết hợp với sóng mùa Đông Bắc làm mất ổn định cân bằng bùn cát, khiến đường bờ trong dịch chuyển mạnh theo thời gian. Điều này cho thấy cửa sông Cu Đê không chỉ là vùng bồi tụ đơn thuần mà là một hệ thống động, nhạy cảm với biến động thủy – hải văn.



Hình 2.10. Dấu vết các đường bờ do xói lở năm 2009, 2017 – 2020 tại bắc Nam Ô
(Nguồn Đặng Văn Bào, 2020).

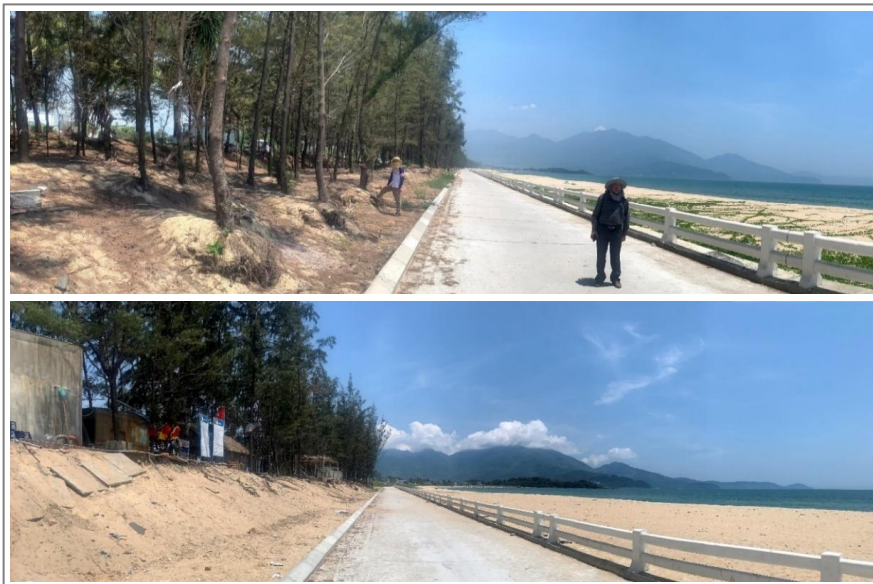
Tại bãi tắm Nam Ô, biến động đường bờ thể hiện rõ qua sự luân phiên giữa bồi tụ và xói lở trên cùng một không gian. Các đụn cát phôi thai hình thành sau giai đoạn bồi tụ đã bị cắt xẻ bởi các vách xói lở trong những năm gần đây, đưa đường bờ trong dịch chuyển trở lại gần vị trí đầu những năm 2000. Hiện nay, xói lở tiếp tục diễn ra và tác động trực tiếp tới khu vực quy hoạch du lịch sinh thái Nam Ô, đặt ra yêu cầu cấp thiết trong việc xác định và thiết lập hành lang bảo vệ bờ biển phù hợp (Hình 2.10).



Hình 2.11. Xói lở bờ tây vịnh Đà Nẵng đang đe dọa tuyến đường ven biển Nguyễn Tất Thành (Nguồn: Đặng Văn Bào)

Dọc tuyến bờ Nguyễn Tất Thành, hệ thống kè biển liên tục đã giúp ổn định hình thái bờ ngoài và bảo vệ hạ tầng giao thông ven biển (Hình 2.11). Tuy nhiên, việc “cố định hóa” đường bờ bằng công trình cứng khiến đường bờ trong không còn phản ánh đầy đủ động lực tự nhiên, làm suy giảm khả năng tự điều chỉnh hình thái bãi và chuyển dịch xói lở sang các đoạn bờ lân cận chưa được bảo vệ đồng bộ.

Ở khu vực bắc bãi tắm Xuân Thiều, các nghiên cứu gần đây cho thấy xu thế xói lở chiếm ưu thế cả ở bờ trong và bờ ngoài, trái với nhận định trước đây về xu thế bồi tụ chung của bờ tây vịnh Đà Nẵng (Hình 2.12). Giai đoạn 2017–2019 ghi nhận xói lở mạnh, tạo vách cát cao, gây hư hại công trình du lịch và đe dọa tuyến đường ven biển, buộc phải triển khai dự án kè biển Xuân Thiều hoàn thành năm 2020.



Hình 2.12. Xói lở bờ biển năm 2019 tác động tới đụn cát cao (ảnh trên), gây hư hại một số công trình dân sinh ven biển bắc bãi tắm Xuân Thiều (Nguồn: Đặng Văn Bào, 2019)

2.3.2.5. Ý nghĩa khoa học và lý do lựa chọn khu vực nghiên cứu

Tổng hợp các kết quả cho thấy, vịnh Đà Nẵng là khu vực có diễn biến xói lở – bồi tụ phức tạp, kéo dài theo thời gian, chịu tác động đồng thời của yếu tố tự nhiên và nhân sinh, với nhiều điểm nóng xói lở đã và đang gây ảnh hưởng trực tiếp đến kinh tế – xã hội và an toàn hạ tầng ven biển. Đây chính là cơ sở khoa học quan trọng để luận án lựa chọn vịnh Đà Nẵng làm khu vực nghiên cứu trọng điểm, đồng thời nhấn mạnh sự cần thiết của cách tiếp cận đánh giá biến động đường bờ dựa trên đường bờ trong kết hợp viễn thám độ phân giải cao và học máy.

Vịnh Đà Nẵng đại diện điển hình cho vùng bờ đô thị hóa cao, nơi đường bờ chịu tác động mạnh của các công trình nhân tạo, lấn biển và chỉnh trị bờ. Khu vực này đặc biệt phù hợp để đánh giá khả năng trích xuất và theo dõi đường bờ trong điều kiện bờ bị che khuất một phần bởi công trình, đồng thời kiểm chứng hiệu quả của các mô hình học máy khi áp dụng cho môi trường ven biển có nhiều cao và hình thái bờ phức tạp.

2.3.3. Khu vực nghiên cứu trọng điểm Cửa Đại (Hội An)

2.3.3.1. Vị trí địa lý và mối liên hệ cửa sông – bờ biển

Khu vực ven biển Cửa Đại nằm ở phía đông thành phố Hội An (địa danh hành chính cũ), gồm các phường Hội An Đông, Hội An Tây (thuộc địa bàn thành phố Hội An cũ) và xã Duy Nghĩa (huyện Duy Xuyên cũ), là nơi tiếp giáp trực tiếp giữa biển Đông và cửa sông Thu Bồn. Đây là khu vực cửa sông điển hình của miền Trung, nơi diễn ra sự tương tác mạnh mẽ giữa hệ thống sông lớn và môi trường biển mở. Phía đông cửa Thu Bồn được quần đảo Cù Lao Chàm che chắn.

Hệ thống sông Vu Gia – Thu Bồn đóng vai trò chi phối quyết định đối với động lực bờ biển Cửa Đại. Với lưu vực rộng, chế độ dòng chảy phân hóa mạnh theo mùa và tải lượng bùn cát lớn, hệ thống này là nguồn cung cấp vật liệu trầm tích chủ yếu cho vùng cửa sông – ven biển Hội An. Sự phân lưu phức tạp của sông Thu Bồn trước khi đổ ra biển tạo nên các nhánh cửa, doi cát và bãi bồi động, khiến hình thái cửa sông và đường bờ biển luôn trong trạng thái biến đổi theo thời gian.

2.3.3.2. Đặc điểm tự nhiên và động lực bờ biển

Vùng ven biển Cửa Đại mang đặc trưng điển hình của kiểu bờ cửa sông – bờ cát thấp, với bãi biển thoải, trầm tích chủ yếu là cát mịn đến trung bình, đụn cát thấp và thảm thực vật ven biển phân bố không liên tục. Phía trong bãi biển là các vùng đất thấp, đầm phá cổ và khu dân cư – đô thị phát triển mạnh.

Động lực bờ biển tại đây chịu tác động tổng hợp của nhiều yếu tố. Sóng biển, đặc biệt là sóng mùa Đông Bắc và sóng trong bão, đóng vai trò chính trong

quá trình xói lở bờ biển phía bắc Cửa Đại. Dòng chảy dọc bờ có xu hướng vận chuyển trầm tích theo hướng bắc – nam hoặc nam – bắc tùy theo chế độ gió mùa, làm mất cân bằng bùn cát cục bộ. Thủy triều thuộc kiểu bán nhật triều không đều, kết hợp với nước dâng do bão và áp thấp nhiệt đới, làm gia tăng khả năng xâm thực bờ trong các giai đoạn thời tiết cực đoan. Đồng thời, lưu lượng dòng chảy sông Thu Bồn trong mùa mưa góp phần mạnh mẽ vào quá trình bồi tụ cửa sông và tái phân bố trầm tích ven biển.

2.3.3.3. Đặc điểm kinh tế – xã hội và các can thiệp công trình

Khu vực ven biển Cửa Đại là một trong những không gian phát triển du lịch trọng điểm của miền Trung, gắn chặt với đô thị di sản Hội An. Dọc dải bờ từ An Bàng đến Cửa Đại, đặc biệt ở phía bắc cửa sông, tập trung dày đặc các khu nghỉ dưỡng, khách sạn và dịch vụ du lịch ven biển quy mô vừa và lớn. Sự phát triển nhanh của các khu du lịch này đã làm gia tăng áp lực lên không gian bãi biển, đụn cát tiền tiêu và hành lang bảo vệ bờ, đồng thời làm thay đổi đáng kể cấu trúc sử dụng đất và hình thái bờ biển tự nhiên.

Ở phía nam cửa sông, khu vực dân cư Duy Nghĩa hình thành các cụm làng ven biển và ven cửa sông với sinh kế chủ yếu dựa vào khai thác thủy sản, nuôi trồng nước lợ và dịch vụ hậu cần nghề cá. Khu vực này đồng thời chịu tác động trực tiếp của cả xói lở bờ biển và bồi tụ cửa sông, gây biến động lớn về đất ở, đất sản xuất và không gian sinh kế của cộng đồng địa phương. Tại vùng cửa sông Thu Bồn, sự phát triển cảnh quan sông – biển và các hoạt động du lịch sinh thái, du lịch trải nghiệm cũng ngày càng gia tăng, làm gia tăng nhu cầu ổn định hình thái bờ và luồng lạch.

Trước tình trạng xói lở nghiêm trọng và kéo dài, nhiều giải pháp công trình đã được triển khai tại khu vực Cửa Đại, bao gồm hệ thống kè cứng bằng bê tông, rọ đá, bao cát địa kỹ thuật, cùng các tuyến đê biển ngầm đặt cách bờ khoảng 100–150 m. Song song với đó, các biện pháp chỉnh trị cửa sông Thu Bồn được áp dụng nhằm ổn định luồng tàu thuyền và hạn chế bồi lấp. Tuy nhiên, các can thiệp này chủ yếu mang tính cục bộ, trong nhiều trường hợp làm thay đổi quy luật vận chuyển trầm tích dọc bờ và dẫn đến sự dịch chuyển xói lở sang các đoạn bờ lân cận, làm gia tăng tính phức tạp trong quản lý và bảo vệ bờ biển khu vực Cửa Đại.

2.3.3.4. Thực trạng xói lở – bồi tụ và các vấn đề nổi bật

Khu vực ven biển Cửa Đại và cửa sông Thu Bồn là một trong những đoạn bờ có diễn biến xói lở – bồi tụ phức tạp và nghiêm trọng nhất ở dải ven biển miền Trung trong nhiều thập kỷ gần đây. Các kết quả tổng hợp từ tư liệu ảnh viễn thám,

điều tra thực địa và tổng hợp tư liệu cho thấy xu thế xói lở bờ biển chiếm ưu thế rõ rệt từ đầu những năm 2000 đến 2025, trong khi bồi tụ chủ yếu tập trung ở khu vực cửa sông và các cồn bãi trong lòng sông.



Hình 2.13. Xói lở bờ biển tại khu vực nhà hàng Sen Hội An (ảnh Đặng Văn Bào, 2022) và khu vực phía nam bãi tắm An Bàng (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 7/2025)

Đọc bờ biển từ An Bàng đến Cửa Đại, xói lở diễn ra liên tục, với cường độ mạnh nhất tại đoạn bờ phía bắc cửa sông Thu Bồn (Hình 2.13 và Hình 2.14). Trong nhiều giai đoạn, đường bờ trong đã dịch chuyển vào đất liền hàng chục mét, làm mất bãi tắm tự nhiên, phá hủy đụn cát tiền tiêu và đe dọa trực tiếp các công trình du lịch ven biển. Xói lở thường gia tăng mạnh trong mùa mưa bão, đặc biệt dưới tác động kết hợp của gió mùa Đông Bắc, sóng lớn và nước dâng do bão. Tuy nhiên, từ sau năm 2017, hiện tượng xói lở không chỉ gắn với các sự kiện bão mạnh mà còn xảy ra phổ biến trong điều kiện không có bão, khi sóng gió mùa Đông Bắc hoạt động kéo dài. Điều này phản ánh rõ sự suy giảm khả năng tự phục hồi của hệ thống bờ biển Cửa Đại.



Hình 2.14. Khu khách sạn trên đường Âu Cơ - Hội An trong bão Damrey (Nguồn: Ngô Văn Liêm, 11/2017)

Các đặc điểm tự nhiên như bờ cát thấp, nền địa chất yếu và sự suy giảm nguồn cung trầm tích từ thượng nguồn hệ thống Vu Gia – Thu Bồn được xác định là những nguyên nhân nền tảng làm gia tăng mức độ xói lở. Bên cạnh đó, sự phát

triển dày đặc của các khu du lịch ven biển cùng với việc xây dựng hệ thống kè chắn sóng cục bộ đã làm thay đổi đáng kể phân bố năng lượng sóng và động lực trầm tích dọc bờ. Thực tế cho thấy, tại nhiều vị trí có kè cứng, bãi biển phía trước hầu như không còn khả năng phát triển, sóng tác động trực tiếp vào chân kè, làm gia tăng nguy cơ xói lở lan truyền sang các đoạn bờ lân cận chưa được bảo vệ. (Hình 2.15).



Hình 2.15. Tường/kè phía ngoài khu du lịch Palm Garden Resort Hoi An làm mất bãi biển, nguy cơ xói lở lan truyền khu vực kế cận (ảnh Đặng Văn Bào, 6/2023)

Bên cạnh đoạn bờ phía bắc cửa sông Thu Bồn, khu vực bờ biển phía nam cửa Đại, thuộc địa bàn xã Duy Hải và Duy Nghĩa (huyện Duy Xuyên cũ), cũng ghi nhận tình trạng xói lở mạnh. Xói lở bờ nam cửa sông Thu Bồn có xu thế dịch chuyển về phía nam, phá vỡ đụn cát cổ và tác động trực tiếp đến khu dân cư ven biển. Khác với khu vực phía bắc Cửa Đại – nơi xói lở gắn chặt với phát triển du lịch và các công trình ven bờ, xói lở tại Duy Hải – Duy Nghĩa ảnh hưởng rõ rệt đến không gian cư trú, hạ tầng dân sinh và sinh kế cộng đồng ngư dân.

Ngược lại với xu thế xói lở kéo dài dọc bờ biển Cửa Đại, khu vực cửa sông Thu Bồn lại ghi nhận quá trình bồi tụ mạnh và mang tính hệ thống trong nhiều năm gần đây. Lượng bùn cát lớn từ lưu vực Vu Gia – Thu Bồn, đặc biệt trong các mùa lũ lớn, được vận chuyển ra cửa sông và tái phân bố dưới tác động tổng hợp của sóng, thủy triều và dòng dọc bờ, đã hình thành các doi cát và cồn bãi quy mô lớn, làm biến đổi rõ rệt hình thái cửa sông theo thời gian. Nổi bật nhất là sự hình thành và phát triển của dải cồn cát ngoài cửa sông, thường được gọi là đảo Khủng Long (hoặc đảo Cá Heo), với diện tích, hình dạng và vị trí không gian biến động mạnh qua các giai đoạn khác nhau (Hình 2.16).



Hình 2.16. Sơ đồ biến động hình thái đảo cát cửa sông Thu Bồn từ năm 2018 đến 2025 trên nền ảnh vệ tinh từ Google Earth ngày 13.3.2025

Kết quả giải đoán ảnh viễn thám đa thời gian cho thấy đảo Khủng Long là một thực thể bồi tụ trẻ, xuất hiện rõ rệt sau năm 2017 và có xu thế mở rộng tổng thể trong giai đoạn 2018–2023, song quá trình phát triển không liên tục mà xen kẽ nhiều pha xói lở, tái phân bố trầm tích và điều chỉnh hình thái. Sự gia tăng diện tích đảo đi kèm với hiện tượng thu hẹp và dịch chuyển luồng chảy chính của cửa sông, gây khó khăn cho giao thông thủy và làm gia tăng nguy cơ bồi lấp cửa sông trong mùa mưa lũ. Đồng thời, quá trình bồi tụ mạnh tại cửa sông đã làm suy giảm lượng bùn cát cấp cho bờ biển phía hạ lưu, góp phần làm trầm trọng thêm tình trạng xói lở bờ biển Cửa Đại.

Sự đối lập rõ nét giữa bồi tụ mạnh tại cửa sông và xói lở nghiêm trọng dọc bờ biển phản ánh trạng thái mất cân bằng trầm tích của toàn bộ hệ thống cửa sông – bờ biển Thu Bồn. Đây là một hệ thống động, nhạy cảm với biến động thủy – hải văn và các can thiệp nhân sinh, có ý nghĩa khoa học quan trọng đối với nghiên cứu biến động đường bờ, đặc biệt là phân tích vai trò của đường bờ trong bối cảnh cửa sông ven biển chịu tác động kéo dài theo thời gian.

2.3.4. Khu vực nghiên cứu 3: Vùng ven biển Núi Thành

2.3.4.1. Vị trí địa lý và phạm vi nghiên cứu

Vùng ven biển Núi Thành nằm ở phía nam thành phố Đà Nẵng, tiếp giáp với thành phố Tam Kỳ ở phía bắc và tỉnh Quảng Ngãi ở phía nam, mở ra biển Đông theo

hướng đông – đông nam. Phạm vi nghiên cứu bao gồm dải ven biển huyện Núi Thành, tập trung vào các khu vực cửa sông và bờ biển có biến động mạnh như cửa Kỳ Hà, Cửa Lở, vùng bờ Tam Thanh – Tam Hải và khu vực lân cận Khu kinh tế mở Chu Lai. Đây là không gian chuyển tiếp quan trọng giữa hệ thống cửa sông – đầm phá ven bờ với vùng biển hở, chịu tác động đồng thời của động lực sóng, sóng và dòng chảy ven bờ.

Về mặt không gian, khu vực này nằm trên trục vận chuyển trầm tích dọc bờ ven biển Trung Trung Bộ, đồng thời là vùng chịu ảnh hưởng trực tiếp của các can thiệp quy mô lớn về hạ tầng cảng biển, công nghiệp và san lấp ven biển trong nhiều thập kỷ gần đây.

2.3.4.2. Đặc điểm tự nhiên và địa mạo bờ biển

Bờ biển Núi Thành có cấu trúc địa mạo đa dạng, đặc trưng bởi sự xen kẽ giữa bờ cát thấp, bờ cửa sông và các khu vực đầm phá ven biển. Dải bờ Tam Thanh – Tam Hải chủ yếu là bờ cát mịn, độ cao thấp, phía trong là hệ thống đầm phá và vùng đất ngập nước, đóng vai trò quan trọng trong điều tiết động lực và tích tụ trầm tích.

Khu vực cửa Kỳ Hà và Cửa Lở là những điểm nhạy cảm về mặt địa mạo, nơi diễn ra sự tương tác phức tạp giữa dòng chảy sông, thủy triều và sóng biển. Hình thái cửa sông và đường bờ tại đây biến đổi mạnh theo mùa, đặc biệt trong mùa mưa lũ và gió mùa Đông Bắc. Với nền địa chất yếu, bờ cát thấp và thiếu các dải cồn cát phòng hộ phát triển liên tục, bờ biển Núi Thành có mức độ nhạy cảm cao trước các biến động động lực sóng – dòng chảy và các tác động nhân sinh.

2.3.4.3. Đặc điểm phát triển kinh tế – xã hội

Vùng ven biển Núi Thành là một trong những không gian phát triển công nghiệp – hạ tầng trọng điểm của miền Trung, gắn liền với Khu kinh tế mở Chu Lai. Các công trình quy mô lớn như cảng Kỳ Hà, hệ thống khu công nghiệp, khu logistics, hạ tầng giao thông ven biển và các dự án san lấp mặt bằng đã làm thay đổi đáng kể hiện trạng sử dụng đất và hình thái bờ biển tự nhiên.

Quá trình mở rộng cảng biển, nạo vét luồng tàu, xây dựng đê chắn sóng và lấn biển đã tác động trực tiếp đến cân bằng bùn cát ven bờ, làm gián đoạn dòng vận chuyển trầm tích tự nhiên. Bên cạnh phát triển công nghiệp, khu vực Tam Thanh – Tam Hải vẫn duy trì các hoạt động nuôi trồng thủy sản, đánh bắt ven bờ và khu dân cư truyền thống, khiến mức độ phơi lộ trước xói lở và bồi tụ ngày càng gia tăng.

2.3.4.4. Thực trạng xói lở – bồi tụ và tác động

Thực tế cho thấy, vùng ven biển Núi Thành đang ghi nhận đồng thời các quá trình xói lở và bồi tụ với cường độ mạnh và phân bố không đồng đều theo không gian. Xói lở bờ biển diễn ra rõ rệt tại các đoạn bờ Tam Thanh và khu vực Cửa Lở, nơi bờ

cát thấp bị sóng biển và dòng chảy ven bờ xâm thực mạnh trong mùa gió Đông Bắc và các đợt mưa bão. Nhiều đoạn bờ ghi nhận sự dịch chuyển đường bờ vào đất liền, phá vỡ đụn cát, ảnh hưởng trực tiếp đến khu dân cư, cơ sở nuôi trồng thủy sản và hạ tầng ven biển.

Ngược lại, tại khu vực cửa Kỳ Hà và một số vùng lân cận cảng biển, bồi tụ trầm tích diễn ra cục bộ do tác động của đê chắn sóng, nạo vét và thay đổi hướng dòng chảy. Sự đối lập giữa xói lở mạnh ở bờ biển mở và bồi tụ tại các khu vực cửa sông – cảng biển phản ánh trạng thái mất cân bằng trầm tích do tác động tổng hợp của động lực tự nhiên và can thiệp nhân sinh.

Với sự hiện diện đồng thời của các dạng bờ nhạy cảm, các can thiệp công trình quy mô lớn và mức độ phơi lộ cao của dân cư ven biển, vùng ven biển Núi Thành là khu vực điển hình để đánh giá tác động của hoạt động phát triển kinh tế – hạ tầng đến biến động đường bờ. Đây là cơ sở khoa học quan trọng để lựa chọn Núi Thành làm khu vực nghiên cứu trọng điểm, phục vụ phân tích biến động đường bờ trong và đánh giá vai trò của yếu tố nhân sinh trong bối cảnh quản lý tổng hợp vùng bờ.

Tiểu kết Chương 2

Kết quả phân tích điều kiện tự nhiên, đặc điểm dân cư, kinh tế – xã hội và sử dụng đất đã làm rõ sự phân hóa các kiểu vùng bờ chủ yếu trong khu vực nghiên cứu từ ven biển thành phố Đà Nẵng đến vùng ven biển Núi Thành. Các kiểu vùng bờ đặc trưng như vùng bờ biển mở cấu tạo bởi cát, vùng bờ cửa sông, vùng bờ vũng vịnh và vùng bờ đá được nhận diện trong mối quan hệ với động lực biển – sông và mức độ tác động của con người.

Trên cơ sở đó, luận án đã lựa chọn các khu vực nghiên cứu trọng điểm đại diện cho các kiểu vùng bờ và các dạng biến động đường bờ khác nhau, làm cơ sở đánh giá và so sánh hiệu quả của các phương pháp nhận dạng, theo dõi biến động đường bờ. Việc lựa chọn các khu vực này không chỉ dựa trên mức độ xói lở – bồi tụ mà còn gắn với đặc điểm địa mạo, động lực và sử dụng đất ven biển.

Kết quả của chương là cơ sở thực tiễn quan trọng cho việc xây dựng bộ chỉ thị, lựa chọn dữ liệu và thiết kế quy trình nghiên cứu ứng dụng viễn thám, GIS và học máy trong phân tích biến động đường bờ ở các chương tiếp theo.

CHƯƠNG 3: DỮ LIỆU VÀ QUY TRÌNH ỨNG DỤNG VIỄN THÁM – HỌC MÁY TRONG NGHIÊN CỨU BIẾN ĐỘNG ĐƯỜNG BỜ BIỂN THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG

3.1. Cơ sở dữ liệu phục vụ nghiên cứu biến động đường bờ

3.1.1. Dữ liệu ảnh viễn thám đa thời gian, đa độ phân giải

Dữ liệu ảnh viễn thám là nguồn tư liệu chủ đạo được sử dụng trong nghiên cứu nhằm trích xuất và phân tích biến động đường bờ theo không gian và thời gian. Để đáp ứng yêu cầu theo dõi biến động đường bờ trong ở cả quy mô dài hạn và chi tiết cục bộ, nghiên cứu sử dụng hệ thống dữ liệu ảnh viễn thám đa thời gian, đa độ phân giải, bao gồm ảnh vệ tinh quang học độ phân giải trung bình, ảnh vệ tinh độ phân giải cao và ảnh chụp từ máy bay không người lái (UAV) (Bảng 3.1).

Ảnh vệ tinh quang học độ phân giải trung bình được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm chuỗi ảnh Landsat và Sentinel-2. Cụ thể, ảnh Landsat (Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ và Landsat 8 OLI) được khai thác cho giai đoạn từ khoảng năm 2000 đến năm 2015, nhằm phân tích xu thế biến động đường bờ trong dài hạn trên toàn bộ khu vực nghiên cứu. Đối với giai đoạn từ năm 2015 đến nay, ảnh Sentinel-2 (MSI) được sử dụng để thay thế và bổ sung cho ảnh Landsat, nhờ có độ phân giải không gian cao hơn và chu kỳ lặp ngắn hơn, cho phép theo dõi chi tiết hơn sự thay đổi hình thái bờ biển trong những năm gần đây. Nhóm dữ liệu này bảo đảm tính liên tục theo thời gian và khả năng bao phủ không gian đồng bộ cho toàn bộ dải ven biển nghiên cứu.

Bên cạnh đó, ảnh vệ tinh độ phân giải cao được thu thập từ nguồn GE, bao gồm các ảnh có độ phân giải mét và dưới mét, chủ yếu từ các cảm biến như WorldView. Nhóm dữ liệu này được sử dụng tập trung cho giai đoạn từ năm 2002 đến nay, nhằm nhận dạng chi tiết hình thái bờ biển và trích xuất đường bờ trong tại các khu vực nghiên cứu trọng điểm. So với ảnh độ phân giải trung bình, ảnh độ phân giải cao cho phép nhận diện rõ hơn các dấu hiệu hình thái và bề mặt liên quan đến ranh giới tác động sóng, đặc biệt tại các đoạn bờ cát hẹp, bờ có công trình chỉnh trị hoặc bờ chịu tác động mạnh của hoạt động nhân sinh.

Ngoài ra, dữ liệu ảnh UAV được thu thập trong các đợt khảo sát thực địa tại một số khu vực nghiên cứu trọng điểm. Ảnh UAV có độ phân giải rất cao, được sử dụng như nguồn dữ liệu tham chiếu để kiểm chứng kết quả trích xuất đường bờ từ ảnh vệ tinh, đồng thời hỗ trợ xây dựng và hiệu chỉnh bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong. Việc tích hợp ảnh UAV góp phần nâng cao độ tin cậy của kết quả phân

tích, đặc biệt trong các khu vực có biến động hình thái phức tạp và chịu tác động mạnh của các sự kiện cực đoan.

Bảng 3.1. Tổng hợp dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu biến động đường bờ biển thành phố Đà Nẵng

Loại dữ liệu	Độ phân giải không gian	Thời gian sử dụng	Mục đích sử dụng
Landsat (TM, ETM+, OLI)	30 m	2000 – 2022	Phân tích biến động đường bờ ngoài ở quy mô dài hạn; đánh giá xu thế xói lở – bồi tụ tổng thể khu vực nghiên cứu
Sentinel-2 (MSI)	10 m	2015 – 2023	Bổ sung chuỗi ảnh độ phân giải cao trung bình; xác định đường bờ ngoài và so sánh chi tiết theo mùa, theo giai đoạn, phân tích phổ phản xạ của các đối tượng.
Ảnh từ GE	~0,3 – 1 m	2002 – 2023	Nhận dạng chi tiết đường bờ trong; phân tích hình thái bờ; đối chiếu biến động cục bộ tại các khu vực trọng điểm
Ảnh UAV ven biển	~5 – 10 cm	2022 – 2025	Dữ liệu chuẩn (ground truth) để kiểm chứng kết quả trích xuất đường bờ trong; huấn luyện và đánh giá mô hình học máy
Bản đồ địa hình, địa mạo, sử dụng đất	1:10.000 – 1:50.000	Các năm gần nhất	Cung cấp dữ liệu nền GIS; phân tích mối liên hệ giữa biến động đường bờ và điều kiện địa lý – nhân sinh
Dữ liệu khảo sát thực địa	Điểm, tuyến đo	2022 – 2025	Kiểm chứng hình thái bờ, trạng thái xói lở – bồi tụ; bổ sung thông tin phục vụ xây dựng bộ chỉ thị
Dữ liệu hành chính, KT-XH	—	Đến 2025	Phân tích bối cảnh sử dụng đất, công trình ven biển; hỗ trợ luận giải tác động nhân sinh tới biến động đường bờ

Ghi chú:

- Dữ liệu Landsat và Sentinel-2 được sử dụng chủ yếu cho phân tích đường bờ ngoài và xu thế dài hạn.

- Dữ liệu GE và UAV tập trung cho nhận dạng đường bờ trong và kiểm chứng chi tiết.

- Việc kết hợp đa nguồn, đa độ phân giải nhằm khắc phục hạn chế của từng loại dữ liệu đơn lẻ và bảo đảm độ tin cậy cho phân tích biến động.

Việc kết hợp các nguồn ảnh viễn thám đa thời gian và đa độ phân giải cho phép nghiên cứu vừa đánh giá được xu thế biến động đường bờ trong dài hạn (giai đoạn 2000–nay), vừa phân tích chi tiết các biến động cục bộ tại các khu vực trọng điểm trong những năm gần đây. Đây là cơ sở dữ liệu quan trọng cho các bước xử lý, chuẩn hóa, xây dựng bộ chỉ thị và ứng dụng các phương pháp viễn thám – học máy được trình bày trong các mục tiếp theo của Chương 3.

3.1.2. Dữ liệu nền GIS và dữ liệu thực địa

Bên cạnh dữ liệu ảnh viễn thám, nghiên cứu sử dụng hệ thống dữ liệu nền GIS và dữ liệu thực địa nhằm phục vụ việc tổ chức không gian nghiên cứu, hỗ trợ phân tích biến động đường bờ và kiểm chứng kết quả trích xuất từ ảnh viễn thám. Nhóm dữ liệu này đóng vai trò nền tảng trong việc liên kết các thông tin không gian, bảo đảm tính nhất quán và độ tin cậy của các phân tích tiếp theo.

Dữ liệu nền GIS bao gồm các lớp bản đồ cơ bản và chuyên đề được thu thập từ các nguồn chính thức và đáng tin cậy. Các lớp dữ liệu chủ yếu gồm bản đồ địa hình, bản đồ địa mạo, đường bờ lịch sử, ranh giới hành chính các cấp, mạng lưới sông suối, đường giao thông ven biển và các lớp sử dụng đất, dân cư ven bờ. Các dữ liệu này được sử dụng để xác định phạm vi nghiên cứu, phân đoạn và phân kiểu bờ, đồng thời làm lớp nền cho việc tích hợp và phân tích dữ liệu viễn thám trong môi trường GIS. Đối với các lớp dữ liệu được xây dựng từ nhiều nguồn khác nhau, việc lựa chọn và sử dụng được thực hiện theo nguyên tắc ưu tiên các dữ liệu có độ tin cậy cao, phạm vi bao phủ phù hợp và thời gian cập nhật tương thích với chuỗi ảnh viễn thám.

Dữ liệu thực địa được thu thập thông qua các đợt khảo sát thực địa tại các khu vực nghiên cứu trọng điểm dọc ven biển thành phố Đà Nẵng. Nội dung khảo sát tập trung vào việc ghi nhận đặc điểm hình thái bờ biển, dấu hiệu xói lở – bồi tụ, trạng thái bề mặt bãi biển, ranh giới thảm thực vật ven bờ và sự hiện diện của các công trình chỉnh trị bờ. Các thông tin thực địa được sử dụng để đối chiếu, kiểm chứng và hiệu chỉnh kết quả trích xuất đường bờ từ ảnh viễn thám, đặc biệt trong các khu vực có biến động hình thái phức tạp.

Ngoài ra, dữ liệu ảnh UAV thu thập trong quá trình khảo sát thực địa được tích hợp như một thành phần quan trọng của dữ liệu thực địa, đóng vai trò là nguồn

tư liệu tham chiếu có độ phân giải rất cao. Nhóm dữ liệu này được sử dụng để đánh giá độ chính xác của kết quả trích xuất đường bờ, đồng thời hỗ trợ xây dựng và hoàn thiện bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong.

Việc kết hợp dữ liệu nền GIS với dữ liệu thực địa cho phép nghiên cứu xây dựng một cơ sở dữ liệu không gian thống nhất, làm nền tảng cho các bước xử lý, chuẩn hóa và tích hợp dữ liệu được trình bày trong mục tiếp theo, cũng như cho việc ứng dụng các phương pháp viễn thám và học máy trong phân tích biến động đường bờ.

3.1.3. Xử lý, chuẩn hóa và tích hợp dữ liệu

Trên cơ sở các nhóm dữ liệu ảnh viễn thám, dữ liệu nền GIS và dữ liệu thực địa đã được thu thập, nghiên cứu tiến hành xử lý, chuẩn hóa và tích hợp dữ liệu nhằm xây dựng một cơ sở dữ liệu thống nhất, đồng bộ về không gian và thời gian, phục vụ trực tiếp cho phân tích biến động đường bờ.

Quá trình xử lý và chuẩn hóa dữ liệu được thực hiện theo nguyên tắc đảm bảo tính nhất quán về hệ quy chiếu, độ phân giải không gian và cấu trúc dữ liệu. Các dữ liệu không gian được đưa về cùng hệ tọa độ và hệ quy chiếu thống nhất, phù hợp với phạm vi nghiên cứu ven biển thành phố Đà Nẵng. Đối với dữ liệu ảnh viễn thám đa nguồn và đa thời gian, việc chuẩn hóa được thực hiện nhằm giảm thiểu sự khác biệt do cảm biến, thời điểm thu nhận và điều kiện môi trường, bảo đảm khả năng so sánh và phân tích biến động theo chuỗi thời gian.

Song song với chuẩn hóa không gian, dữ liệu được tổ chức và quản lý theo cấu trúc lớp thông tin trong môi trường GIS. Các lớp dữ liệu nền như địa hình, địa mạo, sử dụng đất, mạng lưới sông suối và ranh giới hành chính được tích hợp với dữ liệu ảnh viễn thám và dữ liệu thực địa để hình thành một hệ thống dữ liệu đa lớp, cho phép phân tích mối quan hệ không gian giữa đường bờ và các yếu tố tự nhiên, nhân sinh liên quan. Việc tích hợp này tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình phân đoạn bờ biển, phân kiểu vùng bờ và lựa chọn các khu vực nghiên cứu trọng điểm.

Dữ liệu thực địa và ảnh UAV được sử dụng như nguồn thông tin tham chiếu nhằm kiểm tra tính hợp lý và độ tin cậy của các lớp dữ liệu trích xuất từ ảnh viễn thám. Thông qua đối chiếu không gian giữa dữ liệu thực địa và kết quả xử lý ảnh, nghiên cứu từng bước hiệu chỉnh và hoàn thiện cơ sở dữ liệu, đặc biệt tại các khu vực có hình thái bờ phức tạp hoặc chịu tác động mạnh của các hoạt động nhân sinh.

Kết quả của quá trình xử lý, chuẩn hóa và tích hợp dữ liệu là một cơ sở dữ liệu không gian thống nhất, đa nguồn và đa thời gian, làm nền tảng cho việc xây

dựng bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ, cũng như cho việc triển khai các phương pháp viễn thám và học máy trong phân tích biến động đường bờ được trình bày ở các mục tiếp theo của Chương 3.

3.2. Quy trình đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng

Đánh giá biến động bờ biển đòi hỏi một quy trình nghiên cứu chặt chẽ, có khả năng tích hợp hiệu quả dữ liệu viễn thám đa thời gian, công cụ GIS và các phương pháp phân tích hiện đại. Trong nghiên cứu này, quy trình đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng được xây dựng theo hướng tiếp cận hệ thống, bảo đảm tính nhất quán từ khâu xử lý dữ liệu đầu vào đến phân tích và theo dõi biến động đường bờ theo thời gian. Quy trình tập trung làm rõ các bước trích xuất đường bờ, ứng dụng học máy trong nhận dạng đường bờ và phân tích định lượng biến động bằng các công cụ GIS chuyên dụng, làm cơ sở cho việc đánh giá xu thế xói lở – bồi tụ và phục vụ các phân tích tiếp theo.

3.2.1. Quy trình tổng thể đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng

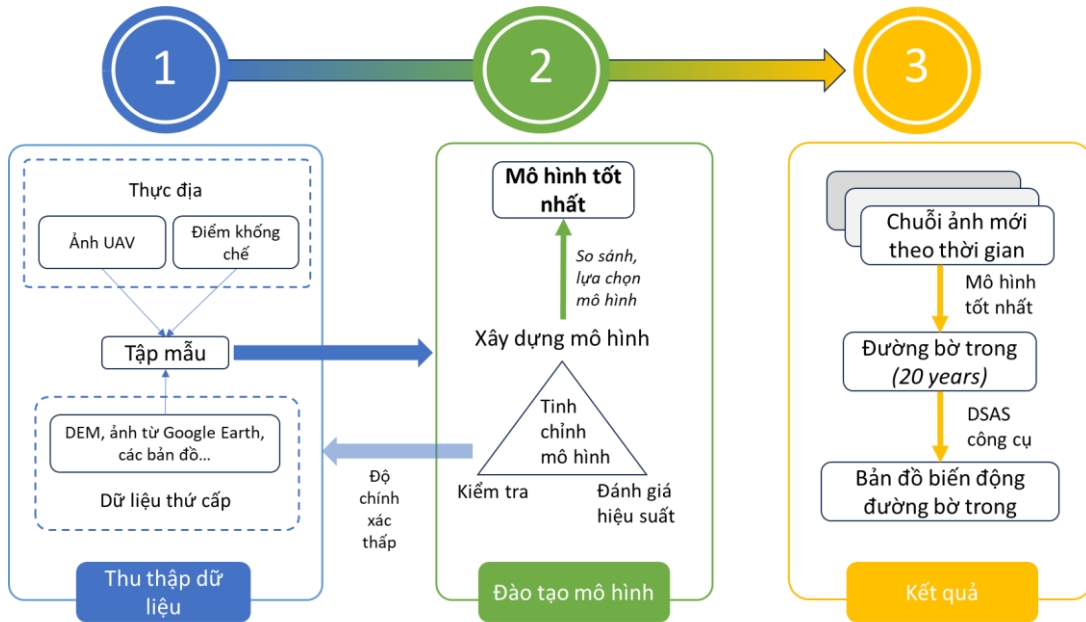
Quy trình nghiên cứu đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng được xây dựng theo hướng tiếp cận hệ thống và được chia thành ba giai đoạn chính, có mối liên kết chặt chẽ và kế tiếp nhau (Hình 3.1). Cách tiếp cận này nhằm bảo đảm tính nhất quán từ khâu chuẩn bị dữ liệu, xây dựng mô hình đến phân tích và thành lập bản đồ biến động đường bờ.

Giai đoạn thứ nhất là thu thập và chuẩn bị dữ liệu. Ở giai đoạn này, nghiên cứu sử dụng đồng thời dữ liệu thực địa và dữ liệu thứ cấp. Dữ liệu thực địa bao gồm ảnh chụp từ máy bay không người lái (UAV) và các điểm khống chế mặt đất (Ground Control Points – GCPs), phục vụ cho việc hiệu chỉnh hình học và kiểm chứng kết quả. Dữ liệu thứ cấp bao gồm mô hình số độ cao (DEM), ảnh viễn thám độ phân giải cao từ GE, các bản đồ địa hình, địa chất, thủy triều và các tài liệu liên quan khác. Trên cơ sở các nguồn dữ liệu này, quá trình lấy mẫu và xây dựng tập mẫu được thực hiện nhằm chuẩn bị dữ liệu đầu vào cho giai đoạn đào tạo mô hình.

Giai đoạn thứ hai là đào tạo và tinh chỉnh mô hình. Các tập dữ liệu mẫu được sử dụng để huấn luyện mô hình nhận dạng đường bờ, trong đó quá trình điều chỉnh và tối ưu hóa mô hình được thực hiện theo hướng lặp nhằm nâng cao độ chính xác và độ ổn định của kết quả. Việc đào tạo và tinh chỉnh mô hình được triển khai trong môi trường GIS và ngôn ngữ lập trình Python, cho phép linh hoạt trong xử lý dữ liệu và đánh giá hiệu suất mô hình trước khi áp dụng cho dữ liệu thực tế.

Giai đoạn thứ ba là ứng dụng mô hình và phân tích kết quả. Trong giai đoạn này, các ảnh UAV và ảnh viễn thám độ phân giải cao từ GE theo chuỗi thời gian được đưa vào mô hình đã được lựa chọn để giải đoán và trích xuất đường bờ trong.

Kết quả giải đoán được chuyển đổi sang dạng đường và kết hợp với bộ chỉ thị nhận dạng để xác định chính xác vị trí đường bờ trong tại các thời điểm khác nhau. Trên cơ sở các đường bờ theo chuỗi thời gian, công cụ DSAS trong môi trường ArcGIS được sử dụng để thành lập các bản đồ biến động đường bờ và phân tích định lượng xu thế xói lở – bồi tụ.

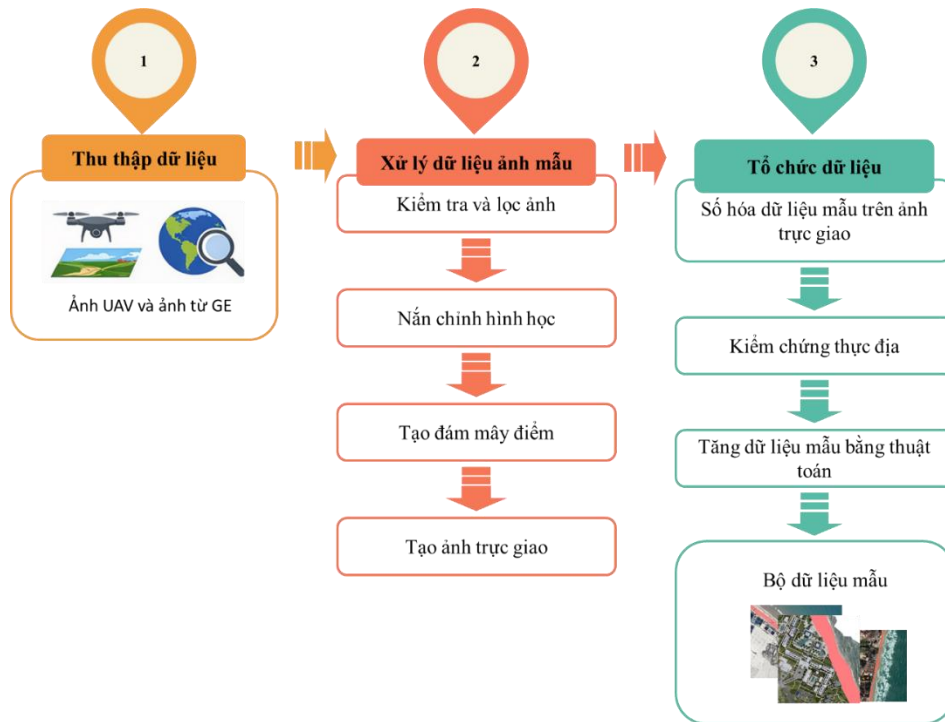


Hình 3.1. Quy trình tổng thể đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng dựa trên dữ liệu viễn thám, GIS và học máy

Quy trình này không chỉ phục vụ cho nghiên cứu biến động bờ biển tại khu vực thành phố Đà Nẵng, mà còn có khả năng mở rộng và áp dụng cho các nghiên cứu phân loại bờ biển và giám sát biến động đường bờ theo thời gian thực trong tương lai.

3.2.2. Quy trình thu thập, xử lý và tổ chức dữ liệu viễn thám phục vụ nhận dạng đường bờ

Trong nghiên cứu biến động đường bờ, đặc biệt là đường bờ trong, việc xây dựng một quy trình thu thập, xử lý dữ liệu mẫu và tổ chức dữ liệu viễn thám thống nhất có ý nghĩa quyết định đối với chất lượng đầu vào của các mô hình học máy và độ tin cậy của kết quả phân tích. Quy trình này được thiết kế theo hướng tích hợp đa nguồn (ảnh UAV – RGB, ảnh GE), đa thời gian và có khả năng kiểm chứng thực địa, bảo đảm tính nhất quán về hình học, tính đại diện của dữ liệu mẫu và khả năng sử dụng trực tiếp cho các bước nhận dạng đường bờ và phân tích biến động tiếp theo. Toàn bộ quy trình được khái quát hóa theo ba hợp phần chính, minh họa tại Hình 3.2.



Hình 3.2. Quy trình thu thập, xử lý và tổ chức dữ liệu viễn thám phục vụ nhận dạng đường bờ

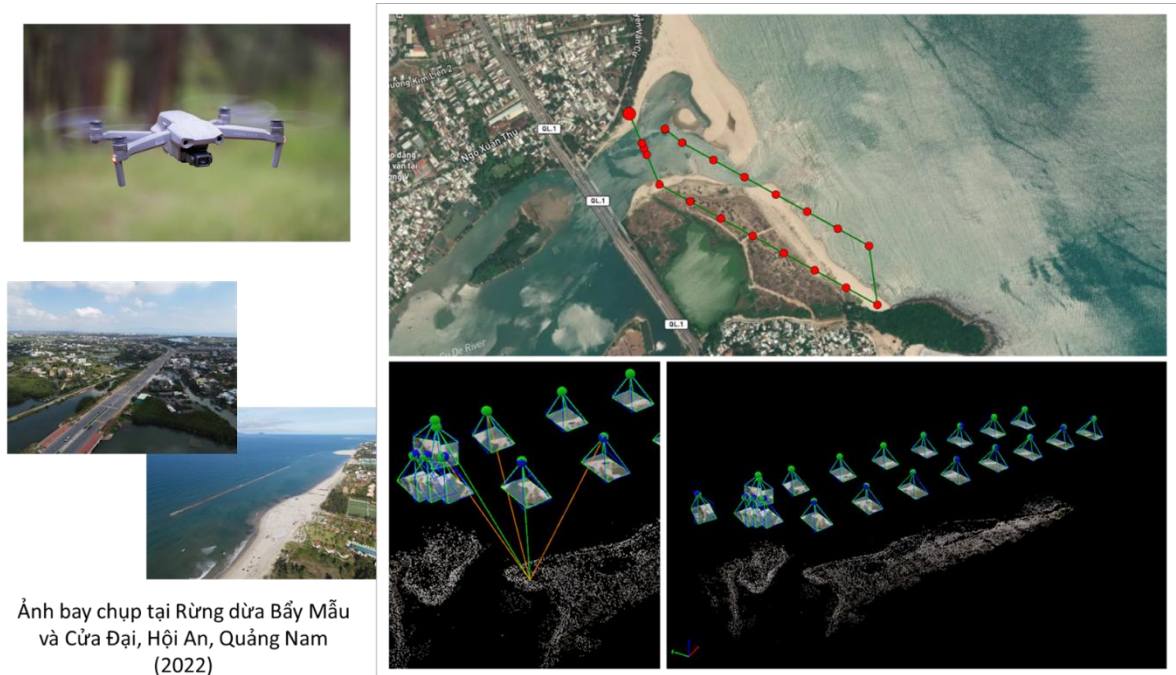
a) Dữ liệu UAV RGB độ phân giải cao

Trong nghiên cứu này, dữ liệu ảnh từ thiết bị bay không người lái (UAV) được sử dụng như nguồn thông tin chủ đạo nhằm phản ánh chính xác hiện trạng đường bờ trong. Ưu thế của dữ liệu UAV thể hiện ở độ phân giải không gian rất cao, khả năng chủ động lựa chọn thời điểm thu nhận và độ chính xác hình học, cho phép nhận diện rõ ranh giới giữa bề mặt cát, thảm thực vật ven biển và các yếu tố nhân sinh. Dữ liệu UAV đóng vai trò là nguồn dữ liệu tham chiếu và hiệu chỉnh ảnh GE, và để kiểm chứng kết quả giải đoán từ ảnh vệ tinh.



Hình 3.3. Một ví dụ về hình ảnh UAV được thu thập tại bờ biển Núi Thành, Đà Nẵng vào tháng 6 năm 2023 (Nguồn: Giang Tuấn Linh).

Nghiên cứu đã tiến hành thu thập ảnh UAV tại nhiều đoạn bờ biển ven Trung Bộ, trong đó tập trung chủ yếu tại khu vực Thành phố Đà Nẵng, vào các đợt khảo sát tháng 4/2022, tháng 6/2023 và tháng 7/2025. Ảnh được thu nhận ở độ cao bay khoảng 150m - 500 m, với độ chồng phủ ảnh theo phương dọc đạt khoảng 80% và theo phương ngang khoảng 70%, sử dụng thiết bị DJI Mini 3 (Hình 3.3 và 3.4). Các tham số bay và chồng phủ được lựa chọn nhằm bảo đảm chất lượng xử lý ảnh và độ chính xác hình học của sản phẩm đầu ra.



Hình 3.4. *Quá trình lập dải bay và thu thập ảnh UAV bằng thiết bị DJI Mini 3 tại khu vực nghiên cứu*

Dữ liệu UAV được xử lý theo một quy trình có cấu trúc trong phần mềm Agisoft Metashape, bao gồm các bước chính: kiểm tra và loại bỏ ảnh không đạt chất lượng; gán tọa độ địa lý cho ảnh từ thông tin GPS; nắn chỉnh ảnh; tạo đám mây điểm dày đặc; và thành lập ảnh trực giao (orthomosaic). Sản phẩm ảnh trực giao thu được có độ phân giải thống nhất ở mức 0,7 m, phù hợp với các nguồn dữ liệu viễn thám độ phân giải cao khác được sử dụng trong nghiên cứu.

Sau khi hoàn thiện ảnh trực giao, ranh giới đường bờ trong được số hóa trên nền ảnh UAV. Công tác kiểm chứng thực địa được thực hiện song song nhằm: (i) xác minh vị trí thực tế của đường bờ trong và ranh giới tác động sóng; (ii) đối chiếu kết quả số hóa từ ảnh UAV với quan sát thực địa; và (iii) ghi nhận các biểu hiện xói lở, bồi tụ ven biển gần thời điểm thu nhận ảnh. Các kết quả này không chỉ phục vụ xây dựng tập dữ liệu huấn luyện cho mô hình học máy mà còn đóng vai trò

quan trọng trong đánh giá độ tin cậy của kết quả nhận dạng đường bờ trong ở các bước phân tích tiếp theo.

b) Dữ liệu ảnh độ phân giải cao từ Google Earth

Để mở rộng chuỗi thời gian nghiên cứu và tăng cường dữ liệu phục vụ huấn luyện mô hình học máy, nghiên cứu đã bổ sung các ảnh độ phân giải cao từ Google Earth thông qua phần mềm Google Earth Pro (GEP). Đây là nguồn dữ liệu quan trọng cho phép tiếp cận chuỗi ảnh dài hạn, phản ánh diễn biến hình thái bờ biển trong khoảng thời gian trước khi có dữ liệu UAV.

Trong giai đoạn 2002–2010, các ảnh GEP chủ yếu được tổng hợp từ các vệ tinh QuickBird và IKONOS, với độ phân giải không gian từ 1 đến 2,5 m. Từ năm 2011 đến 2024, ảnh GEP có độ phân giải cao hơn, dao động trong khoảng 0,7–1 m, chủ yếu được tổng hợp từ các vệ tinh thương mại như GeoEye-1, WorldView-2 và WorldView-3. Mặc dù không cung cấp đầy đủ siêu dữ liệu gốc, các ảnh này vẫn bảo đảm giá trị về thông tin không gian, hình thái địa hình và bối cảnh khu vực, phù hợp cho các bài toán nhận dạng vị trí đường bờ bằng mô hình học máy.

Do ảnh GEP có sự khác biệt nhất định về độ sáng, độ tương phản và điều kiện chiếu sáng giữa các năm, nghiên cứu chú trọng thu thập ảnh tại nhiều thời điểm khác nhau nhằm tăng tính đa dạng của tập dữ liệu huấn luyện. Ảnh được lưu dưới định dạng *.JPG, chia thành các khung ảnh nhỏ có kích thước 4800×2800 pixel, với tỷ lệ hiển thị 1:500. Trong quá trình lưu ảnh, toàn bộ các thông tin nền mặc định của phần mềm GEP được loại bỏ, ảnh đầu ra được thu thập ở chế độ màu RGB nhằm bảo đảm tính đồng nhất với dữ liệu UAV.

Việc lấy mẫu ảnh được thực hiện dọc theo tuyến bờ biển miền Trung với tổng chiều dài hơn 400 km, bao phủ giai đoạn từ năm 2000 đến 2024 (Hình 3.5). Phạm vi lấy mẫu tập trung vào các khu vực trọng điểm, với bề rộng khoảng 2 km tính từ bờ biển vào đất liền và 2 km ra phía biển khơi. Mục tiêu của cách tiếp cận này là đảm bảo tính đa dạng về điều kiện địa hình, hình thái và môi trường ven biển, từ đó nâng cao khả năng học và tổng quát hóa của mô hình trong nhận diện đường bờ trong. Trong Hình 3.5, có thể thấy khu vực miền Trung (đặc biệt vùng Đà Nẵng) có mật độ điểm mẫu cao hơn do điều kiện dữ liệu thuận lợi và được ưu tiên phục vụ xây dựng tập huấn luyện. Sau khi thu thập, ảnh được hiệu chỉnh hình học bằng (i) điểm đo GPS trong các đợt khảo sát thực địa; (ii) điểm khống chế từ ảnh UAV đã được xử lý và hiệu chỉnh; (iii) một số đối tượng ổn định lâu dài trích xuất từ dữ liệu nền GIS/bản đồ địa hình. Trong đó các đặc điểm cố định như đường giao thông hoặc công trình xây dựng được sử dụng làm điểm tham chiếu nhằm hạn chế sai lệch không gian do quá trình ghép ảnh đa nguồn và chuyển hệ tọa độ. Các

ảnh sau hiệu chỉnh được sử dụng để số hóa đường bờ và bổ sung cho tập dữ liệu huấn luyện, đóng vai trò quan trọng trong phân tích biến động đường bờ theo chuỗi thời gian dài hạn.

c) Tổ chức dữ liệu mẫu phục vụ học máy và học sâu

Trong các bài toán học máy và học sâu, đặc biệt là phân đoạn ảnh viễn thám, dữ liệu huấn luyện không nhất thiết phải đồng nhất tuyệt đối về thời gian thu nhận hoặc đặc trưng quang phổ. Ngược lại, việc sử dụng tập dữ liệu lớn và đa dạng về điều kiện thu nhận cho phép mô hình học được các đặc trưng ổn định của đối tượng nghiên cứu, từ đó nâng cao khả năng tổng quát hóa khi áp dụng cho các khu vực và thời điểm khác nhau. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tiếp cận tổ chức dữ liệu theo hướng tích hợp đa nguồn, đa thời gian (Phụ lục 5), coi sự không đồng nhất có kiểm soát là một lợi thế phương pháp luận thay vì là nguồn gây sai lệch.

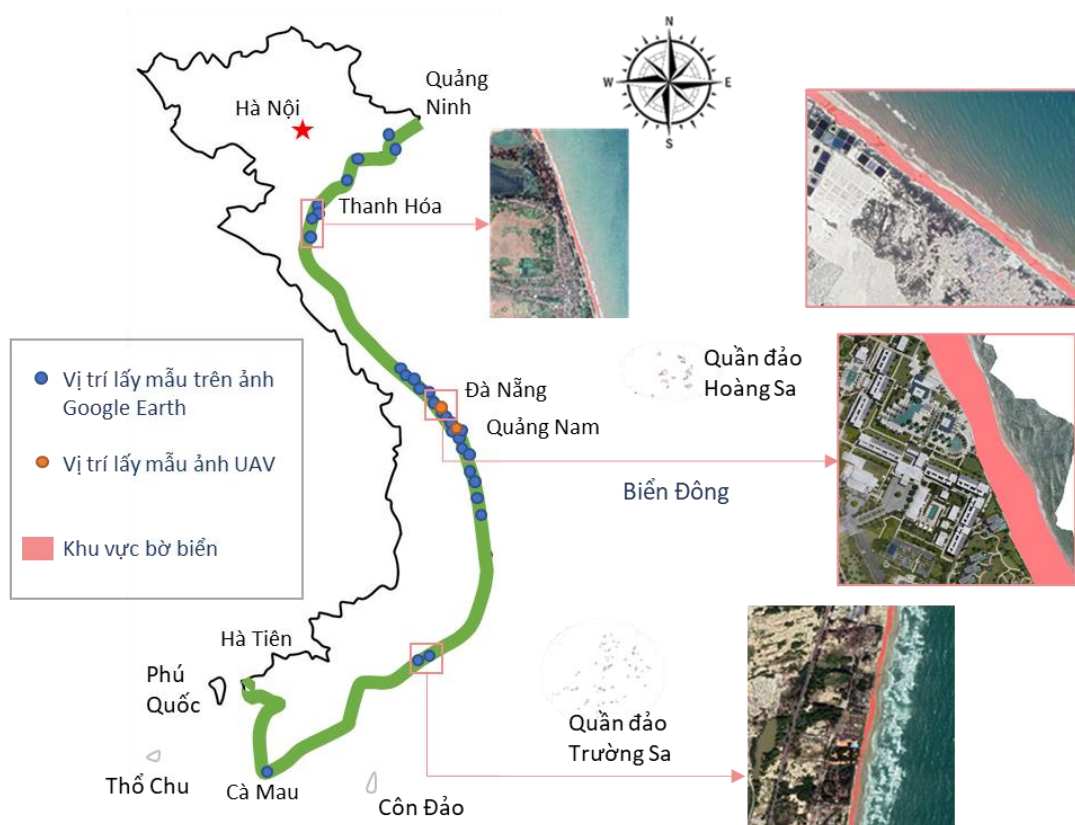
Toàn bộ ảnh viễn thám thu thập từ UAV - RGB và GE sau các bước tiền xử lý được chuẩn hóa về cùng độ phân giải không gian 0,7 m, thống nhất định dạng dữ liệu và tiêu chí gán nhãn trước khi đưa vào mô hình học máy. Các khác biệt về thời điểm thu nhận, điều kiện chiếu sáng và đặc trưng quang phổ được xem là nguồn biến thiên có kiểm soát, góp phần làm giàu không gian đặc trưng của tập huấn luyện và tăng tính thích nghi của mô hình đối với các điều kiện bờ biển khác nhau.

Tập dữ liệu huấn luyện được xây dựng gồm 8.041 ảnh mẫu (patch), bảo đảm tính đại diện cao về không gian và hình thái bờ biển trong khu vực nghiên cứu và vùng bờ Trung Bộ có cùng tính chất. Việc lựa chọn mẫu đặt trọng tâm vào tính đa dạng của các kiểu bờ, bao gồm bờ cát, bờ đá, bờ có thảm thực vật ven biển và bờ chịu tác động mạnh của các hoạt động nhân sinh như kè và công trình ven bờ. Ngoài ra, tập dữ liệu được xây dựng theo hướng tận dụng tối đa các ảnh có chất lượng tốt (không mây che, độ rõ nét cao) từ nhiều thời điểm khác nhau, thay vì kiểm soát chặt chẽ theo mùa hoặc điều kiện thu nhận. Cách tiếp cận này phù hợp với đối tượng là đường bờ trong, vốn ít chịu ảnh hưởng trực tiếp của thủy triều so với đường bờ ngoài, nên không yêu cầu đồng nhất trạng thái triều tại thời điểm thu nhận ảnh. Các mẫu được phân bố tại nhiều vị trí dọc theo đường bờ, tránh tập trung quá mức vào một khu vực đơn lẻ nhằm hạn chế thiên lệch không gian trong quá trình huấn luyện mô hình.

Bên cạnh đó, tính đa dạng về điều kiện bề mặt và trạng thái môi trường cũng được đảm bảo thông qua việc lựa chọn mẫu tại các khu vực có sự khác biệt về độ ẩm bề mặt, mức độ xói lở – bồi tụ và mức độ che phủ của thảm thực vật. Cách tiếp

cận này giúp mô hình học được các dấu hiệu hình thái đặc trưng của đường bờ trong dưới những điều kiện động lực và môi trường khác nhau.

Để khắc phục hạn chế về số lượng mẫu tại các khu vực địa hình phức tạp và nâng cao khả năng khái quát hóa, nghiên cứu áp dụng các kỹ thuật tăng cường dữ liệu nhằm mở rộng tính đa dạng của tập huấn luyện mà không cần bổ sung dữ liệu thực địa. Các phép biến đổi hình học (xoay, lật ảnh) và biến đổi quang học (điều chỉnh độ sáng, độ tương phản, thêm nhiễu) được sử dụng để mô phỏng sự khác biệt về hướng chụp và điều kiện chiếu sáng, qua đó giảm hiện tượng quá khớp và cải thiện các chỉ số đánh giá mô hình như IoU.



Hình 3.5. Phân bố các địa điểm lấy mẫu ảnh vệ tinh độ phân giải cao và ảnh UAV

Trong quá trình xây dựng dữ liệu mẫu, ranh giới đường bờ được số hóa dữ liệu mẫu trên ảnh UAV và ảnh Google Earth, kết hợp với kiểm chứng thực địa nhằm bảo đảm tính chính xác hình thái. Các khu vực ngoài phạm vi bờ biển được gán giá trị “0”, trong khi không gian nằm giữa đường bờ trong và đường bờ ngoài (vùng bờ – bãi) được gán giá trị “1”. Tập dữ liệu hoàn chỉnh này được sử dụng làm đầu vào cho các mô hình học máy và học sâu để phân tách rõ ràng không gian bờ – bãi với các lớp phủ xung quanh như khu dân cư, rừng phòng hộ, đụn cát tiền tiêu và mặt nước biển.

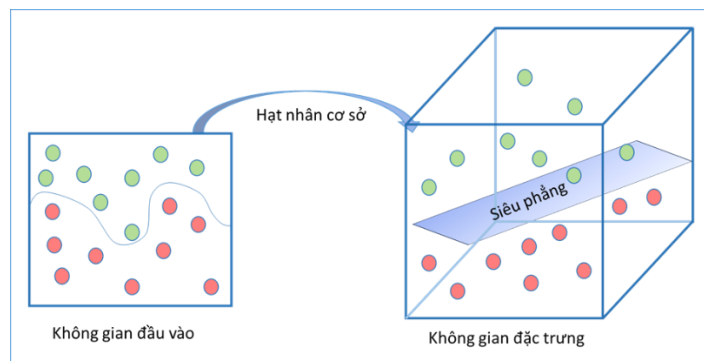
Sản phẩm đầu ra của mô hình là không gian bờ – bãi được nhận dạng, từ đó đường bờ trong được trích xuất dưới dạng tuyến và đưa vào công cụ DSAS để phân tích biến động theo chuỗi thời gian. Nội dung phân tích biến động và đánh giá kết quả được trình bày chi tiết ở các mục tiếp theo của chương.

3.2.3. Ứng dụng mô hình học máy trong nhận dạng đường bờ và giám sát biến động bờ biển

3.2.3.1 Kiến trúc mô hình truyền thống

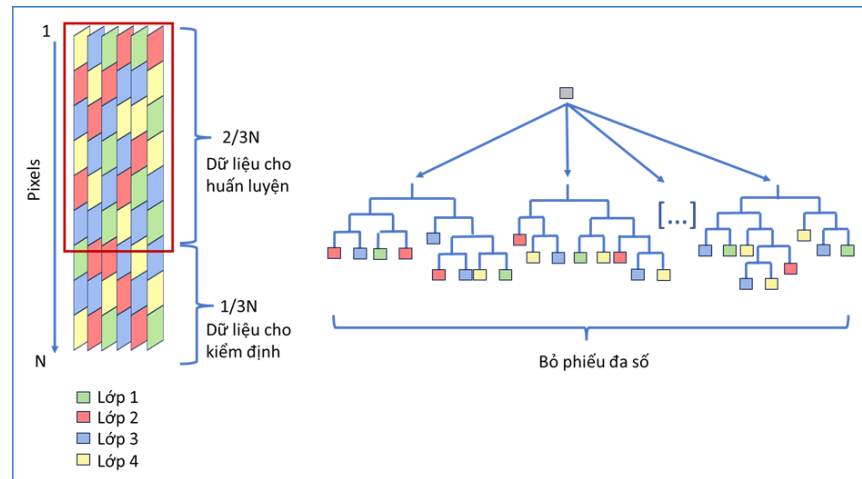
Mặc dù các mô hình truyền thống chủ yếu dựa vào thông tin phổ của từng pixel và hạn chế trong việc xem xét mối quan hệ không gian, chúng vẫn là những công cụ tiêu chuẩn để kiểm chứng hiệu quả của các mô hình tiên tiến hơn. Trong luận án này, hai thuật toán học máy truyền thống là Support Vector Machine (SVM) và Random Forest (RF) được sử dụng như các mô hình so sánh (baseline), nhằm đánh giá hiệu quả của các mô hình mạng nơ-ron sâu trong cùng điều kiện dữ liệu.

Máy Vector hỗ trợ (Support Vector Machine - SVM) (hình 3.6): Đây là thuật toán phân loại nhị phân tìm kiếm ranh giới tối ưu (siêu phẳng) giữa hai lớp dữ liệu [55][85,164]: khu vực bờ và khu vực không phải bờ. Để giải quyết bài toán phân tách dữ liệu phi tuyến tính của bờ biển, luận án sử dụng hàm kernel xuyên tâm (RBF). Các tham số tối ưu được xác định qua thực nghiệm là hệ số kernel (gamma) bằng 0,35 và hệ số phạt lỗi (C) bằng 90.



Hình 3.6. Mô hình SVM

Rừng ngẫu nhiên (Random Forest - RF) (Hình 3.7): Mô hình này được tạo thành từ tập hợp các cây quyết định để hạn chế hiện tượng quá khớp (overfitting) thường gặp ở cây quyết định đơn lẻ. Kết quả phân loại cuối cùng dựa trên nguyên tắc "bỏ phiếu đa số" từ các cây [45,134]. Trong nghiên cứu này, mô hình RF được thiết lập với 50 cây, mỗi cây có độ sâu tối đa là 30 để đảm bảo khả năng tổng quát hóa dữ liệu.



Hình 3.7. Mô hình Random Forest

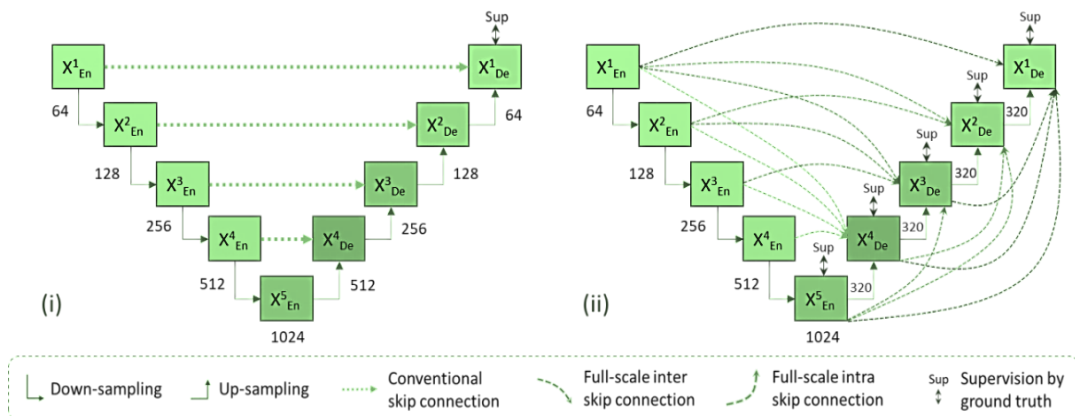
3.2.3.2. Kiến trúc của mô hình mạng nơ-ron

Khác với các phương pháp truyền thống chủ yếu dựa vào thông tin phổ của từng điểm ảnh, các mô hình học sâu đề xuất có khả năng trích xuất đồng thời các đặc trưng không gian và ngữ cảnh thông qua cơ chế tích chập. Bốn kiến trúc mạng nơ-ron tiên tiến được lựa chọn và xây dựng gồm: U-Net, U-Net3+, U2Net và DexiNed. Quá trình huấn luyện các mô hình học sâu được thực hiện trên nền tảng ArcGIS Pro hoặc trên ngôn ngữ Python trên Google Colab. Ảnh đầu vào được chuẩn hóa về kích thước cố định ($128 \times 128 \times 3$ và $256 \times 256 \times 3$) nhằm đảm bảo tính đồng nhất trong quá trình huấn luyện. Việc lựa chọn hai kích thước này cho phép đánh giá sự đánh đổi giữa khả năng nhận dạng chi tiết cục bộ và khả năng nắm bắt cấu trúc tổng thể của bờ biển. Bên cạnh đó, tốc độ học (learning rate) thay vì sử dụng một giá trị cố định, nghiên cứu áp dụng thuật toán xác định tốc độ học tự động (Automated Learning Rate Finder). Tốc độ học được điều chỉnh linh hoạt trong khoảng từ 0.001 đến 0.000001 dựa trên sự thay đổi của hàm mất mát (loss function) qua từng chu kỳ huấn luyện (epoch). Điều này giúp mô hình nhanh chóng tìm được điểm tối ưu cục bộ mà không bị hiện tượng dao động mạnh. Hơn nữa các mô hình này sử dụng các lớp tích chập (Conv), chuẩn hóa hàng loạt (Batch Normalization), gộp (Pooling 2x2), bỏ học (Dropout=0.1) với kích thước lô Batch size = 8 nhằm tăng tốc độ hội tụ, hạn chế quá khớp và nâng cao khả năng tổng quát hóa của mô hình. Bộ dữ liệu được phân chia theo tỷ lệ 70% (Train) / 15% (Validation) / 15% (Test). Tỷ lệ này đảm bảo mô hình có đủ dữ liệu để học các đặc trưng hình thái đường bờ, đồng thời có đủ mẫu độc lập để kiểm chứng khách quan khả năng tổng quát hóa, tránh hiện tượng quá khớp. Việc sử dụng các kết nối bỏ qua (skip connections) trong các kiến trúc dạng chữ U giúp bảo toàn thông tin không gian ở các mức độ phân giải khác nhau, đặc biệt quan trọng trong việc xác

định ranh giới bờ biển. Tất cả các mô hình được huấn luyện trên cùng tập dữ liệu và sử dụng thuật toán tối ưu Adam nhằm đảm bảo khả năng so sánh khách quan giữa các kiến trúc.

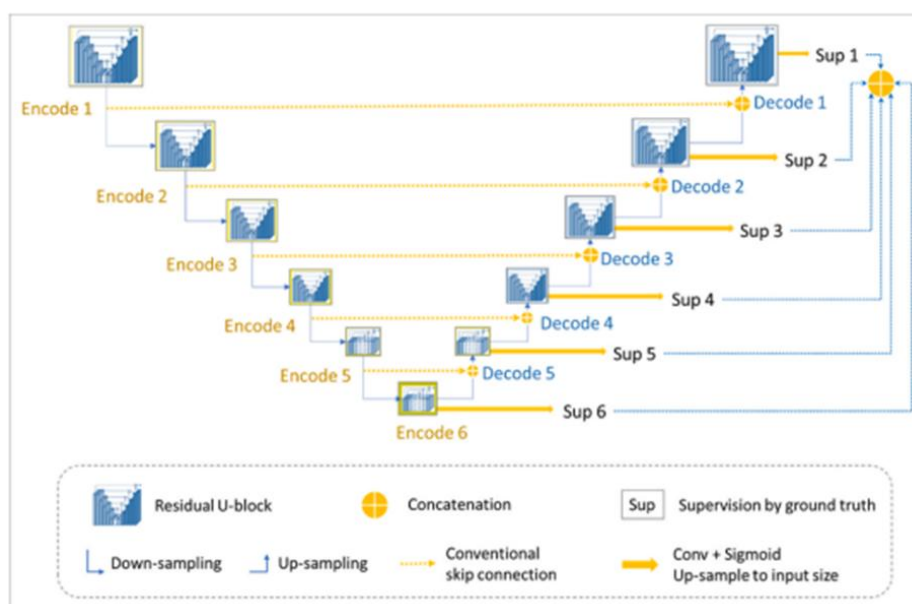
Cấu trúc mô hình U-Net: U-Net là kiến trúc mạng nơ-ron tích chập dạng chữ U, gồm hai phần chính: bộ mã hóa (encoder) và bộ giải mã (decoder) (Hình 3.8) [64,150]. Phần encoder thực hiện trích xuất đặc trưng thông qua các lớp tích chập và gộp, giúp nắm bắt ngữ cảnh không gian ở các mức độ phân giải khác nhau. Phần decoder thực hiện khôi phục độ phân giải không gian ban đầu thông qua các lớp giải tích chập (upsampling). Các kết nối bỏ qua (skip connections) giữa các tầng tương ứng của encoder và decoder cho phép kết hợp đặc trưng mức cao và mức thấp, giúp bảo toàn thông tin biên và cải thiện độ chính xác trong việc xác định ranh giới đường bờ. Khác với bài toán phân loại cảnh quan truyền thống tập trung vào việc nhận diện các mảng không gian đồng nhất, việc ứng dụng U-Net trong xác định đường bờ đòi hỏi khả năng tách lọc các đặc trưng biên ở mức độ pixel. Mô hình phải giải quyết bài toán mất cân bằng dữ liệu nghiêm trọng và bảo toàn các chi tiết hình học của đường ranh giới thông qua việc tối ưu hóa các kết nối nhảy và hàm mất mát chuyên biệt.

Cấu trúc mô hình U-Net3+: U-Net3+ là phiên bản mở rộng của U-Net, được thiết kế nhằm tăng cường khả năng tích hợp thông tin đa tầng (Hình 3.8) [63,89]. Thay vì chỉ kết nối các tầng đối xứng như U-Net truyền thống, U-Net3+ sử dụng kết nối bỏ qua toàn phần, trong đó mỗi tầng của decoder nhận đặc trưng từ tất cả các tầng encoder ở nhiều mức độ phân giải khác nhau. Cấu trúc này cho phép mô hình khai thác đồng thời thông tin cục bộ và ngữ cảnh toàn cục, giúp cải thiện khả năng phân đoạn các đối tượng có hình thái phức tạp và biên không rõ ràng, như đường bờ biển trong các khu vực bãi cát hoặc bãi triều.



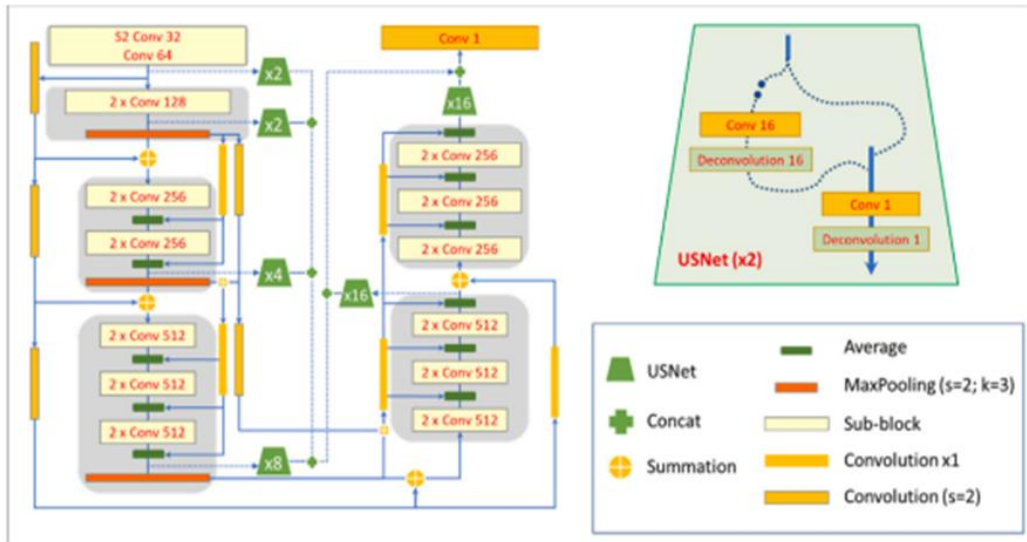
Hình 3.8. Kiến trúc của các mô hình U-Net (i) và U-Net3+ (ii) được sử dụng để huấn luyện các mô hình ML để phát hiện đường bờ biển trong và ngoài

Cấu trúc mô hình U²-Net (U2Net): U²-Net được xây dựng dựa trên nguyên lý mạng chữ U lồng nhau, trong đó mỗi khối encoder-decoder lại là một mạng U-Net thu nhỏ (Residual U-block) (Hình 3.9) [131]. Cấu trúc này cho phép mô hình học các đặc trưng đa tỉ lệ một cách sâu hơn mà không làm tăng đáng kể số lượng tham số. Nhờ khả năng khai thác đồng thời thông tin không gian ở nhiều cấp độ, U²-Net đặc biệt phù hợp với các tập dữ liệu có kích thước hạn chế nhưng có sự đa dạng về hình thái, như ảnh UAV và ảnh viễn thám độ phân giải cao trong nghiên cứu này.



Hình 3.9. Kiến trúc của các mô hình U²Net

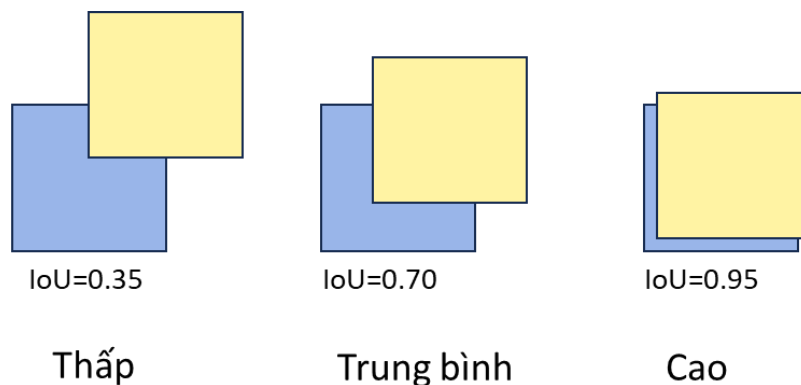
Cấu trúc mô hình DexiNed: DexiNed là mô hình mạng nơ-ron sâu chuyên biệt cho phát hiện biên (edge detection), gồm nhiều nhánh trích xuất đặc trưng song song ở các mức độ sâu khác nhau (Hình 3.10) [136]. Mỗi nhánh tạo ra một bản đồ biên ở một mức ngữ nghĩa riêng, sau đó được tổng hợp để tạo ra kết quả cuối cùng. Nhờ cơ chế học đa tầng và giám sát sâu (deep supervision), DexiNed có khả năng phát hiện các ranh giới mảnh và liên tục, đặc biệt hữu ích trong việc hỗ trợ xác định biên đường bờ trong các khu vực có độ tương phản thấp hoặc bị che phủ bởi thảm thực vật.



Hình 3.10. Kiến trúc của các mô hình DexiNet

3.2.3.3 Phương pháp đánh giá hiệu suất hoạt động của mô hình học máy

Trong giải đoạn ảnh, yêu cầu đặt ra không chỉ là nhận diện chính xác từng đối tượng trong ảnh mà còn phải phân loại đúng lớp tương ứng của chúng. Chỉ số Intersection over Union (IoU) được sử dụng phổ biến trong bối cảnh này nhằm đánh giá mức độ trùng khớp giữa vùng dự đoán và vùng thực tế, thông qua tỷ lệ giữa diện tích giao nhau và diện tích hợp nhất của hai vùng quan tâm. Chỉ số IoU cung cấp một thước đo định lượng cho độ chính xác của mô hình: các hộp giới hạn (bounding boxes) có mức độ chồng lấp cao với vùng đối tượng thực sẽ đạt điểm IoU cao hơn so với các hộp có ít chồng lấp (Hình 3.11). Nhờ khả năng phản ánh trực tiếp mức độ tương ứng giữa kết quả dự đoán và thực tế, IoU được xem là một tiêu chuẩn đáng tin cậy trong việc đánh giá hiệu quả của các mô hình phát hiện và phân đoạn đối tượng.



Hình 3.11. Mô tả các mức độ đánh giá IoU

Trong việc nhận dạng mẫu, truy xuất thông tin và phân loại nhị phân, precision (hay còn gọi là giá trị dự đoán dương tính) là tỷ lệ giữa số lượng dự đoán

chính xác và tổng số dự đoán thực hiện. Trong khi đó, recall (hay còn gọi là độ nhạy) là tỷ lệ giữa số lượng dự đoán chính xác và tổng số trường hợp mục tiêu cần phải dự đoán. Do đó, cả precision và recall đều được sử dụng trong quá trình phân loại để đo lường độ chính xác của mô hình [137].

		Kết quả giải đoán	
		Negative	Positive
Thực tế	Negative	Phát hiện không có – chính xác (True Negative)	Phát hiện sai (False Positive)
	Positive	Bỏ sót (False Negative)	Phát hiện đúng (True Positive)

Hình 3.12. Mô tả các khái niệm phục vụ cho tính toán đánh giá

Precision thể hiện mức độ “đúng” trong các điểm mà mô hình xác định là bờ biển — tức là trong số các điểm được mô hình nhận diện là bờ, có bao nhiêu điểm thực sự là bờ. Nếu Precision đạt 1, điều đó nghĩa là tất cả các điểm được chọn đều chính xác, không có điểm nào bị nhầm với vùng không phải bờ. Tuy nhiên, Precision cao không có nghĩa là mô hình tốt nếu nó chỉ nhận diện được một phần nhỏ đường bờ, bỏ sót nhiều khu vực bờ khác. Ngược lại, Recall cho biết mô hình đã phát hiện được bao nhiêu phần trăm đường bờ thực tế — tức là trong toàn bộ các điểm thật sự là bờ biển, có bao nhiêu điểm đã được mô hình nhận diện đúng. Khi Recall đạt 1, nghĩa là mô hình không bỏ sót điểm bờ nào, nhưng điều này chưa đủ nếu mô hình đồng thời gán nhầm nhiều vùng không phải bờ thành bờ, làm giảm độ chính xác chung. Vì vậy, cần kết hợp cả hai chỉ số để đánh giá toàn diện hiệu quả của mô hình giải đoán bờ biển. (Hình 3.12).

Sau đây là công thức cho Precision và Recall:

$$Precision = \frac{\#True\ Positives}{\#True\ Positives + \#False\ Positives} \quad (2.1)$$

$$Recall = \frac{\#True\ Positives}{\#True\ Positives + \#False\ Negatives} \quad (2.2)$$

Trong phát hiện đối tượng, một kết quả dự đoán được coi là chính xác nếu $IoU \geq 0.5$. Vì thế cách phương thức đánh giá được sử dụng là Precision ($IoU \geq 0.5$) và Recall ($IoU \geq 0.5$) như sau:

Precision ($IoU \geq 0.5$):

$$P_{IoU \geq 0.5} = \frac{TP_{IoU \geq 0.5}}{TP_{IoU \geq 0.5} + FP_{IoU \geq 0.5}} \quad (2.3)$$

Recall ($IoU \geq 0.5$):

$$R_{IoU \geq 0.5} = \frac{TP_{IoU \geq 0.5}}{TP_{IoU \geq 0.5} + FN_{IoU \geq 0.5}} \quad (2.4)$$

Cả hai chỉ số trên đều lớn hơn 0.8 được coi tốt.

Bên cạnh phương pháp đánh giá hiệu suất trên, luận án cũng sử dụng các phương pháp đánh giá lỗi và độ chính xác thông thường như lỗi bỏ sót, lỗi phân loại nhầm, độ chính xác theo lớp thực tế, độ chính xác theo lớp dự đoán, chỉ số kappa và độ chính xác tổng thể. Các phương pháp đánh giá này cung cấp cái nhìn tổng quan về hiệu suất của mô hình phân loại có thể áp dụng được cho việc đánh giá các mô hình mạng thần kinh. Chúng giúp đánh giá các khía cạnh khác nhau của mô hình, từ khả năng phát hiện các mẫu quan trọng đến độ chính xác trong từng lớp cụ thể.

* Lỗi bỏ sót (Error of omission) là tỷ lệ các mẫu thuộc về một lớp cụ thể nhưng bị mô hình phân loại sai thành các lớp khác. Công thức:

$$\text{Error of omission} = \frac{\text{Số mẫu thực tế thuộc lớp bị phân loại sai}}{\text{Tổng số mẫu thực tế thuộc lớp đó}} * 100 \quad (2.5)$$

* Lỗi phân loại nhầm (Error of commission) là tỷ lệ các mẫu không thuộc về một lớp cụ thể nhưng bị mô hình phân loại sai thành lớp đó. Công thức:

$$\text{Error of commission} = \frac{\text{Số mẫu thực tế không thuộc lớp bị phân loại vào lớp đó}}{\text{Tổng số mẫu được phân loại vào lớp đó}} * 100\% \quad (2.6)$$

* Độ chính xác theo lớp thực tế (Producer Accuracy) là phản ánh khả năng của mô hình trong việc nhận diện đúng các đối tượng thực tế thuộc về một lớp nhất định. Công thức:

$$\text{Producer Accuracy} = \frac{\text{Số mẫu thực tế thuộc lớp được phân loại đúng}}{\text{Tổng số mẫu thực tế thuộc lớp đó}} * 100 \quad (2.7)$$

* Độ chính xác theo lớp dự đoán (user accuracy) là phản ánh độ tin cậy của lớp phân loại trên bản đồ, tức là xác suất một đối tượng đã được gán nhãn thuộc một lớp nào đó là chính xác. Công thức:

$$\text{User Accuracy} = \frac{\text{Số mẫu thực sự thuộc lớp đó}}{\text{Tổng số mẫu được phân loại vào lớp đó}} * 100 \quad (2.8)$$

* Kappa là một chỉ số thống kê dùng để đo lường mức độ đồng thuận (agreement) giữa hai hệ thống phân loại. Công thức:

$$\text{Kappa} = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (2.9)$$

Trong đó: P_o là tỷ lệ các mẫu được phân loại đúng và P_e là tỷ lệ mẫu được phân loại đúng một cách ngẫu nhiên.

* Độ chính xác tổng thể là tỷ lệ các mẫu được mô hình phân loại đúng trên tổng số mẫu. Công thức:

$$\text{Overall Accuracy} = \frac{\text{Tổng số mẫu được phân loại đúng}}{\text{Tổng số mẫu}} * 100\% \quad (2.10)$$

3.2.4. Tích hợp GIS và mô hình DSAS trong đánh giá biến động đường bờ

Sau khi không gian giữa đường bờ trong và ngoài được xuất ra từ mô hình học máy được lựa chọn, đường bờ trong tại thành phố Đà Nẵng trong 20 năm được bóc tách riêng và đưa vào công cụ DSAS trong ArcGIS để đánh giá sự biến đổi về không gian. Mô hình học máy tốt nhất lúc này có thể sử dụng để tách đường bờ trong từ cả dữ liệu ảnh UAV và ảnh từ nguồn GE đa thời gian. Dữ liệu ảnh mới, không nằm trong dữ liệu huấn luyện mô hình được thu thập và tiền xử lý tương tự như mô tả trong Phần 3.2.2. Công cụ DSAS (Digital Shoreline Analysis System) là một công cụ phân tích hệ thống đường bờ biển dưới dạng kỹ thuật số, một ứng dụng chạy trên nền tảng phần mềm ArcGIS. Phiên bản DSAS được phát hành vào tháng 11 năm 2021. Công cụ này được sử dụng để tính toán và thống kê tốc độ thay đổi của các vectơ đường bờ trong một chuỗi thời gian. Để đánh giá hiệu suất của phương pháp tính toán, nghiên cứu này sử dụng ba phương pháp khác nhau: tỷ lệ giữa điểm đầu đến điểm cuối (EPR), hồi quy tuyến tính (LRR) và hồi quy tuyến tính có trọng số (WLR).

Phương pháp EPR tính toán tốc độ thay đổi bờ biển bằng cách so sánh khoảng cách giữa đường bờ cổ nhất và đường bờ mới nhất trong một thời gian nhất định. Phương pháp này dễ tính toán và chỉ yêu cầu thông tin về hai đường bờ tại hai thời điểm khác nhau. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu đã chứng minh phương pháp này chỉ phù hợp với trường hợp có quá ít dữ liệu, mà không xem xét xu hướng biến động của đường bờ vào các thời điểm khác nhau. Do đó nghiên cứu không sử dụng phương pháp tính toán EPR để tính biến động đường bờ.

Phương pháp LRR sử dụng mô hình hồi quy tuyến tính để biểu diễn sự thay đổi của một biến số theo một hoặc nhiều biến khác. Bằng cách này, tốc độ thay đổi của đường bờ được xác định dựa trên hệ số góc của đường hồi quy tuyến tính, đảm bảo tính chính xác và khách quan trong việc đánh giá thay đổi đường bờ. Phương pháp này có ưu điểm là dễ tính toán, mang tính khách quan và có kết quả độ tin cậy cao hơn phương pháp EPR.

Phương pháp WLR có các thông số thống kê bổ sung như sai số tiêu chuẩn và hệ số hồi quy cung cấp thông tin chi tiết hơn về độ chính xác của kết quả tính toán. Đồng thời, phương pháp này dựa vào trọng số của dữ liệu do vậy cần cung cấp mức độ tin cậy (sai số) trong dữ liệu thuộc tính của đường bờ. Dữ liệu có sai số nhỏ hơn thì sẽ

có trọng số lớn hơn. Do đó, tại vị trí mặt cắt phương pháp này sẽ đưa ra được đường hồi quy tuyến tính phù hợp nhất với hệ số góc của đường hồi quy là tốc độ thay đổi đường bờ. Với ưu điểm của phương pháp WLR, nghiên cứu quyết định sử dụng phương pháp này để đánh giá sự biến động của đường bờ tại khu vực nghiên cứu.

Trong mô hình DSAS, bên cạnh việc xác định tốc độ biến động đường bờ trung bình hàng năm bằng phương pháp hồi quy tuyến tính bình phương tối thiểu (LRR) và hồi quy tuyến tính có trọng số (WLR), việc đánh giá sai số tiêu chuẩn của các hàm ước lượng này là bắt buộc để xác định độ tin cậy không gian của mô hình. Luận án sử dụng hai chỉ số cốt lõi bao gồm Sai số tiêu chuẩn phép ước lượng bình phương tối thiểu (LSE - Least Squares Estimation) và Sai số tiêu chuẩn phép ước lượng có trọng số (WSE - Weighted Standard Error). Cả LSE và WSE đo lường trực tiếp khoảng cách hình học (phần dư) giữa vị trí các đường bờ thực tế giải đoán từ ảnh viễn thám/UAV đối chiếu với vị trí lý thuyết nằm trên đường thẳng hồi quy tối ưu qua chuỗi thời gian. Đối với phương pháp hồi quy tuyến tính thường (OLR), chỉ số LSE tại mỗi mặt cắt (transect) được xác định theo công thức:

$$LSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n - 2}}$$

Đối với phương pháp hồi quy tuyến tính có trọng số (WLR), nhằm chiết khấu triệt để các sai số lan truyền do đặc điểm đa nguồn dữ liệu ảnh có độ phân giải khác nhau, chỉ số WSE được tính toán dựa trên việc tích hợp thêm ma trận trọng số nghịch đảo với sai số vị trí

$$WSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - y'_i)^2}{n - 2}}$$

Trong đó: y_i : Khoảng cách thực tế từ đường nền (baseline) đến điểm giao cắt của đường bờ năm i trên mặt cắt (m). y'_i : Khoảng cách dự báo từ đường nền đến đường thẳng hồi quy tại thời điểm năm i (m). $(y_i - y'_i)$ Phần dư (residual) thể hiện độ lệch khoảng cách (m). n : Tổng số lượng đường bờ tham gia tính toán trên mặt cắt. $n - 2$: Bậc tự do của hệ phương trình hồi quy hai tham số (hệ số góc m và hằng số tự do b). w_i : trọng số (weight) được gán cho đường bờ tại thời điểm năm thứ i .

Về mặt ý nghĩa địa lý, các chỉ số LSE và WSE phản ánh mức độ biến động tuyến tính hoặc phi tuyến tính của dải ven bờ tại thực địa.

Giá trị LSE/WSE thấp (tiệm cận về 0): Minh chứng các đường bờ qua các thời kỳ phân bố tập trung sát đường hồi quy mẫu. Xu hướng bồi tụ hoặc xói lở diễn ra đều đặn, ổn định và có tính tịnh tiến theo thời gian, độ tin cậy dự báo của mô hình đạt mức

cao. Giá trị LSE/WSE cao đột biến: Phản ánh hiện tượng đứt gãy quy luật biến động tuyến tính dài hạn. Sự gia tăng đột biến của tổng bình phương phần dư $\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2$ chỉ ra rằng tại vị trí mặt cắt đó, đường bờ chịu các tác động cục đoạn mang tính nhảy bậc trong thời gian ngắn (như hoạt động san lấp mặt bằng, lấn biển nhân sinh) hoặc động lực cửa sông phức tạp trời sục theo mùa bão lũ.

Kết quả của mô hình DSAS sẽ cung cấp cho luận án thông tin chi tiết về mức độ bồi tụ, xói lở tại các đoạn khác nhau. Trong DSAS, một số thông số cần hiệu chỉnh phù hợp với khu vực nghiên cứu bao gồm: (i) khoảng cách từ đường cơ sở vào trong đất liền và ra ngoài biển; (ii) khoảng cách giữa các đường vuông góc; (iii) phương pháp tối ưu/tính toán xói lở/bồi tụ. Ngoài phương pháp tối ưu/tính toán xói lở/bồi tụ đã trình bày ở trên, khoảng cách tính toán từ đường cơ sở vào trong đất liền và ra biển phù hợp với khu vực bờ biển Đà Nẵng là 100 m; và khoảng cách giữa các đường vuông góc là 50 m. Kết quả mô hình đầu ra sẽ được nghiên cứu sinh kiểm chứng trên ảnh vệ tinh và ngoài thực địa, đặc biệt tại các khu vực xảy ra xói lở/bồi tụ bất thường.

3.3. Bộ chỉ thị phục vụ nhận dạng đường bờ trong và đánh giá biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng

3.3.1. Khái quát bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong

3.3.1.1. Nguyên tắc xây dựng và sử dụng bộ chỉ thị đường bờ trong thành phố Đà Nẵng

a. Vai trò của đường bờ trong trong phân tích biến động đa thời gian

Trong nghiên cứu đánh giá biến động đường bờ dựa trên ảnh viễn thám độ phân giải cao, việc xác định một ranh giới đường bờ thống nhất, ổn định và có khả năng nhận dạng nhất quán theo thời gian là yêu cầu mang tính nền tảng. Đặc biệt, đối với các nghiên cứu theo chuỗi thời gian dài và có ứng dụng mô hình học máy, ranh giới được lựa chọn không chỉ cần phản ánh đúng thực trạng hình thái bờ biển tại từng thời điểm mà còn phải bảo đảm tính so sánh không gian – thời gian giữa các giai đoạn khác nhau.

Trên cơ sở đó, luận án lựa chọn *đường bờ trong* làm đối tượng trung tâm để nhận dạng và phân tích biến động bờ biển. Trong phạm vi nghiên cứu này, đường bờ trong được hiểu là *ranh giới phía đất liền ổn định nhất của hệ thống bờ biển*, phản ánh giới hạn tác động dài hạn của các quá trình biển – ven biển trong điều kiện tự nhiên và dưới ảnh hưởng của hoạt động nhân sinh. Không giống như đường bờ ngoài thường biến đổi mạnh theo mực nước triều, sóng và các điều kiện khí tượng ngắn hạn, đường bờ trong có xu hướng duy trì vị trí tương đối bền vững trong nhiều năm.

Việc lựa chọn đường bờ trong cho phép đáp ứng đồng thời ba mục tiêu chính của luận án: (i) đánh giá hiện trạng và xu thế xói lở – bồi tụ bờ biển theo nghĩa hình thái – địa mạo; (ii) so sánh biến động đường bờ đa thời gian một cách nhất quán; và (iii) chuẩn hóa dữ liệu đầu vào phục vụ huấn luyện, kiểm chứng và ứng dụng các mô hình học máy trong nhận dạng tự động và phân tích biến động bờ biển.

b. Mối quan hệ giữa kiểu bờ và kiểu vùng bờ trong xây dựng chỉ thị

Một đặc điểm nổi bật của khu vực nghiên cứu là sự phân hóa rất mạnh về kiểu bờ và kiểu vùng bờ, đã được luận án phân tích chi tiết trong Chương 2. Ven biển thành phố Đà Nẵng và vùng phụ cận không tồn tại một dạng bờ biển đồng nhất, mà bao gồm đồng thời các bờ cát cao – đụn cát, bờ cát thấp, bờ mài mòn trên đá rạn, các đoạn bờ nhân tạo, phân bố trong các kiểu vùng bờ khác nhau như vùng biển mở, vùng cửa sông, vùng vũng vịnh và vùng bờ đá.

Trong bối cảnh đó, luận án phân định rõ vai trò của hai cấp phân loại này trong xây dựng bộ chỉ thị đường bờ trong. *Kiểu bờ* (hình thái – vật chất cụ thể tại từng đoạn bờ) được xem là *đối tượng trực tiếp* để xác lập chỉ thị nhận dạng đường bờ trong, bởi đây là cấp phản ánh rõ nhất cấu trúc địa mạo, vật liệu cấu tạo và quá trình động lực chi phối. Ngược lại, *kiểu vùng bờ* đóng vai trò là *khung không gian – động lực tham chiếu*, giúp lý giải bối cảnh hình thành, mức độ ổn định và sự khác biệt về hiệu quả nhận dạng đường bờ giữa các khu vực.

Cách tiếp cận này cho phép tránh nhầm lẫn giữa các chỉ thị hình thái cụ thể với các đặc trưng tổng hợp mang tính vùng, đồng thời phản ánh đúng thực tiễn rằng trong cùng một kiểu vùng bờ (ví dụ vùng cửa sông hoặc vùng biển mở), có thể tồn tại nhiều đoạn bờ với các kiểu bờ khác nhau (bờ cát thấp, bờ cát cao, bờ nhân tạo). Việc nhận dạng đường bờ trong theo *kiểu bờ* vì vậy là tiền đề để đánh giá biến động bờ biển một cách có cơ sở khoa học trong từng kiểu vùng bờ.

c. Nguyên tắc phân nhóm chỉ thị theo kiểu bờ hình thái – vật chất

Xuất phát từ sự phân hóa mạnh mẽ về hình thái và vật liệu cấu tạo bờ biển, luận án không tiếp cận việc xác định đường bờ trong theo hướng áp dụng cứng nhắc một tiêu chí hình học hoặc một ngưỡng phổ duy nhất cho toàn bộ khu vực nghiên cứu. Thay vào đó, bộ chỉ thị đường bờ trong được *phân nhóm theo các kiểu bờ hình thái – vật chất chủ đạo*, bao gồm: (i) bờ cát cao; (ii) bờ cát thấp; (iii) bờ đá; và (iv) bờ nhân tạo.

Nguyên tắc phân nhóm này nhằm bảo đảm rằng mỗi chỉ thị được lựa chọn đều phản ánh đúng quá trình địa mạo chi phối tại đoạn bờ tương ứng, có biểu hiện hình thái rõ ràng trên ảnh viễn thám độ phân giải cao và có mức độ ổn định phù

hợp cho phân tích biến động đa thời gian. Đồng thời, việc phân nhóm theo kiểu bờ cho phép chuẩn hóa đầu vào cho các mô hình học máy, hạn chế nhiễu do sự khác biệt hình thái giữa các đoạn bờ và nâng cao khả năng tổng quát hóa của mô hình khi áp dụng trên phạm vi toàn tuyến bờ.

Cách tiếp cận này phù hợp với thông lệ quốc tế trong nghiên cứu biến động bờ biển, đặc biệt trong các nghiên cứu ứng dụng ảnh viễn thám độ phân giải cao và trí tuệ nhân tạo, nơi mà tính nhất quán hình thái của đối tượng nhận dạng đóng vai trò quyết định đến hiệu quả của mô hình.

d. Hệ quả phương pháp luận đối với nhận dạng đường bờ bằng viễn thám và AI

Việc xây dựng bộ chỉ thị đường bờ trong theo kiểu bờ hình thái – vật chất kéo theo những hệ quả phương pháp luận quan trọng đối với toàn bộ quy trình nhận dạng và phân tích biến động đường bờ bằng viễn thám và học máy. Trước hết, các chỉ thị được xác định theo hướng ưu tiên các ranh giới có khả năng nhận dạng ổn định trên ảnh viễn thám độ phân giải cao, phù hợp với cả ảnh UAV, ảnh vệ tinh thương mại và ảnh GE.

Thứ hai, bộ chỉ thị được thiết kế theo hướng *chuẩn hóa được* để phục vụ huấn luyện và đánh giá các mô hình học máy, đặc biệt là các mô hình phân đoạn ảnh và phát hiện biên. Việc gắn chỉ thị với kiểu bờ cụ thể giúp mô hình học được các đặc trưng hình thái – không gian có ý nghĩa địa mạo, thay vì chỉ dựa vào thông tin phổ thuần túy.

Cuối cùng, cách tiếp cận này tạo cầu nối logic giữa phân tích địa mạo truyền thống và các phương pháp hiện đại dựa trên trí tuệ nhân tạo, bảo đảm rằng kết quả nhận dạng đường bờ không chỉ đạt độ chính xác kỹ thuật, mà còn có ý nghĩa khoa học và khả năng diễn giải trong bối cảnh động lực bờ biển thực tế. Đây chính là nền tảng để luận án tiếp tục trình bày hệ thống chỉ thị cụ thể cho từng kiểu bờ trong mục 3.3.2 và đánh giá hiệu quả của các mô hình học máy trong Chương 4.

3.3.1.2. Giới thiệu khái quát về bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong thành phố Đà Nẵng

Trên cơ sở các nguyên tắc phương pháp luận đã trình bày ở mục 3.3.1.1 và kết quả phân tích đặc điểm kiểu bờ, kiểu vùng bờ khu vực nghiên cứu (Chương 2), luận án xây dựng bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong thành phố Đà Nẵng theo cách tiếp cận gắn với kiểu bờ hình thái – vật chất cụ thể. Bộ chỉ thị này được tổng hợp và hệ thống hóa trong Phụ lục 4, nhằm phục vụ đồng thời hai mục tiêu: (i) nhận dạng, số hóa thống nhất đường bờ trong trên ảnh viễn thám độ phân giải cao; và (ii) chuẩn hóa dữ liệu đầu vào cho các mô hình học máy trong phân tích biến

động bờ biển đa thời gian. Các chỉ thị được xác định rõ về hình thái, vị trí không gian và đặc điểm nhận dạng trên ảnh vệ tinh và ngoài thực địa như Hình 3.13.



Hình 3.13. Một số chỉ thị cho các kiểu bờ khác nhau tại thành phố Đà Nẵng

Theo cấu trúc tổng thể, bộ chỉ thị được xây dựng cho bốn kiểu bờ chính tại khu vực nghiên cứu, bao gồm: bờ cát cao, bờ cát thấp, bờ đá, và bờ nhân tạo. Mỗi kiểu bờ được đặc trưng bởi một tập hợp các nhóm chỉ thị phản ánh các khía cạnh hình thái, sinh học, trầm tích và công trình nhân tạo chi phối sự hình thành và ổn định của ranh giới bờ, từ đó xác định các chỉ thị cụ thể phù hợp để làm ranh giới đường bờ trong.

Đối với kiểu bờ cát cao – đụn cát ven biển, bộ chỉ thị gồm ba nhóm chỉ thị, bao gồm: (i) ranh giới hình thái ổn định đụn cát; (ii) ranh giới hình thái – sinh học ổn định đụn cát; và (iii) dấu hiệu xói lở đụn cát do bão (kiểm chứng). Các nhóm chỉ thị này cho phép nhận dạng đường bờ trong gắn với trạng thái cân bằng dài hạn của hệ bãi – đụn, đồng thời hỗ trợ kiểm chứng trong các giai đoạn biến động cực đoan.

Đối với kiểu bờ cát thấp – cửa sông, bãi bồi ven biển, bộ chỉ thị được tổ chức thành hai nhóm chỉ thị chính, bao gồm: (i) ranh giới sinh học ổn định ven biển (đường bờ trong); và (ii) dấu hiệu suy giảm và phục hồi sinh học do bão (kiểm chứng). Cách tổ chức này phản ánh vai trò trung tâm của các chỉ thị sinh học trong việc xác định đường bờ trong tại các đoạn bờ có cao độ thấp và biến động trầm tích mạnh.

Đối với *kiểu bờ đá – mũi đá, vách đá*, bộ chỉ thị gồm *ba nhóm chỉ thị*, bao gồm: (i) *ranh giới hình thái ổn định bờ đá (đường bờ trong)*; (ii) *ranh giới sinh học ổn định trên nền đá (bổ trợ)*; và (iii) *dấu hiệu sụt lở cục bộ bờ đá (kiểm chứng)*. Các nhóm chỉ thị này phản ánh mối quan hệ giữa mài mòn sóng, nền đá gốc và quá trình trượt lở cục bộ trong tiến hóa bờ đá ven biển.

Đối với *kiểu bờ nhân tạo – đô thị, cảng biển và du lịch*, bộ chỉ thị được tổ chức thành *hai nhóm chỉ thị*, bao gồm: (i) *ranh giới công trình bảo vệ bờ*; và (ii) *dấu hiệu tương tác công trình – tự nhiên (kiểm chứng)*. Cách phân nhóm này cho phép xác định rõ ranh giới đường bờ trong gắn với các công trình bảo vệ bờ, đồng thời hỗ trợ đánh giá tác động phụ của công trình đến động lực và hình thái bờ biển lân cận.

Bên cạnh việc liệt kê các chỉ thị cụ thể, bộ chỉ thị còn được mô tả thông qua các cột thông tin mang tính khái quát trong Phụ lục 4, bao gồm: biểu hiện trên ảnh viễn thám/UAV, ý nghĩa địa mạo – động lực và dấu hiệu nhận biết ngoài thực địa. Cách trình bày này cho phép liên kết trực tiếp giữa hình thái quan sát được trên ảnh, bản chất quá trình chi phối và quyết định lựa chọn chỉ thị trong từng bối cảnh cụ thể. Chẳng hạn, cùng là chỉ thị sinh học nhưng mức độ ưu tiên sử dụng khác nhau giữa bờ cát cao và bờ cát thấp, hoặc giữa bờ đá và bờ nhân tạo.

Như vậy, bộ chỉ thị được trình bày trong Phụ lục 4 không chỉ là danh mục các dấu hiệu nhận dạng, mà còn là *khung logic phương pháp* cho toàn bộ quá trình xác định đường bờ trong bằng viễn thám và học máy tại thành phố Đà Nẵng. Bộ chỉ thị này đóng vai trò cầu nối giữa phân tích địa mạo truyền thống và các phương pháp nhận dạng tự động, tạo nền tảng để luận án tiếp tục trình bày chi tiết bộ chỉ thị theo từng kiểu bờ và triển khai thử nghiệm mô hình học máy trong các mục tiếp theo của Chương 3 và Chương 4.

3.3.2. Bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong theo các kiểu bờ tại thành phố Đà Nẵng

Trên cơ sở phân loại kiểu bờ và bộ chỉ thị đã được giới thiệu ở mục 3.3.1.2, mục này trình bày chi tiết cách lựa chọn và sử dụng bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong tương ứng với bốn kiểu bờ chính tại thành phố Đà Nẵng. Đối với mỗi kiểu bờ, các chỉ thị được tổ chức theo nhóm chức năng, phân biệt rõ giữa chỉ thị dùng trực tiếp để xác định đường bờ trong và chỉ thị kiểm chứng – hỗ trợ diễn giải, nhằm bảo đảm tính ổn định, nhất quán và khả năng áp dụng trong phân tích viễn thám đa thời gian và mô hình học máy

3.3.2.1. Kiểu bờ cát cao – đụn cát ven biển

Kiểu bờ cát cao phân bố dọc theo các đoạn bờ biển mở của thành phố Đà Nẵng, đặc trưng bởi hệ thống bãi cát rộng kết hợp với đụn cát tiên tiêu phát triển rõ rệt, cao độ địa hình tương đối lớn và trầm tích chủ yếu là cát thô đến trung bình. Trong điều kiện hình thái này, đường bờ trong gắn chặt với ranh giới ổn định dài hạn của hệ bãi – đụn, phản ánh trạng thái cân bằng tương đối giữa động lực sóng – gió và quá trình tích tụ trầm tích ven biển.

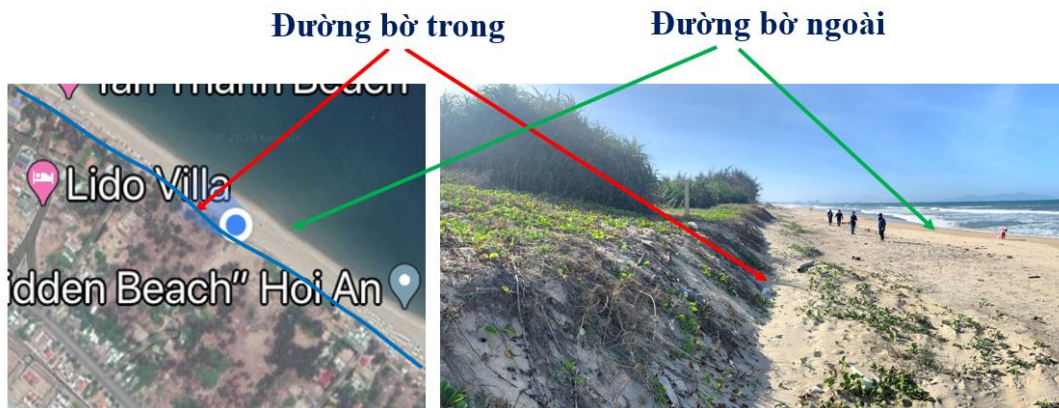
Đối với kiểu bờ cát cao, bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong được tổ chức thành ba nhóm chỉ thị chính (Phụ lục 4), bao gồm: (i) ranh giới hình thái ổn định đụn cát; (ii) ranh giới hình thái – sinh học ổn định đụn cát; và (iii) dấu hiệu xói lở đụn cát do bão (kiểm chứng). Cách tổ chức này cho phép ưu tiên các chỉ thị phản ánh trạng thái ổn định dài hạn, đồng thời sử dụng các chỉ thị biến động mạnh làm cơ sở kiểm chứng và diễn giải quá trình.

Nhóm ranh giới hình thái ổn định đụn cát đóng vai trò trung tâm trong xác định đường bờ trong tại các đoạn bờ cát cao. Các chỉ thị tiêu biểu gồm chân đụn cát, chân đụn cát cổ và ranh giới bãi sau – sườn đụn, phản ánh vị trí chuyển tiếp hình thái ổn định giữa bãi biển chịu tác động thường xuyên của sóng và khối đụn cát ít biến động theo mùa. Trên ảnh viễn thám độ phân giải cao, các chỉ thị này thường thể hiện bằng đường gãy độ dốc rõ ràng, kết hợp với sự thay đổi tương đối đồng nhất về kết cấu bề mặt cát và ít dịch chuyển trong chuỗi ảnh đa thời gian. Ngoài thực địa, chúng tương ứng với vị trí bắt đầu tăng dốc rõ rệt của địa hình và sự xuất hiện của cát khô, nén chặt hơn.

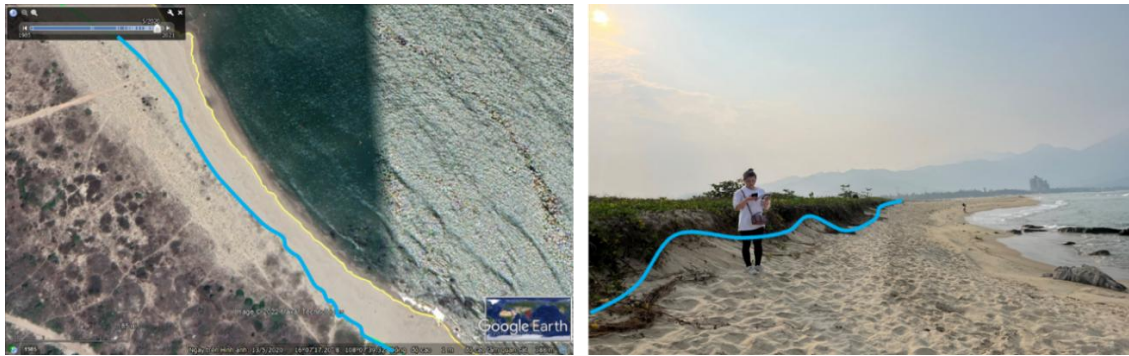
Nhóm ranh giới hình thái – sinh học ổn định đụn cát bao gồm các chỉ thị như mép ngoài dải thực vật đụn cát và chân đụn cát cố định bởi thực vật, phản ánh vai trò ổn định của thảm thực vật trong việc “neo giữ” hình thái đụn. Các chỉ thị này đặc biệt hữu ích tại các đoạn bờ có hoạt động du lịch – đô thị, nơi hình thái đụn có thể bị điều chỉnh cục bộ nhưng ranh giới thực vật vẫn duy trì vị trí tương đối ổn định.

Trong thực tiễn xác định đường bờ trong, các chỉ thị sinh học thường được sử dụng kết hợp với chỉ thị hình thái nhằm tăng độ tin cậy và giảm sai số khi trích xuất tự động bằng học máy. Với kiểu bờ cát cao đặc trưng cho bờ biển mở, chỉ thị phù hợp là mép ngoài cùng của dải thực vật ven biển, thường là cây muồng biển, cỏ ven cát hoặc rừng phi lao trồng. Dải thực vật này nằm giữa bãi cát trống (phía biển) và khu vực đất ổn định (phía trong). Trên ảnh vệ tinh, ranh giới này thể hiện rõ rệt với màu xanh phân biệt so với màu sáng của cát khô (hình 3.14), song trong nhiều trường hợp, tuy ngoài thực địa có xuất hiện các vách xói song song với bờ biển, nhưng do đặc điểm mảnh và khó xác định trên ảnh, nên đường thực vật vẫn

được lựa chọn làm chỉ thị chính (Hình 3.15). Sai số giữa đường thực vật và vách xói chỉ khoảng 1 m – mức cho phép trong phân tích biến động theo chuỗi thời gian dài.

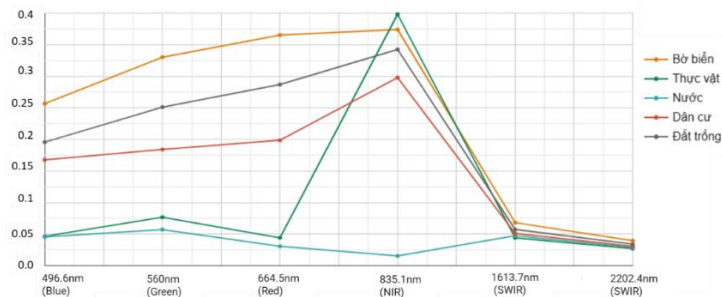


Hình 3.14. Đường bờ trong và ngoài tại Hội An Đông (Nguồn: Đặng Văn Bào, 2023)

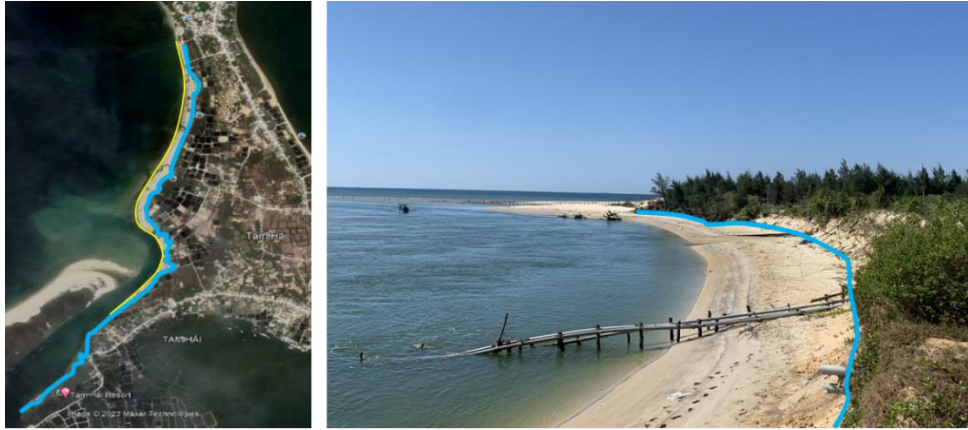


Hình 3.15. Xác định đường bờ trong (màu xanh) trên Google Earth và thực tế tại bờ cát (tháng 04/2022)

Dựa trên đồ thị phổ phản xạ ở Hình 3.16, có thể thấy lớp bờ biển có đặc trưng phản xạ lớn hơn và tách biệt rõ rệt so với các đối tượng khác trong hầu hết các kênh phổ đặc biệt ở vùng khả kiến. Chính vì vậy, ảnh UAV và ảnh từ GE chỉ tập trung ở vùng ánh sáng khả kiến vẫn có thể cung cấp được thông tin nhận dạng phân tách bờ biển với các đối tượng khác. Ở các dải khả kiến (496.6nm, 560nm, 664.5nm), giá trị phản xạ của bãi biển tương đối cao và nằm trên lớp thực vật và nước, nhưng đồ thị tương đối tương đồng với khu vực đất trồng.



Hình 3.16. Phổ phản xạ ở các kênh ảnh và chỉ số của các đối tượng lớp phủ trên ảnh Sentinel 2 (tháng 6-7/2023)



Hình 3.17. Xác định đường bờ trong (màu xanh) trên Google Earth và thực tế tại khu vực bờ vũng vịnh (tháng 04/2022)

Nhóm dấu hiệu xói lở đụn cát do bão bao gồm các chỉ thị như vách xói cát tại chân đụn, vết xói đứng trên sườn đụn và dải tích tụ vật liệu sạt lở, phản ánh phản ứng tức thời của hệ đụn trước các sự kiện năng lượng cao. Các chỉ thị này có giá trị quan trọng trong kiểm chứng mức độ tổn thương và diễn giải cơ chế biến động, nhưng không được lựa chọn làm ranh giới chính thức của đường bờ trong do tính biến động mạnh và khả năng biến mất nhanh sau bão.

Bờ cát cao ở thành phố Đà Nẵng còn phân bố ở bờ lồm của vùng cửa sông, chỉ thị là mép ngoài của dải thực vật bao quanh lòng vịnh. Thực vật ở đây gồm rừng dương, cỏ biển hoặc cây bụi, mọc ổn định theo rìa đường cong của vịnh hoặc đầm phá. Trên ảnh vệ tinh, chúng hiện rõ dưới dạng mảng xanh hình cánh cung hoặc vành đai liên mạch, dễ xác định và số hóa (Hình 3.17).

Trong thực tế tại thành phố Đà Nẵng, chân đụn cát và mép ngoài dải thực vật đụn cát là hai chỉ thị được ưu tiên sử dụng nhất để xác định đường bờ trong tại các đoạn bờ cát cao, nhờ khả năng nhận dạng rõ ràng trên ảnh viễn thám và tính ổn định tương đối trong chuỗi ảnh đa thời gian. Các chỉ thị xói lở do bão được sử dụng bổ trợ nhằm kiểm tra tính hợp lý của đường bờ trích xuất và phục vụ phân tích động lực biến động trong các giai đoạn cực đoan.

Như vậy, đối với kiểu bờ cát cao – đụn cát ven biển, bộ chỉ thị không chỉ cho phép xác định đường bờ trong một cách nhất quán và có cơ sở hình thái – sinh học rõ ràng, mà còn tạo nền tảng để tích hợp các thông tin về xói lở, phục hồi và bất định trong các phân tích tiếp theo bằng viễn thám và mô hình học máy.

3.3.2.2. Kiểu bờ cát thấp – cửa sông, bãi bồi ven biển

Kiểu bờ cát thấp phân bố tại các đoạn ven biển chịu ảnh hưởng trực tiếp của cửa sông và các bãi bồi thấp ven biển, đặc trưng bởi cao độ địa hình nhỏ, trầm tích mịn, và biến động mạnh theo chế độ triều, dòng chảy sông và mùa mưa lũ. Trong bối cảnh hình thái – động lực như vậy, các ranh giới hình thái thuần túy và các chỉ

thị thủy động lực tức thời thường không ổn định, khó duy trì vị trí nhất quán trong chuỗi ảnh đa thời gian. Do đó, trong luận án này, đường bờ trong tại kiểu bờ cát thấp được xác định chủ yếu dựa trên các chỉ thị sinh học ổn định, phản ánh giới hạn tác động lặp lại của biển trong trung và dài hạn.

Tại phía nam cửa sông Thu Bồn, khu vực Duy Hải – Duy Nghĩa, bờ biển có xu thế bồi tụ mạnh và phân bố địa hình kiểu bờ cát thấp điển hình. Đường bờ trong được thể hiện rõ ràng bởi ranh giới thảm thực vật ổn định (Hình 3.18).

Các chỉ thị sinh học được ưu tiên sử dụng bao gồm ranh giới thảm thực vật ổn định phía biển, ranh giới thực vật đụn cát thấp và ranh giới rừng phòng hộ ven biển. Trong đó, ranh giới thảm thực vật ổn định phía biển được xem là chỉ thị trung tâm, do thể hiện rõ ranh giới giữa vùng bãi chịu tác động thường xuyên của sóng – triều và vùng bãi đã được cố định sinh học. Chỉ thị này ít chịu ảnh hưởng của dao động mực nước tức thời và có khả năng duy trì vị trí tương đối ổn định trong chuỗi ảnh dài hạn.



Hình 3.18. Bờ biển bồi tụ phía nam Cửa Đại trên Google Earth (ảnh trên) và hình thái bờ cát thấp với đường bờ trong - đường bờ ngoài trong tại Duy Nghĩa (ảnh Giang Tuấn Linh)

Các chỉ thị hình thái thấp và trầm tích, chẳng hạn như ranh giới bãi sau – sườn bãi hoặc các dấu hiệu bồi tụ cục bộ, chỉ được sử dụng với vai trò hỗ trợ và phân đoạn bờ, nhằm kiểm soát sai số trong các đoạn bờ có biến động phức tạp hoặc khi ranh giới sinh học bị gián đoạn cục bộ. Các chỉ thị này không được lựa chọn làm ranh giới chính thức của đường bờ trong do tính biến động cao và sự phụ thuộc mạnh vào điều kiện thủy động lực ngắn hạn.

Bên cạnh đó, các chỉ thị phản ánh suy giảm và phục hồi sinh học do bão, tiêu biểu như ranh giới rửa trôi thực vật và ranh giới phục hồi thực vật sau bão, được sử dụng để đánh giá mức độ tổn thương và khả năng phục hồi của bờ cát thấp, cũng như để diễn giải sự thay đổi tạm thời của đường bờ trong các giai đoạn cực đoan. Tuy nhiên, các chỉ thị này chỉ mang ý nghĩa kiểm chứng và không được sử dụng làm ranh giới xác định đường bờ trong.

Kiểu bờ cát thấp vùng cửa sông, nơi chịu ảnh hưởng đồng thời của dòng chảy sông và chế độ triều, chỉ thị xác định đường bờ trong là mép ngoài của dải thực vật bãi bồi, chủ yếu là các loài thực vật tiên phong như muống biển hoặc cây bụi thấp chịu mặn. Chỉ thị này thường nằm tại vị trí tiếp giáp giữa vùng bãi bồi có che phủ thực vật và vùng cát hoặc đất trống không có thực vật, phản ánh ranh giới ổn định tương đối của bờ trong điều kiện động lực tổng hợp sông – biển.

Trên ảnh viễn thám và ảnh Google Earth, mép ngoài dải thực vật bãi bồi thể hiện rõ dưới dạng các dải màu xanh liên tục, uốn lượn theo hướng dòng chảy cửa sông, cho phép nhận dạng tương đối thuận lợi trong điều kiện bình thường. Tuy nhiên, dưới tác động của sóng bão mạnh hoặc lũ lớn, thảm thực vật này có thể bị phá hủy hoặc xóa sổ tạm thời, dẫn đến sự gián đoạn của chỉ thị trong một số thời điểm quan trắc. Mặc dù vậy, nhờ khả năng tái sinh nhanh và xu hướng phục hồi tại đúng vị trí hình thái ban đầu, dải thực vật bãi bồi vẫn có thể được sử dụng làm chỉ thị đường bờ trong nếu kết hợp phân tích đa thời điểm trước và sau các sự kiện cực đoan.

Hình 3.19 minh họa quá trình xác định đường bờ trong (màu xanh) trên ảnh Google Earth và kiểm chứng ngoài thực địa tại khu vực bờ cửa sông (tháng 04/2022). Kết quả cho thấy, mặc dù thảm thực vật bãi bồi có thể biến động trong ngắn hạn, vị trí tổng thể của ranh giới sinh học ổn định vẫn duy trì tính nhất quán trong trung hạn, qua đó khẳng định tính phù hợp của chỉ thị này trong nhận dạng đường bờ trong tại các đoạn bờ cát thấp – cửa sông.



Hình 3.19. Xác định đường bờ trong (màu đỏ) trên ảnh UAV và thực tế tại khu vực bờ cửa sông (tháng 04/2022)

3.3.2.3. Kiểu bờ đá – mũi đá, vách đá

Kiểu bờ đá gồm các đoạn bờ biển có nền đá gốc lộ ra trực tiếp, bao gồm các mũi đá nhô ra biển, vách đá ven bờ và các sườn đá dốc, phân bố ở phía nam mũi Hải Vân, bán đảo Sơn Trà và một số mũi nhô ở khu vực Núi Thành. Đặc trưng cơ bản của kiểu bờ này là tính ổn định tương đối cao về vị trí đường bờ trong, song lại chịu tác động cục bộ của mài mòn sóng, phong hóa và trượt lở đá. Trong bối cảnh đó, việc xác định đường bờ trong cần ưu tiên các chỉ thị phản ánh ranh giới hình thái ổn định dài hạn, đồng thời nhận diện và loại trừ các dấu hiệu biến động ngắn hạn do sạt lở.

Bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong kiểu bờ đá tại thành phố Đà Nẵng được tổ chức thành ba nhóm chỉ thị chính, bao gồm: (i) ranh giới hình thái ổn định bờ đá (đường bờ trong); (ii) ranh giới sinh học ổn định trên nền đá (bổ trợ); và (iii) dấu hiệu sạt lở cục bộ bờ đá (kiểm chứng). Cách tổ chức này phản ánh sự phân biệt rõ ràng giữa các chỉ thị có giá trị xác định ranh giới dài hạn và các chỉ thị mang tính quá trình, phục vụ diễn giải và kiểm chứng.



Hình 3.20. Xác định đường bờ trong (màu xanh) trên Google Earth và thực tế tại bờ đá (tháng 04/2022)

Nhóm ranh giới hình thái ổn định bờ đá giữ vai trò trung tâm trong việc xác định đường bờ trong. Các chỉ thị tiêu biểu gồm chân vách đá ổn định, chân vách

đá ổn định có bãi tích tụ vật liệu sạt lở và ranh giới chuyển tiếp nền đá – bề mặt phủ ổn định. Đây là các chỉ thị phản ánh vị trí tiếp xúc ổn định giữa nền đá gốc và khu vực chịu tác động trực tiếp của sóng. Trên ảnh viễn thám độ phân giải cao và ảnh UAV, chúng thường thể hiện bằng đường gãy địa hình rõ rệt, độ dốc lớn, bóng đổ sắc nét, kết hợp với sự thay đổi rõ ràng về kết cấu bề mặt. Ngoài thực địa, các chỉ thị này tương ứng với ranh giới chân vách có ít đá rơi mới và bề mặt tương đối ổn định theo thời gian. Tại bán đảo Sơn Trà và các khu vực có địa hình dốc cao, chỉ thị được đề xuất là rìa ngoài cùng của dải thực vật trên sườn đá hướng ra biển. Chỉ thị này nằm tại vị trí thực vật ngừng phát triển do điều kiện độ dốc hoặc muối biển, là ranh giới cuối cùng trước khi chuyển sang mặt đá trơ hoặc vực biển. Trên ảnh vệ tinh, ranh giới này có dạng dải màu xanh kết thúc đột ngột, tiếp giáp vùng xám hoặc đen. Ngoài thực địa, vị trí này ổn định nhiều năm, ít chịu ảnh hưởng của triều hoặc biến động hình thái, nên đặc biệt phù hợp để xác định đường bờ trong (Hình 3.20).

Nhóm ranh giới sinh học ổn định trên nền đá bao gồm các chỉ thị như mép ngoài dải thực vật sườn đá và ranh giới thực vật ổn định trên nền đá phong hóa, phản ánh giới hạn xâm nhập dài hạn của sóng biển lên sườn đá. Mặc dù thực vật phân bố thưa hơn so với bờ cát, song trong nhiều trường hợp, mép ngoài của dải thực vật trên nền đá lại thể hiện vị trí ổn định hơn so với các chỉ thị hình thái thuần túy, đặc biệt tại các sườn đá thoải hoặc mũi đá ít chịu tác động trực tiếp của sóng lớn. Do đó, nhóm chỉ thị này được sử dụng bổ trợ, nhằm tăng độ tin cậy trong xác định đường bờ trong tại các đoạn bờ đá phức tạp.

Nhóm dấu hiệu sạt lở cục bộ bờ đá bao gồm các chỉ thị như vách trượt lở đá, bãi tích tụ vật liệu sạt lở và vết nứt – tách khối trên sườn đá, phản ánh các quá trình mất ổn định cục bộ do phong hóa, mưa lớn hoặc tác động kết hợp của sóng và trọng lực, các chỉ thị này gặp khá phổ biến và điển hình ở tất cả các đoạn bờ đá (Hình 3.21). Các chỉ thị này có giá trị quan trọng trong đánh giá nguy cơ và diễn giải cơ chế biến động, nhưng không được sử dụng làm ranh giới chính thức của đường bờ trong do tính biến động cao và khả năng thay đổi nhanh sau các sự kiện cục bộ.

Trong thực tế tại thành phố Đà Nẵng, chân vách đá ổn định và chân vách đá ổn định có bãi tích tụ vật liệu sạt lở là hai chỉ thị được ưu tiên sử dụng để xác định đường bờ trong tại các đoạn bờ đá, nhờ khả năng nhận dạng rõ ràng trên ảnh viễn thám và tính ổn định tương đối trong chuỗi ảnh đa thời gian. Các chỉ thị sinh học và sạt lở chỉ được sử dụng bổ trợ nhằm kiểm tra tính hợp lý của đường bờ trích xuất và hỗ trợ phân tích rủi ro sạt lở ven biển.



Hình 3.21. Xác định đường bờ trong (màu đỏ) trên ảnh UAV và thực tế bờ đá tại mũi Nam Ô (tháng 04/2022)

3.3.2.4. Kiểu bờ nhân tạo – đô thị, cảng biển, du lịch

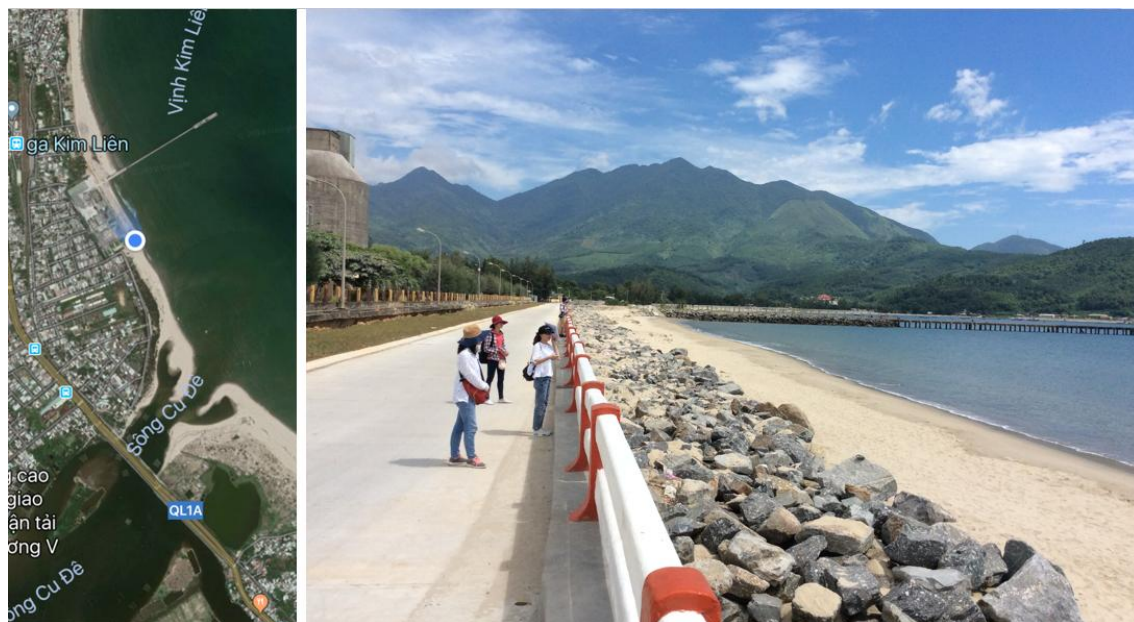
Kiểu bờ nhân tạo phân bố tại các đoạn ven biển chịu tác động trực tiếp và lâu dài của con người, bao gồm các khu vực đô thị ven biển, khu du lịch – nghỉ dưỡng và hệ thống cảng biển. Đặc trưng cơ bản của kiểu bờ này là sự hiện diện của các công trình bảo vệ bờ (kè, đê, tường chắn sóng, kè cảng), làm thay đổi đáng kể mối quan hệ tự nhiên giữa sóng, trầm tích và hình thái bờ. Trong bối cảnh đó, đường bờ trong không còn gắn với các ranh giới hình thái – sinh học tự nhiên thuần túy, mà được xác định chủ yếu bởi ranh giới công trình ổn định.

Đối với kiểu bờ nhân tạo tại thành phố Đà Nẵng, bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong được tổ chức thành hai nhóm chỉ thị chính, bao gồm: (i) ranh giới công trình bảo vệ bờ (đường bờ trong); và (ii) dấu hiệu tương tác công trình – tự nhiên (kiểm chứng). Cách tổ chức này phản ánh vai trò chi phối của công trình trong việc xác định vị trí đường bờ trong, đồng thời cho phép nhận diện các tác động thứ sinh của công trình đến hình thái và sinh thái bờ biển lân cận.

Nhóm ranh giới công trình bảo vệ bờ là nhóm chỉ thị trung tâm, bao gồm các chỉ thị như mép ngoài kè biển, mép ngoài kè cảng biển, mép ngoài kè dân sinh – du lịch và mép ngoài công trình bảo vệ bờ liên tục. Các chỉ thị này phản ánh ranh giới ổn định nhất giữa đất liền và biển trong điều kiện bờ đã bị nhân tạo hóa hoàn toàn. Trên ảnh viễn thám độ phân giải cao và ảnh UAV, chúng thể hiện rõ dưới dạng đường thẳng hoặc đường cong đều, biên sắc nét, kết cấu bề mặt đồng nhất, ít biến động trong chuỗi ảnh đa thời gian. Ngoài thực địa, các chỉ thị này tương ứng với mép tiếp xúc trực tiếp giữa công trình cứng và môi trường biển, thường có dấu hiệu sóng phản xạ rõ rệt.

Chỉ thị được lựa chọn là mép ngoài của công trình kè – tức là vị trí tiếp giáp giữa bờ kè nhân tạo và nền cát hoặc nước biển được thể hiện rõ ràng trên ảnh vệ tinh qua màu xám đậm, hình dạng thẳng hoặc khúc khuỷu tùy cấu trúc kè. Ngoài

thực địa, mép kè thường là bề mặt bê tông hoặc đá hộc cao khoảng 1–2 m so với mặt cát, có hình thái cố định, ít biến đổi theo thời gian. Khu vực Liên Chiểu (Đà Nẵng) là ví dụ tiêu biểu: trước năm 2018, đường bờ trong được xác định dựa vào dải thực vật (rừng phi lao), nhưng sau khi công trình kè được xây dựng nhằm ngăn xói lở, mép kè trở thành chỉ thị chính xác và bền vững hơn cho việc xác định đường bờ (Hình 3.22)



Hình 3.22. Xác định đường bờ trong (màu xanh) trên Google Earth và thực tế tại bờ kè (tháng 04/2022)

Nhóm dấu hiệu tương tác công trình – tự nhiên bao gồm các chỉ thị như dải xói lở chân kè, bãi tích tụ cục bộ phía trong hoặc phía ngoài kè, và ranh giới thực vật tái sinh sau kè. Các chỉ thị này phản ánh phản ứng của hệ bờ trước sự can thiệp của công trình, bao gồm cả tác động tích cực (ổn định cục bộ, phục hồi sinh học) và tiêu cực (xói lở chân kè, thiếu hụt trầm tích). Tuy nhiên, các chỉ thị này chỉ mang ý nghĩa kiểm chứng và diễn giải quá trình, không được sử dụng làm ranh giới chính thức để xác định đường bờ trong do tính biến động cao và phụ thuộc mạnh vào điều kiện động lực.

Trong thực tế tại thành phố Đà Nẵng, tại các đoạn bờ không còn bãi biển tự nhiên phía trước công trình, mép ngoài công trình bảo vệ bờ được xem là chỉ thị duy nhất hợp lệ để xác định đường bờ trong. Ngược lại, tại các đoạn bờ đô thị – du lịch vẫn duy trì bãi cát phía trước kè, chỉ thị công trình được sử dụng kết hợp với các chỉ thị sinh học hoặc hình thái bổ trợ nhằm kiểm tra tính hợp lý của đường bờ trích xuất và đánh giá ảnh hưởng lan truyền của công trình tới các đoạn bờ lân cận.

Như vậy, đối với kiểu bờ nhân tạo – đô thị, cảng biển và du lịch, bộ chỉ thị cho phép xác định rõ ranh giới đường bờ trong gắn với mức độ can thiệp của con

người, đồng thời tạo cơ sở để phân tích các tương tác công trình – tự nhiên và đánh giá hệ quả hình thái – sinh thái trong các nghiên cứu biến động bờ biển tiếp theo.

Tiểu kết Chương 3

Khung phương pháp nghiên cứu nhận dạng đường bờ trong và phân tích biến động bờ biển được xây dựng trên cơ sở tích hợp viễn thám độ phân giải cao, GIS và học máy theo hướng chuẩn hóa và có khả năng tái lập.

Quy trình nghiên cứu sử dụng dữ liệu đa nguồn gồm ảnh UAV, ảnh vệ tinh độ phân giải cao và ảnh Google Earth Pro, trong đó ảnh UAV được sử dụng để kiểm chứng và hiệu chỉnh hình thái bờ với độ chính xác cao.

Các mô hình học máy và học sâu được áp dụng nhằm nhận dạng tự động đường bờ trong từ ảnh viễn thám độ phân giải cao, tạo cơ sở cho việc đánh giá và lựa chọn mô hình phù hợp theo từng điều kiện dữ liệu và kiểu bờ.

Bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong được xây dựng trên cơ sở các kiểu bờ hình thái – vật chất đặc trưng gồm bờ cát cao, bờ cát thấp, bờ đá và bờ nhân tạo, đồng thời được đặt trong bối cảnh các kiểu vùng bờ đặc trưng của khu vực nghiên cứu. Hệ thống chỉ thị này góp phần chuẩn hóa dữ liệu đầu vào cho mô hình học máy và phản ánh phù hợp đặc điểm địa mạo – động lực của từng đoạn bờ.

Các nội dung phương pháp là cơ sở trực tiếp cho việc nhận dạng đường bờ và phân tích biến động bờ biển tại các khu vực nghiên cứu trọng điểm trong Chương 4.

CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ ỨNG DỤNG HỌC MÁY TRONG NHẬN DẠNG VÀ ĐÁNH GIÁ BIẾN ĐỘNG ĐƯỜNG BỜ PHỤC VỤ QUẢN LÝ BỜ BIỂN THÀNH PHỐ ĐÀ NẴNG

4.1. Lựa chọn mô hình học máy phục vụ nhận dạng đường bờ trong thành phố Đà Nẵng

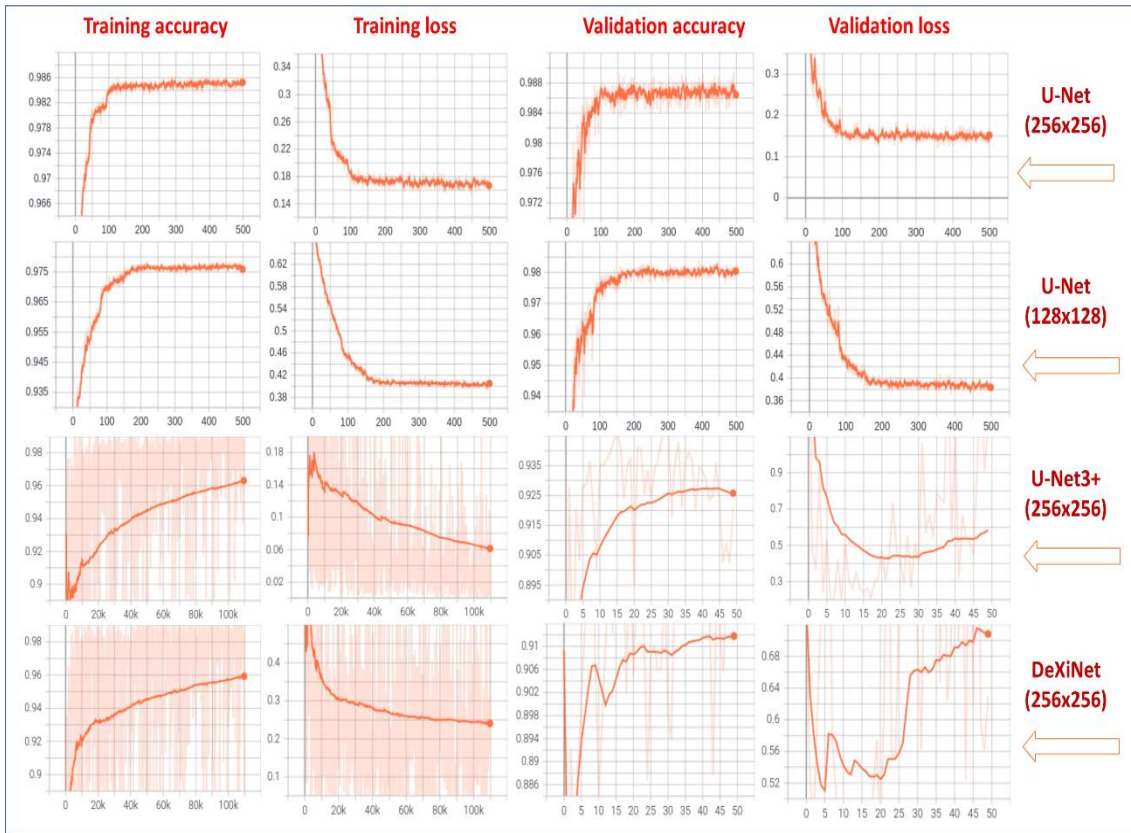
4.1.1. So sánh hiệu suất huấn luyện mô hình học máy theo kiến trúc mạng thần kinh nơ-ron

Dựa trên bốn kiến trúc mạng nơ-ron, tổng cộng tám mô hình đã được huấn luyện với hai kích thước đầu vào khác nhau: 128×128 và 256×256 . Mục tiêu là xác định kích thước đầu vào tối ưu cho việc phân đoạn đường bờ biển. Kết quả trình bày trong Bảng 4.1 cho thấy rằng kích thước đầu vào 256×256 cung cấp thêm thông tin không gian và thuộc tính hình thái, giúp mô hình phân biệt rõ hơn giữa đất liền, biển và bờ biển, đặc biệt rõ rệt ở các kiến trúc như U-Net, U-Net3+ và DexiNet. Việc tăng kích thước đầu vào lên 256×256 giúp cải thiện hiệu suất mô hình khoảng 10% so với kích thước 128×128 . Giữa hai mô hình U-Net, dù độ chính xác không có sự chênh lệch lớn, mô hình với kích thước 256×256 có giá trị hàm mất mát thấp nhất trong toàn bộ tám mô hình. Điều này cho thấy mức độ học các đặc trưng bờ biển với kích thước ảnh đầu vào lớn hiệu quả cao hơn. Ngược lại, kích thước đầu vào 128×128 lại phù hợp hơn với mô hình U^2Net khi độ chính xác đạt đến 92%; trong khi sử dụng kích thước 256×256 , mô hình này chỉ đạt độ chính xác 53%.

Bảng 4.1. Hiệu suất của tám mô hình đã được huấn luyện sử dụng bốn kiến trúc nơ-ron với hai kích thước đầu vào

Mô hình		U-Net		U-Net3+		U ² Net		DexiNet	
		128x128	256x256	128x128	256x256	128x128	256x256	128x128	256x256
Train	ACC	97%	98%	98%	98%	97%	53%	97%	96%
	Loss	0.40	0.16	0.05	0.03	0.01	0.28	0.39	0.21
Valida- tion	ACC	98%	98%	82%	92%	92%	53%	82%	93%
	Loss	0.37	0.16	3.65	0.58	0.66	0.29	2.10	0.79
Thời gian (phút)		812	786	3464	1847	820	692	1250.1	754

Kích thước mô hình (MB)	118.5	74.6	177.1	141.3
--------------------------------	-------	------	-------	-------



Hình 4.1. Độ chính xác và giá trị hàm mất mát trong quá trình huấn luyện của bốn mô hình nơ-ron tốt nhất để trích xuất đường bờ trong

Trong số tám mô hình được huấn luyện, năm mô hình đạt độ chính xác trên 90%, trong đó hai mô hình sử dụng kiến trúc U-Net đạt độ chính xác vượt trên 98% và hàm mất mát dưới 0,4. Năm trong sáu mô hình còn lại có giá trị hàm mất mát lớn hơn 0,5, cho thấy hiệu suất học không ổn định. Mô hình U²Net mặc dù có giá trị mất mát thấp, nhưng độ chính xác lại chỉ đạt 53%. Đặc biệt, khi sử dụng kích thước đầu vào 128×128 cho các kiến trúc U-Net3+ và DexiNed, giá trị hàm mất mát tăng đáng kể, vượt ngưỡng 2,0. Ngược lại, hai mô hình sử dụng cấu trúc U-Net duy trì giá trị hàm mất mát ở mức thấp, dao động từ 0,16 đến 0,38, phản ánh quá trình huấn luyện ổn định và hiệu quả hơn (Hình 4.1). Hình 4.1 chỉ minh họa một số mô hình tiêu biểu được lựa chọn từ Bảng 4.1, nhằm phục vụ so sánh trực quan giữa các kiến trúc. Mặc dù U²Net 256 đạt hiệu suất tương đương DexiNed 256, mô hình này không được đưa vào Hình 4.1 do có đặc điểm kiến trúc gần với nhóm U-Net; trong khi đó, DexiNed được lựa chọn để đảm bảo tính đa dạng về kiến trúc trong minh họa.

Thời gian huấn luyện và kích thước của mô hình chịu ảnh hưởng đáng kể bởi cấu hình phần cứng. Với kích thước đầu vào 256×256 , các mô hình sử dụng kiến trúc U-Net, U²Net và DexiNed yêu cầu khoảng 13 giờ để hoàn tất quá trình huấn luyện. Trong khi đó, các mô hình còn lại cần thời gian từ 21 đến 58 giờ. Mặc dù U²Net (256×256) có thời gian huấn luyện ngắn nhất, nhưng lại cho độ chính xác thấp nhất trong số các mô hình. Ngược lại, U-Net3+ là mô hình có kích thước tệp nhỏ nhất, song thời gian dự đoán lại chậm hơn so với các mô hình khác. Đáng chú ý, kiến trúc U-Net không chỉ có dung lượng trung bình và thời gian huấn luyện hợp lý mà còn đạt được độ chính xác cao nhất. Điều này cho thấy U-Net là một lựa chọn hiệu quả về cả thời gian huấn luyện lẫn hiệu suất dự đoán so với các kiến trúc khác.

4.1.2. So sánh hiệu suất huấn luyện mô hình học máy nơ-ron và mô hình truyền thống

Nghiên cứu so sánh hai mô hình phân loại truyền thống (RF và SVM) cùng với bốn mô hình học máy nơ-ron (U-Net và U-Net3+). Mỗi mô hình cũng được huấn luyện với hai kích thước ảnh đầu vào là 128×128 và 256×256 . Bảng 4.2 và 4.3 cho thấy rằng, so với các mô hình phân loại truyền thống, các mô hình học máy nơ-ron cung cấp chi tiết về không gian và thuộc tính lớn hơn ở khu vực bờ biển. Các mô hình truyền thống (RF và SVM) chỉ cung cấp thông tin chi tiết về từng pixel. Các phương pháp này chủ yếu dựa vào thông tin của từng pixel và các đặc điểm phổ tương ứng mà không xem xét đến mối quan hệ không gian hay các đặc điểm cục bộ trong vùng lân cận. Điều này làm hạn chế khả năng phân biệt các lớp có phổ tương tự hoặc có sự giao thoa trong dữ liệu phổ. Điều đó có thể dẫn đến nhầm lẫn giữa các lớp này, đặc biệt là khi dữ liệu bị nhiễu hoặc phân bố không đều.

Các mô hình nơ-ron được đào tạo để hiểu sự khác biệt giữa đất liền, biển và bờ biển. Điều này đặc biệt thể hiện rõ ở các mạng dựa trên kiến trúc U-Net và U-Net3+, với khả năng tái hiện chi tiết vùng bờ biển. Ngược lại, các mô hình dựa trên pixel như RF và SVM cho kết quả thấp hơn, với chỉ số Kappa lần lượt là 0,86 và 0,88, cùng với độ chính xác tổng thể tương ứng là 93,3% và 94,3%. Mặc dù RF có tỷ lệ lỗi bỏ sót ở lớp bờ biển thấp hơn (3,4%) so với SVM (5,2%), mô hình này lại mắc lỗi phân loại nhầm lớp này cao hơn (9,4% so với 6,1%). Điều này dẫn đến độ chính xác theo lớp dự đoán (User accuracy) của RF thấp hơn (90,6%) so với SVM (93,9%). Ngược lại, SVM cho kết quả ổn định hơn với độ chính xác theo lớp thực tế và độ chính xác theo lớp dự đoán ở cả hai lớp bờ biển và không bờ biển

đều vượt 93%. Trong khi đó, bốn mô hình mạng nơ-ron dựa trên kiến trúc hình chữ U đạt chỉ số Kappa vượt 0,95 và độ chính xác tổng thể trên 97%. Các mô hình này không chỉ tận dụng thông tin phổ, mà còn khai thác hiệu quả mối quan hệ không gian và cấu trúc xung quanh mỗi điểm ảnh. Nhờ đó, chúng có thể phân biệt tốt hơn các lớp có phổ tương tự như khu dân cư và đất trồng, hoặc các lớp có giao thoa phổ như thực vật và mặt nước. Đặc biệt, U-Net cho thấy khả năng học sâu về cả đặc trưng phổ và không gian chi tiết, giúp giảm thiểu đáng kể lỗi phân loại nhầm giữa các đối tượng.

Bảng 4.2. Giá trị chính xác của hai mô hình học máy dựa trên pixel được đào tạo

Độ chính xác	Random Forest		SVM	
	Bờ biển	Khác	Bờ biển	Khác
Lỗi bỏ sót	3,4	10,0	5,2	6,1
Lỗi phân loại nhầm	9,4	3,6	6,1	5,2
Độ chính xác theo lớp thực tế	96,6	90,0	94,8	93,9
Độ chính xác theo lớp dự đoán	90,6	96,4	93,9	94,8
Kappa	0,86		0,88	
Độ chính xác tổng thể	93,3		94,3	

Bảng 4.3. Giá trị chính xác của bốn mô hình nơ-ron dựa trên đối tượng được đào tạo

Độ chính xác	U-Net 128		U-Net 256		U-Net3+ 128		U-Net3+ 256	
	Bờ biển	Không bờ biển	Bờ biển	Không bờ biển	Bờ biển	Không bờ biển	Bờ biển	Không bờ biển
Lỗi bỏ sót	2,4	6,1	0,4	2,6	1,4	4,1	2,9	9,1
Lỗi phân loại nhầm	5,9	2,5	2,5	0,4	4,0	1,4	8,6	3,1
Độ chính xác theo lớp thực tế	97,6	93,9	99,6	97,5	98,6	95,9	97,1	90,9

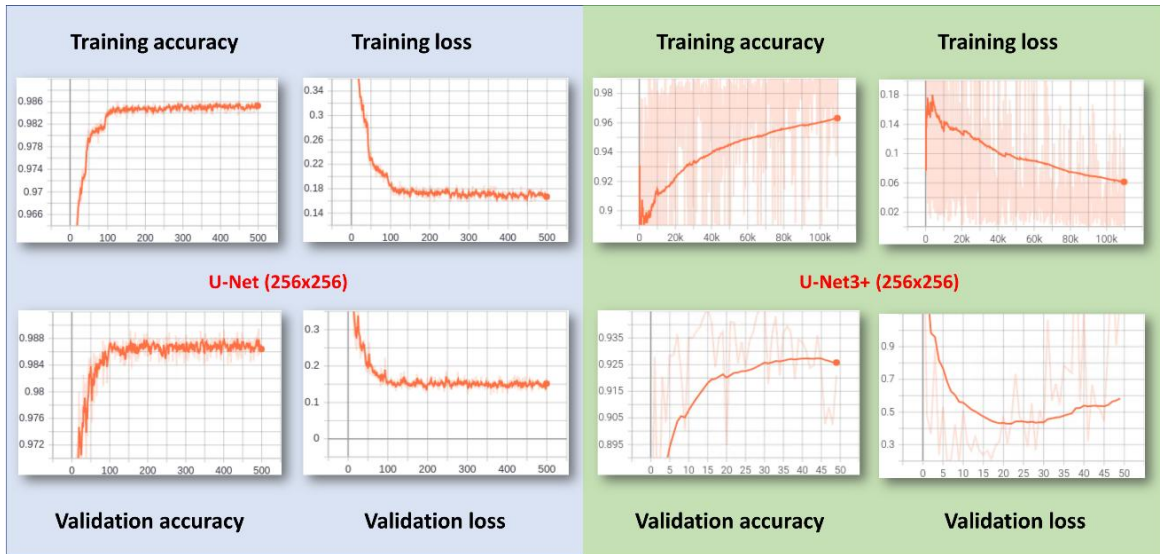
Độ chính xác theo lớp dự đoán	94,1	97,5	97,4	99,6	96,0	98,6	91,4	96,9
Kappa	0,91		0,97		0,94		0,88	
Độ chính xác tổng thể	95,7		98,5		97,3		94,0	

Về mô hình nơ-ron, tất cả các mô hình cấu trúc dựa trên U-Net đều có giá trị chính xác cao hơn 94%, đặc biệt là mô hình U-Net có kích thước đầu vào là 128x128 (U-Net 128) có độ chính xác cao hơn 98%. Tuy nhiên, cấu trúc U-Net3+ sử dụng kích thước đầu vào là 256x256 (U-Net3+ 256) cho kết quả có độ chính xác thấp, tương đương với các mô hình dựa trên pixel. Ngoài việc có kích thước mô hình nhỏ nhất, thời gian dự đoán của U-Net3+ còn dài hơn các mô hình khác do cấu trúc phức tạp hơn (theo Bảng 4.1 mục 4.1.1). Hai mô hình U-Net có độ chính xác tốt nhất trong khi có thời gian đào tạo và kích thước tệp ở mức trung bình (khoảng 13 giờ và 118 MB). Nó chứng tỏ rằng cấu trúc U-Net có thể được huấn luyện nhanh hơn và hiệu quả hơn so với các kiến trúc mạng khác.

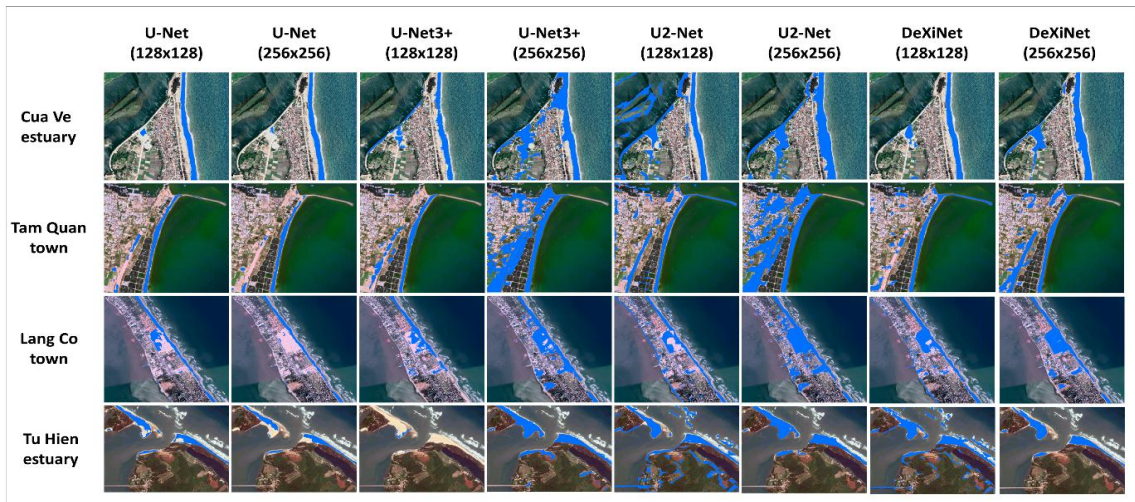
4.1.3. Lựa chọn mô hình học máy tối ưu cho nhận dạng đường bờ trong

Nội dung này sẽ tập trung đánh giá những mô hình có độ chính xác cao nhất được phân tích ở trên. Quá trình đánh giá xem xét tình trạng underfitting và overfitting trong suốt quá trình huấn luyện, đồng thời thử nghiệm với bộ dữ liệu mới để đảm bảo kết quả có độ tin cậy cao trước khi áp dụng cho khu vực trọng điểm. Cụ thể, hai mô hình học máy U-Net 256 và U-Net3+ 128 được huấn luyện trong 500 epoch với tổng thời gian hơn 13 giờ, đạt độ chính xác trên 97%. Trong suốt quá trình huấn luyện, các chỉ số hiệu suất như độ chính xác và hàm mất mát duy trì xu hướng hội tụ ổn định (Hình 4.2). Tuy nhiên, mô hình U-Net3+ bắt đầu xuất hiện hiện tượng dao động bất thường sau khoảng 50 epoch, đặc biệt rõ rệt sau 100.000 bước huấn luyện kéo dài trong 30 giờ. Từ epoch thứ 45 trở đi, độ chính xác và giá trị mất mát có xu hướng giảm nhẹ, cho thấy dấu hiệu quá khớp (overfitting). Độ chính xác thực và giá trị mất mát cho thấy mô hình U-Net3+ đã bắt đầu bị quá khớp (overfitting) trong giai đoạn huấn luyện, dù quá trình hội tụ xảy ra sớm ở khoảng epoch thứ 40. Trong khi đó, mô hình DexiNed thể hiện sự dao động thiếu ổn định cả ở chỉ số độ chính xác và hàm mất mát. Các giá trị này cho thấy hiện tượng tăng vọt quá mức trong giai đoạn

đầu huấn luyện và chỉ bắt đầu hội tụ rõ ràng sau epoch thứ 40, phản ánh quá trình học chưa tối ưu ở các bước đầu tiên.



Hình 4.2. Sơ đồ sự biến động về độ chính xác và hàm mất mát trong thời gian huấn luyện của 2 mô hình U-Net và U-Net3+ với kích thước đầu vào là 256

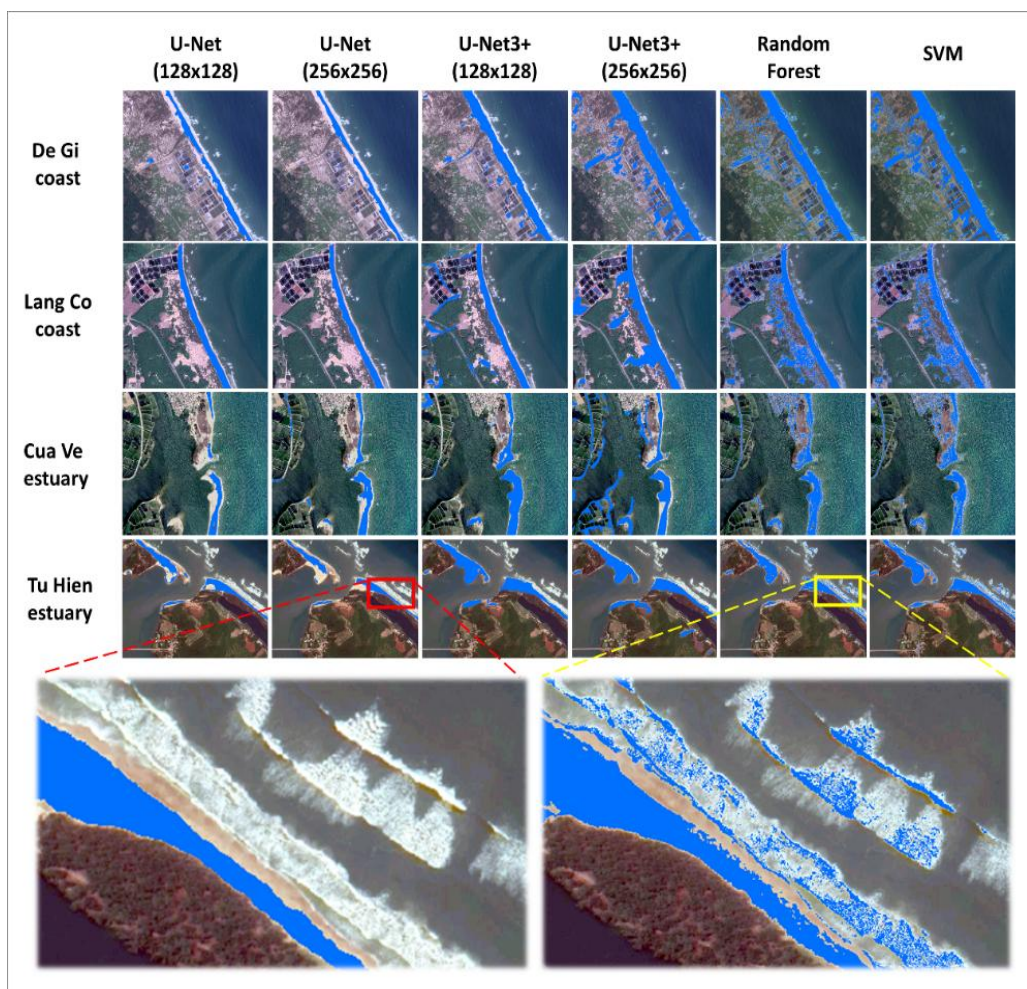


Hình 4.3. Bốn vùng giữa đường bờ biển trong và đường bờ biển ngoài được diễn giải dựa trên tám mô hình nơ-ron

Bốn ảnh mới được đưa vào thử nghiệm mô hình tại các khu vực cửa sông Cửa Vệ (Quảng Trị) và cửa Tư Hiền (Huế), cùng với hai bãi biển Tam Quan (Bình Định) và Lăng Cô (Huế), đã được sử dụng để kiểm tra hiệu suất của tám mô hình mạng nơ-ron sâu khác nhau (Hình 4.3).

Kết quả cho thấy, các mô hình U-Net3+ với kích thước đầu vào 256 (U-Net3+ 256) và hai biến thể của U²Net có khả năng nhận diện tương đối rõ ràng các vùng chuyển tiếp giữa khu vực bờ biển và các vùng đất trồng trong khu dân cư. Đặc biệt, mô hình U-Net3+ 256 thể hiện hiệu suất vượt trội trong việc phân tách ranh giới giữa

các loại hình lớp phủ. Ngược lại, các mô hình U²Net có kích thước đầu vào 256 (U²Net 256) và DexiNed có kích thước đầu vào 128 (DexiNed 128) gặp khó khăn trong việc phân biệt các khu vực bờ biển với những vùng có hiện tượng bọt biển, khiến kết quả dự báo bị sai lệch. Mặc dù hai mô hình DexiNed cho kết quả có phần cải thiện, nhưng vẫn có xu hướng nhầm lẫn vùng đất trống ven biển, đặc biệt tại khu vực cửa sông Cửa Vệ và thị trấn Lăng Cô. Trong khi đó, cả hai mô hình thuộc kiến trúc U-Net cho thấy khả năng phân biệt được các vùng có đụn cát và thảm thực vật thấp, thường khó nhận diện trong các loại ảnh viễn thám khác. Đáng chú ý, mô hình U-Net 256 cho kết quả chính xác hơn, với số lượng lỗi thấp hơn so với các mô hình còn lại.



Hình 4.4. Bốn vùng giữa đường bờ biển trong và đường bờ biển ngoài được diễn giải dựa trên sáu mô hình

Khi so sánh hiệu suất giữa các mô hình nơron và các phương pháp phân loại truyền thống, kết quả cho thấy các mô hình truyền thống như RF và SVM nhầm lẫn khu vực bãi biển (ranh giới giữa đường bờ trong và ngoài) với các khu vực đô thị trong đất liền, điển hình là các vùng có mái nhà sáng màu hoặc đất trống

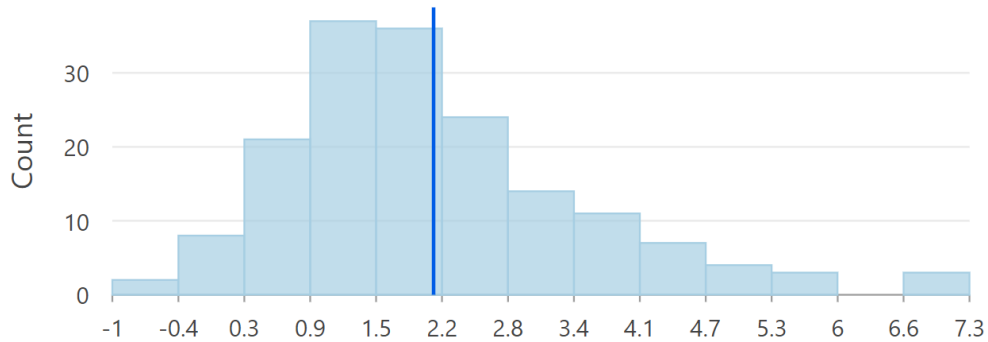
(Hình 4.4). Hiện tượng này thể hiện rõ rệt nhất trong kết quả của mô hình RF. Các vùng cát và bê tông sáng bị nhận nhầm là vùng bãi biển. Ngược lại, cả hai mô hình dựa trên kiến trúc U-Net thể hiện khả năng phân biệt rõ ràng vùng bờ biển, cũng như nhận diện chính xác các khu vực có thảm thực vật thấp – những đối tượng thường có độ phản xạ yếu và bị mờ trong ảnh (Hình 4.4 và Hình 4.5). Tuy vậy, mô hình U-Net3+ vẫn ghi nhận một số sai lệch nhỏ trong việc phân biệt ranh giới giữa khu vực ven biển và đất trống bên trong khu dân cư. Trong số các mô hình được thử nghiệm, mô hình U-Net 256×256 đạt hiệu quả cao nhất, với số lượng lỗi tối thiểu. Bên cạnh đó, khi đánh giá định lượng sai số không gian của đường bờ trích xuất từ mô hình U-Net 256×256 trên 200 điểm kiểm chứng cho thấy chỉ số RMSE đạt 2.53m. Phần lớn các điểm kiểm chứng có sai số tập trung trong khoảng từ 0.9m đến 2.8m, cho thấy độ ổn định cao của mô hình học sâu trong việc trích xuất đường bờ trong (Hình 4.6). Kết quả này khẳng định mô hình không chỉ nhận diện đúng đối tượng mà còn đảm bảo độ chính xác cao về vị trí hình học, đủ tin cậy. Vì vậy, mô hình này được chọn để giải đoán đường bờ thành phố Đà Nẵng trong 20 năm.



Hình 4.5. Kết quả giải đoán từ dữ liệu từ nguồn Google Earth Pro tại một số đoạn bờ tại Đà Nẵng của mô hình U-Net với kích thước ảnh đầu vào 256×256

Mô hình U-Net 256 được sử dụng để giải đoán hiệu quả đường bờ trong trên các ảnh UAV mới. Các ảnh đầu vào mới sau khi được tải về sẽ được mô hình nơ-ron giải đoán thông qua việc sử dụng các trọng số và tham số đã được huấn luyện trước đó. Bên cạnh đó, các ma trận đặc trưng không gian đã được học cũng được áp dụng để chuyển đổi ảnh đầu vào thành các raster biểu diễn không gian tương ứng, từ đó tạo ra hệ thống dữ liệu đường bờ trong hoàn chỉnh nhiều thời kỳ. Khi mô hình đã được xây dựng và huấn luyện đầy đủ, quá trình giải đoán các ảnh

mới không đòi hỏi thêm dữ liệu huấn luyện hoặc điem kiểm tra thực địa, nhờ vào khả năng khái quát hóa và tính tự động cao của mô hình.



Hình 4.6. Biểu đồ phân bố khoảng cách sai lệch giữa các điem kiểm chứng và đường bờ chiết xuất từ mô hình. (RMSE:2.5m)

Tiếp đó, công cụ DSAS (Digital Shoreline Analysis System) tích hợp trong phần mềm ArcGIS được áp dụng để phân tích và so sánh mức độ biến động của đường bờ trong tại khu vực thành phố Đà Nẵng, nhằm nhận diện rõ hơn các xu hướng thay đổi không gian xảy ra dọc theo dải bờ biển[118,160]. Nội dung các mục sau sẽ phân tích chi tiết biến động đường bờ các 3 khu vực trọng điem gồm: (i) khu vực Vịnh Đà Nẵng; (ii) khu vực Cửa Đại; và (iii) khu vực Núi Thành.

4.2 Xác định đường bờ và phân tích biến động bờ biển các khu vực trọng điem

4.2.1. Đánh giá biến động bờ biển khu vực Vịnh Đà Nẵng

4.2.1.1. Kết quả chiết xuất đường bờ bằng công nghệ học máy

Đường bờ trong của vịnh Đà Nẵng có dạng vòng cung đặc trưng, với điem nhô phía Bắc được che chắn bởi chân đèo Hải Vân và điem nhô phía Nam là khu đô thị lấn biển Đa Phước. Giữa hai mũi nhô này là một dải cát hẹp, bao gồm cửa sông Cu Đê và một con lạch nhỏ ở phía Bắc. Khu vực này có truyền thống đánh bắt cá lâu đời, tuy nhiên hiện đang gặp khó khăn do hiện tượng bồi lấp tại cửa sông, gây cản trở hoạt động ngư nghiệp. Đồng thời, tình trạng xói lở diễn ra thường xuyên ở vùng phía tây bắc, ảnh hưởng tiêu cực đến đời sống người dân và hoạt động du lịch. Về đặc điem địa hình, đoạn bờ biển này bao gồm bốn kiểu bờ điem hình: bờ cát, bờ đá, bờ kè và bờ cửa sông, phản ánh sự đa dạng và phức tạp trong cấu trúc địa mạo ven biển.

Một số kết quả giải đoán của mô hình U-Net 256 thể hiện trong Hình 4.7 cho thấy khả năng phân biệt hiệu quả giữa vùng đất liền (màu đỏ) và vùng biển (màu xanh) tại các khu vực ven biển khác nhau của vịnh Đà Nẵng. Tại khu vực có

bờ kè (1), ranh giới đường bờ được xác định rõ ràng dọc theo các công trình bê tông, cho thấy mô hình hoạt động tốt trong điều kiện bờ ổn định, có ranh giới nhân tạo rõ. Với khu vực cửa sông (2), kết quả phức tạp hơn do ảnh hưởng của quá trình xói lở và bồi tụ liên tục dẫn đến ranh giới thực vật không rõ ràng, nên có nhiều khu vực kết quả vẫn cần hiệu chỉnh lại bằng tay. Tại khu vực bờ đá (3), đường bờ trong và đường bờ ngoài trùng nhau, nên khu vực này mô hình giải đoán là thuộc phần đất liền, nên cần hiệu chỉnh thêm đường bờ ở khu vực này. Khu vực bờ cát (4) cho thấy đường bờ không bị lấn vào khu vực cát phía trong và khu vực có dải thực vật thưa. Có thể thấy, mô hình U-Net 256 cho kết quả tốt ở các khu vực có ranh giới rõ, tuy hiệu quả có thể giảm ở những vùng chuyển tiếp phức tạp như cửa sông, và vẫn cần hiệu chỉnh ở khu vực bờ đá.



Hình 4.7. Một số kết quả giải đoán bờ biển (màu xanh) và đất liền (màu đỏ) ở một số khu vực vịnh Đà Nẵng: 1) khu vực có bờ kè; 2) vùng cửa sông Cu Đê; 3) khu vực bờ đá; 4) khu vực bờ cát.

Nhằm xác định hiện trạng đường bờ biển khu vực này cho tới nay, nghiên cứu sử dụng các ảnh viễn thám độ phân giải cao từ năm 2002 đến năm 2023 có độ phân giải 0,7 m với mô hình học máy U-Net 256 để giải đoán đường bờ trong (Hình 4.8). Kết quả được chiết tách và đưa vào công cụ DSAS trong phần mềm ArcGIS để đánh giá biến động đường bờ trong của khu vực.



Hình 4.8. Đường bờ trong khu vực Vịnh Đà Nẵng được chiết tách từ năm 2002-2023 để đưa vào mô hình DSAS

4.2.1.2. Đánh giá kết quả DSAS trong phân tích biến động đường bờ

Để tính toán tốc độ biến động đường bờ khu vực bờ biển vịnh Đà Nẵng, nghiên cứu đã thiết lập được 893 lát cắt vuông góc với các đường bờ trong được tự động giải đoán ra từ mô hình U-Net-256. Khoảng cách giữa các đường là 20m, đây là khoảng cách đủ chi tiết để bắt được các biến động của đường bờ trong (mép thực vật, chân kè) mà không gây hiện tượng mất dữ liệu quá mức như các khoảng cách lớn (50-100m). Theo tiêu chuẩn của USGS thì khoảng cách mặt cắt thường được chọn lớn hơn từ 5 đến 10 lần sai số vị trí đường bờ. Trong nghiên cứu này, khoảng cách này đảm bảo tính độc lập thống kê do gấp khoảng 8 lần sai số thực nghiệm ($RMSE = 2.5m$). Do đó, đây là tỷ lệ tối ưu để đảm bảo các mặt cắt không bị chùng chéo về mặt không gian và dữ liệu giữa các mặt cắt mang tính độc lập, giúp các kiểm định thống kê (LSE, WSE) đạt độ tin cậy cao. Theo kết quả tính toán, trong khoảng 20 năm (từ 2002 đến 2023) phạm vi biến động đường bờ (giữa đường xa nhất và gần nhất) ở khu vực này đạt giá cực đại là 527m và chỗ biến động ít nhất là 0m.

Bảng 4.4. Bảng thống kê một số thông số cơ bản theo các phương pháp khác nhau giai đoạn 2002-2023

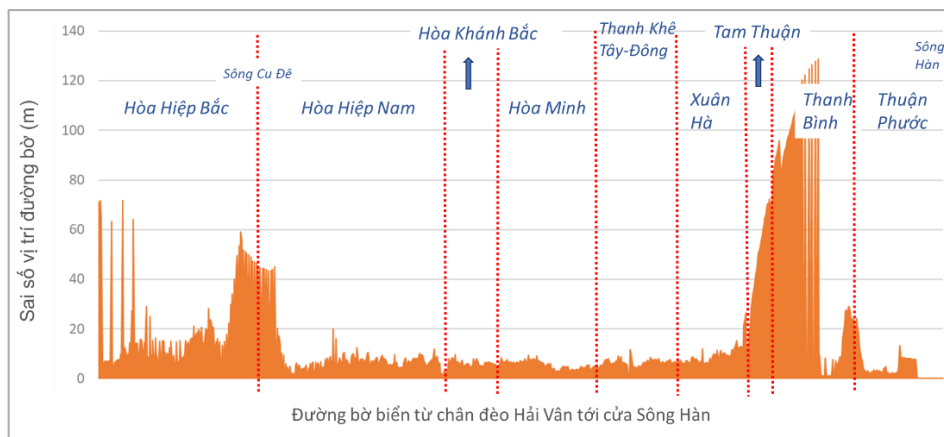
Chỉ tiêu	Giai đoạn 2002 - 2023			
	<i>SCE (m)</i>	<i>EPR (m/năm)</i>	<i>LRR (m/năm)</i>	<i>WLR (m/năm)</i>
Max	527,19	39.5	22,78	22,78
Min	0	-3.78	-3,43	-3,43
Median	28,06	0.12	0,24	0,24
Mean	61.05	1.73	1.78	1.78
% mặt cắt xói (tốc độ xói < -0.2m/năm)	-	31,8	16,57	16,57
% mặt cắt bồi (tốc độ bồi >0.5 m/năm)	-	32,92	36,95	36,95
% mặt cắt ít biến động (tốc độ từ -0,2 đến 0,5 m/năm)	-	35,28	46,47	46,47

Theo kết quả tính toán tại Bảng 4.4, phạm vi biến động lớn nhất của các đường bờ (SCE) trong khoảng thời gian từ 2002 đến 2023 có giá trị trung vị đạt 28m, cho thấy phần lớn đường bờ chỉ dao động trong phạm vi này trong suốt 20 năm. Kết quả của hai phương pháp LRR và WLR tương đồng nhau. Trong khi đó, thông qua tính toán biến đổi giữa vị trí đường bờ năm đầu và năm cuối, phương pháp EPR đưa ra giá trị biến động lớn hơn nhiều. Khi áp dụng phương pháp EPR, các khu vực được xác định xói lở mạnh nằm ở phía Nam sông Cu Đê. Khu vực phía Bắc có xu thế bồi tụ, đặc biệt là tại chân đèo Hải Vân (khoảng 16m/năm).

Theo kết quả phương pháp WLR và LRR (Bảng 4.4), tốc độ xói lở cực đại trong khu vực đạt hơn -3,4m/năm, trong khi quá trình bồi tụ mạnh nhất đạt khoảng hơn 22,7m/năm. Số mặt cắt có xu thế xói lở thấp hơn - 0,2m/năm là 148/893 mặt cắt, chiếm 16,5%. Số mặt cắt được cho là có xu thế bồi hơn 0,5m/năm là 330/893, chiếm 36,9%.

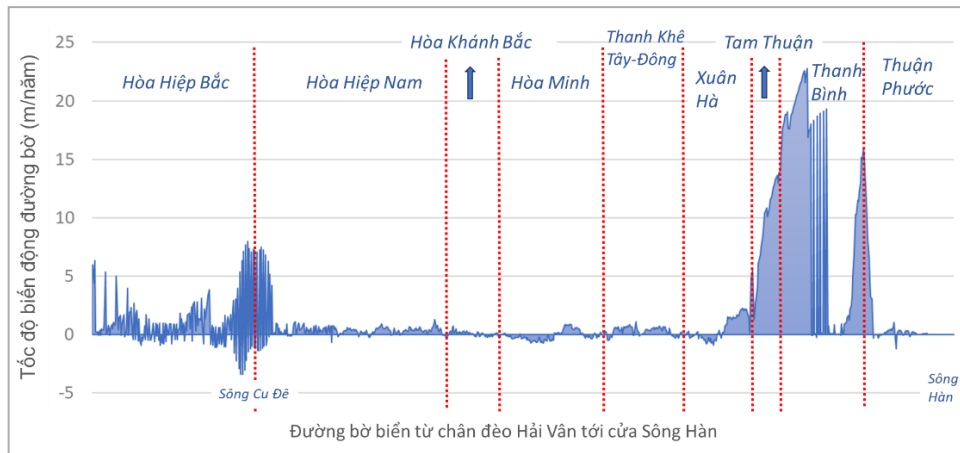


Hình 4.9. Biểu đồ biến động đường bờ trong theo phương pháp LRR (đơn vị: m/năm)

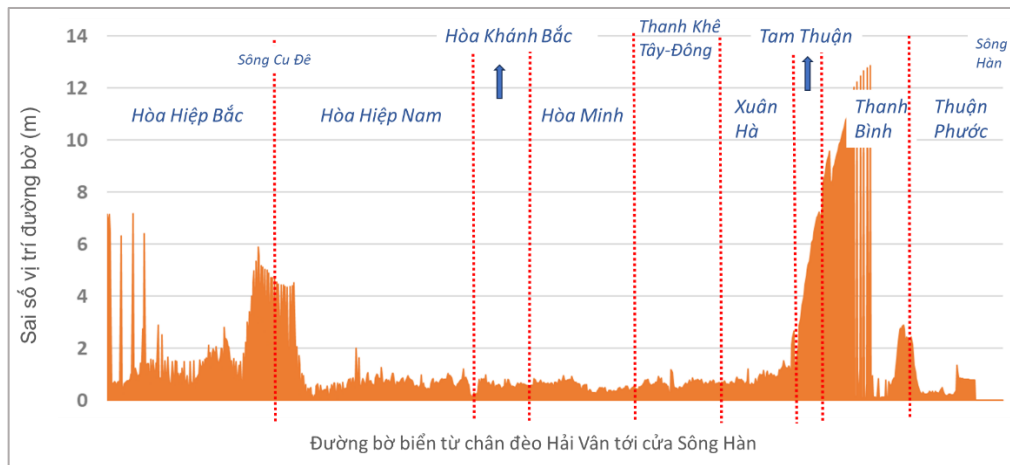


Hình 4.10. Biểu đồ đánh giá sai số của phương pháp LRR (đơn vị: m)

Theo kết quả của LRR và WLR (Hình 4.9 và Hình 4.11), khu vực xói lở mạnh có thể kể đến là dải ven biển phía Nam sông Cu Đê (khoảng 1m/năm) và tại phía Nam chân đèo Hải Vân (khoảng 0,5m/năm). Khu vực cửa sông luôn là nơi biến động mạnh nhất do sự tranh chấp giữa dòng chảy sông và sóng biển. Các khu vực bồi tụ mạnh quan sát thấy rõ tại khu vực phía Bắc cửa sông Cu Đê (từ 0,2-7m). Sự biến động không ổn định (năm bồi, năm lở) khiến mô hình hồi quy khó bắt kịp xu hướng, dẫn đến cả tốc độ biến động và sai số đều cao. Đây là khu vực biến động tự nhiên mạnh. Đoạn bờ biển từ Hòa Hiệp Nam đến Xuân Hà là đoạn bờ biển ổn định nhất của Vịnh Đà Nẵng. Kết quả tính toán tại đây có thể dùng làm cơ sở vững chắc cho quy hoạch hạ tầng. Khu vực bồi tụ mạnh nhất nằm ở phường Thanh Bình, nơi có đô thị Đa Phước phát triển lên tới khoảng trên 20m/năm. Việc con người đổ đất lấn biển khiến đường bờ dịch chuyển ra ngoài một khoảng cách lớn trong thời gian ngắn. Vì đây là biến động "đột ngột" chứ không phải biến động tuyến tính do đó tạo ra sai số cực lớn.



Hình 4.11. Biểu đồ biến động đường bờ trong theo phương pháp WLR (đơn vị: m/năm)



Hình 4.12. Biểu đồ đánh giá sai số của phương pháp WLR (đơn vị: m)

Mặc dù các thuật toán LRR và WLR cho kết quả gần giống nhau về số liệu (Hình 4.9 và Hình 4.11), WLR được chọn là phương pháp tối ưu nhờ phản ánh được xu hướng biến động chính xác. WLR cho phép gán trọng số cho các mốc thời gian dựa trên độ tin cậy của dữ liệu, từ đó giảm ảnh hưởng của sai số và tăng độ ổn định của kết quả. Giá trị sai số bình phương có trọng số (WSE) của thuật toán WLR chỉ bằng khoảng 1/10 so với sai số tính toán từ thuật toán LRR. LSE lớn vì nó cộng dồn mọi sai số thô, còn WSE nhỏ vì nó đã được lọc trọng số dựa trên độ tin cậy của dữ liệu đầu vào (Hình 4.10 và Hình 4.12). Vì vậy, WLR là công cụ đáng tin cậy để phân tích biến động đường bờ tại khu vực nghiên cứu trong giai đoạn 2002–2023.

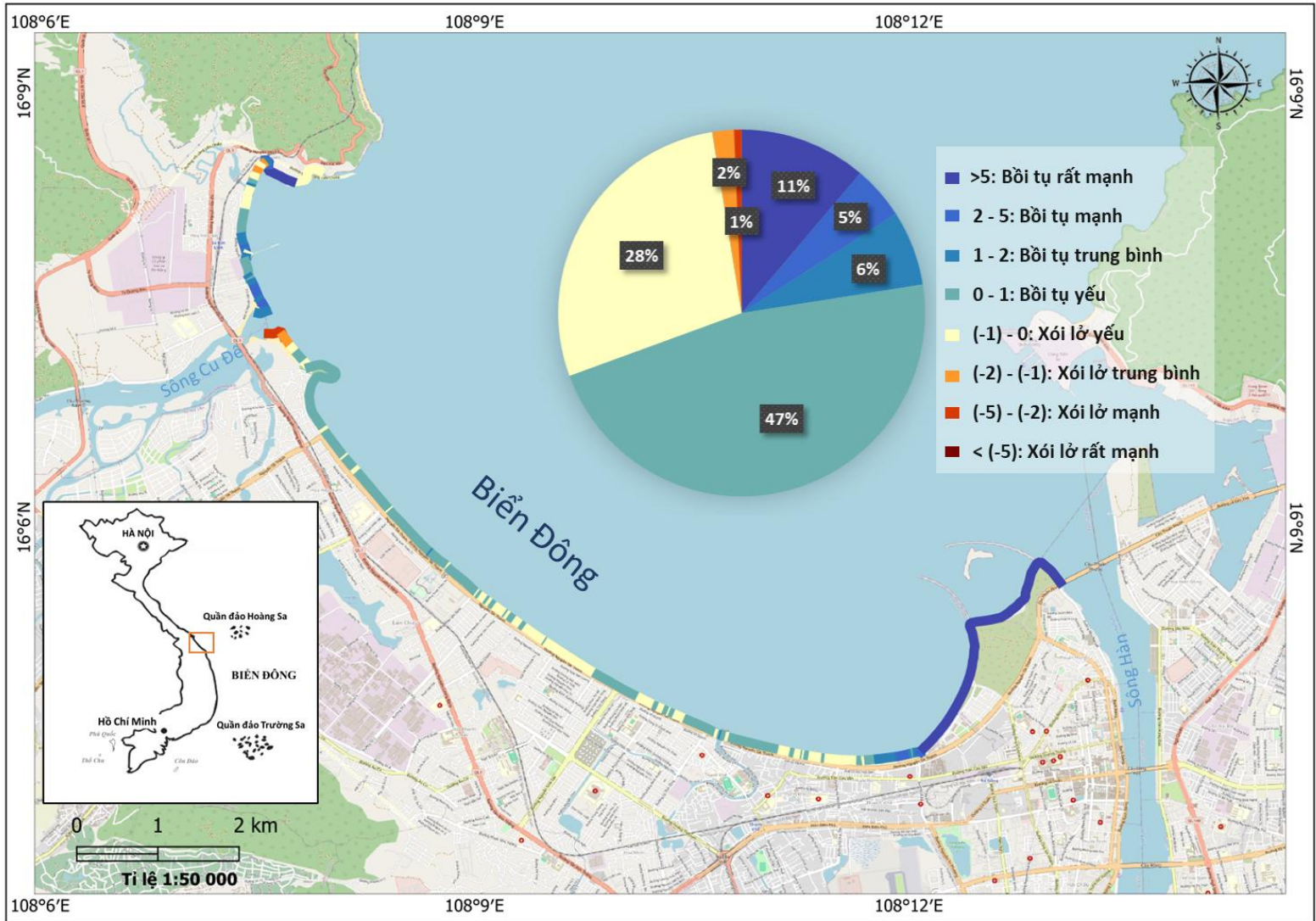
4.2.1.3. Đánh giá thực trạng biến động đường bờ trong

Trên cơ sở các kết quả tính toán về biến động đường bờ giai đoạn 2002 đến 2023, nghiên cứu đã tiến hành phân đoạn bờ theo các đặc trưng xói lở/bồi tụ khác nhau. Theo đó, bờ biển khu vực có 7 nhóm nguy cơ khác nhau theo bảng phân loại

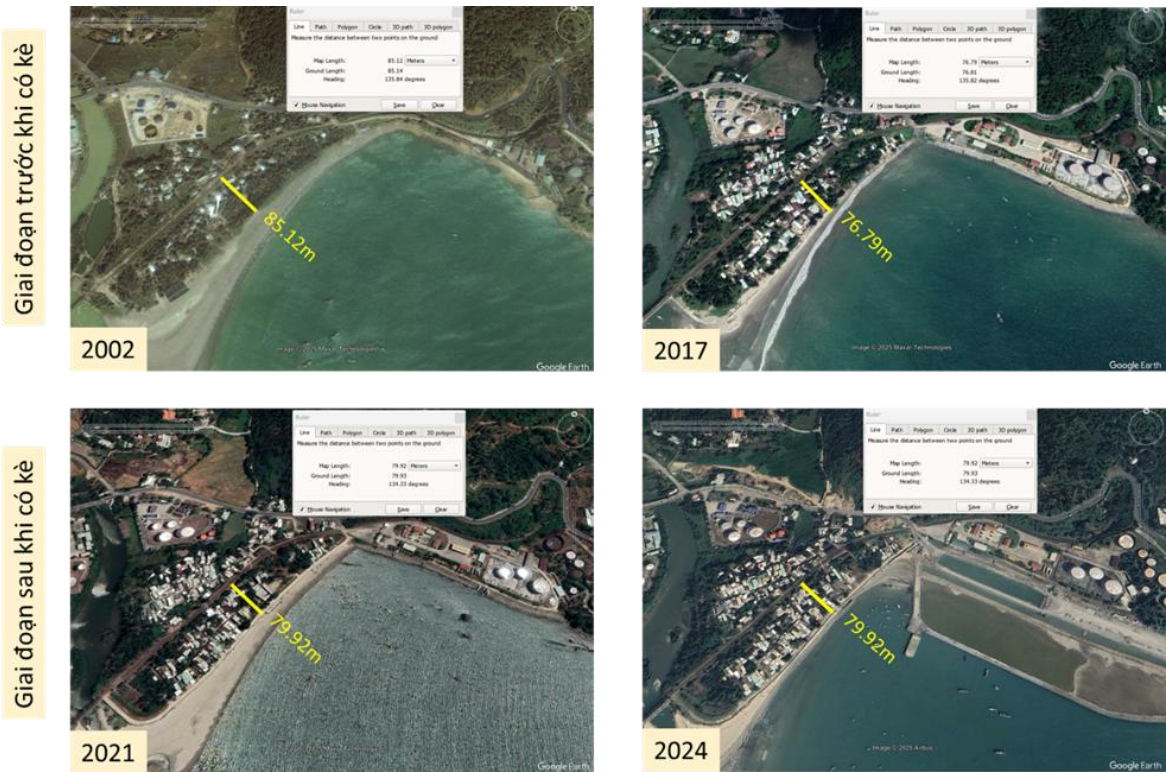
8 nhóm nguy cơ từ bồi tụ rất mạnh đến xói lở rất mạnh như trong hình 4.13. Theo đó, nhóm đoạn bờ bồi tụ yếu chiếm ưu thế 47%, tiếp đến là đoạn bờ xói lở yếu chiếm 28%; xói lở trung bình chiếm khoảng 2%; và bồi tụ trung bình chiếm 6%. Về cơ bản, bờ biển khu vực này tương đối ổn định, mặc dù một số đoạn chịu tác động bồi tụ cực mạnh (chiếm 11%), xói lở trung bình (chiếm 2%) và xói lở mạnh (chiếm 1%), điển hình là ở khu vực cửa sông Cu Đê có sự biến động mạnh cả xói lở và bồi tụ (hình 4.13).

Theo phương pháp tính toán WLR, khu vực xói lở bờ biển mạnh nhất là khu vực bờ biển phía Nam sông Cu Đê. Qua công tác khảo sát, người dân tại đây cho biết sóng biển khu vực này có thể đánh đến tận vách xói phía bên trong gần sát nhà dân vào mùa mưa bão. Họ cũng cho biết quá trình xói lở diễn ra mạnh hơn so với bồi tụ trong những năm gần đây.

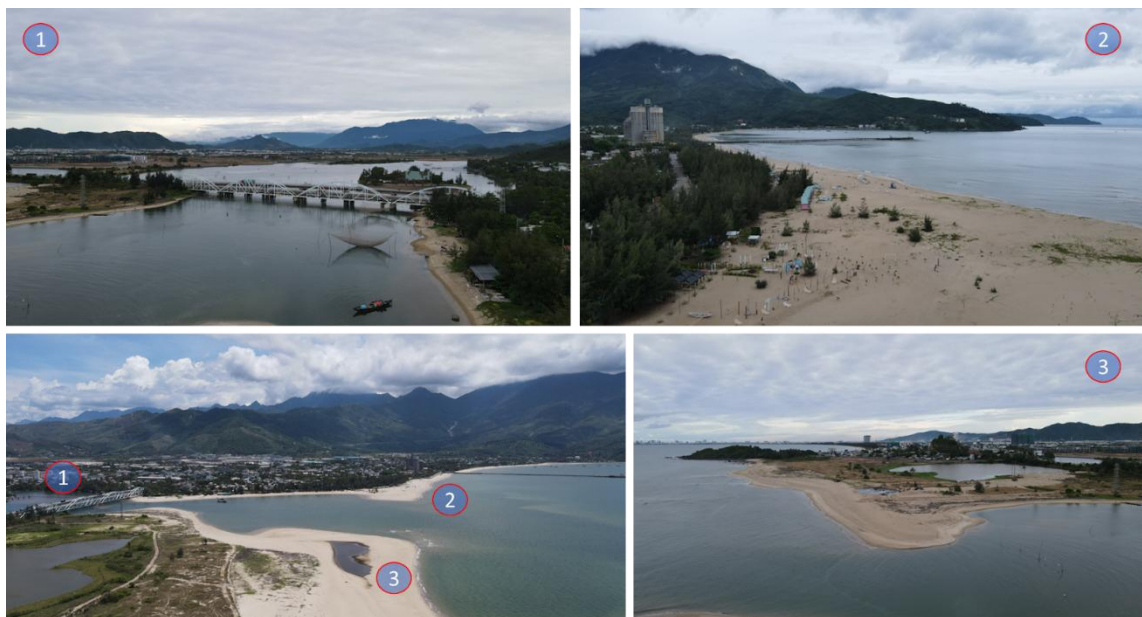
Xu thế xói lở cũng được xác định tại khu vực phía Nam chân đèo Hải Vân (đoạn kho xăng dầu). Tại khu vực phía Nam chân đèo Hải Vân trước năm 2018, đường bờ biển đã bị xói lở nghiêm trọng, làm thu hẹp diện tích bãi biển và rừng phi lao. Cụ thể, năm 2002 khoảng cách từ đường dân sinh đến đường bờ trong là 85m nhưng đến năm 2017 chỉ còn 76m. Điều này cho thấy bờ biển có xu hướng xói mạnh về phía đất liền (Hình 4.14). Do đó, năm 2018 chính quyền khu vực này đã xây dựng bờ kè cao khoảng 3m và đổ nhiều khối đá chân bờ kè để giảm năng lượng sóng. Sau khi hoàn thành bờ kè, hiện tượng xói lở không còn xảy ra nữa có thể thấy khoảng cách từ đường dân sinh tới bờ trong (bờ kè) ổn định.



Hình 4.13. Bản đồ biến động đường bờ trong khu vực Vịnh Đà Nẵng từ năm 2002 đến 2023



Hình 4.14. Ảnh số đo khoảng cách từ đường dân sinh đến đường bờ trong tại khu vực phía Nam chân đèo Hải Vân qua các giai đoạn trước khi xây kè và sau khi xây kè



Hình 4.15. Bờ cát cửa sông Cu Đê (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 06/2023)

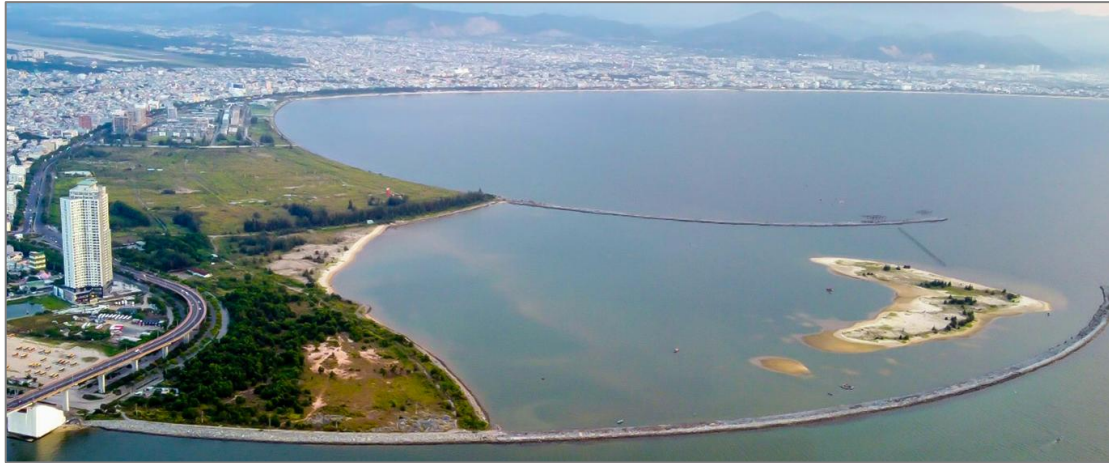
Xu thế bồi tụ chủ yếu được tìm thấy tại cửa sông Cu Đê và khu vực đô thị Đa Phước. Tại cửa sông Cu Đê, vào mùa khô, hai doi cát có thể gặp nhau, tạo thành một doi cát khổng lồ bồi lấp cửa sông, gây trở ngại cho người dân đánh bắt hải sản. Khi đó cửa sông bị bồi lấp với hàng trăm nghìn mét khối cát khiến chính quyền phải huy động tàu thuyền khai thông luồng lạch thường xuyên (Hình 4.15 và 4.16).

Mùa mưa, lượng nước sông lớn nên tình trạng bồi lấp giảm đi. Từ năm 2017, hoạt động nạo vét cửa sông Cu Đê được đề xuất nhằm làm thông thoáng luồng lạch, phát triển du lịch và kinh tế - xã hội. Tuy nhiên, vẫn đang trong giai đoạn nghiên cứu do lo ngại việc nạo vét có thể gây xâm thực, xói lở bờ biển khu vực Thủy Tú, ảnh hưởng đến cầu đường sắt, đường bộ. Thêm vào đó, UBND thành phố Đà Nẵng đã phê duyệt kế hoạch phát triển du lịch đường thủy nội địa, giúp người dân xóm chài ổn định đánh bắt cá.



Hình 4.16. Sinh kế người dân ven biển tại vùng cửa sông Cu Đê (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 04/2022)

Tương đồng giữa thực tế và kết quả phân tích, khu vực bờ biển khu đô thị Đa Phước cho thấy rõ ràng quá trình lấn biển quy mô lớn tại đây (Hình 4.17). Bờ biển dọc đường Nguyễn Tất Thành có xu thế ổn định với sự cân bằng giữa tác động nhân sinh và tự nhiên, khu đô thị Đa Phước đại diện cho sự can thiệp mạnh mẽ của con người vào không gian ven biển, nhằm phục vụ phát triển đô thị, hạ tầng và du lịch. Địa hình bờ biển tại đây chủ yếu là bờ nhân tạo, được gia cố bằng hệ thống kè cứng và các công trình hạ tầng kỹ thuật ven bờ. Quá trình lấn biển đã làm biến đổi đáng kể hình thái đường bờ, tạo nên xu hướng bồi tụ nhân tạo rõ rệt với tốc độ cao, có nơi lên đến 22 m/năm. Khu vực này có đặc điểm sóng và dòng chảy ven bờ phức tạp, chịu ảnh hưởng bởi cả yếu tố tự nhiên (như gió mùa, thủy triều) và hoạt động nhân sinh (san lấp, xây dựng). Do đó, bờ biển Đa Phước cần được theo dõi chặt chẽ để đảm bảo phát triển bền vững và hạn chế rủi ro xói lở trong tương lai.



Hình 4.17. Dự án khu đô thị quốc tế Đa Phước (Nguồn: <https://vnexpress.net>)

Để ứng phó hiệu quả với hiện tượng xói lở – bồi tụ tại vịnh Đà Nẵng, cần triển khai đồng bộ nhiều giải pháp. Trước hết, tại các khu vực bị xói lở nghiêm trọng như phía Nam sông Cu Đê và chân đèo Hải Vân, cần xây dựng và gia cố hệ thống kè bảo vệ kết hợp với các giải pháp sinh thái như trồng cây chắn sóng nhằm giảm thiểu tác động của sóng gió và ổn định đường bờ. Đồng thời, việc nạo vét cửa sông Cu Đê cần được thực hiện có kiểm soát để duy trì luồng lạch phục vụ sinh kế người dân, nhưng phải cân nhắc kỹ tác động đến môi trường và nguy cơ xâm thực các khu vực lân cận. Đối với khu đô thị Đa Phước, các nhà quản lý cần tăng cường giám sát quá trình lấn biển để đảm bảo tuân thủ quy hoạch và không làm gián đoạn dòng chảy ven bờ tự nhiên. Ngoài ra, việc ứng dụng công nghệ viễn thám và mô hình mạng nơ-ron như U-Net nên được phát triển nhằm nâng cao hiệu quả quan trắc và dự báo diễn biến đường bờ. Cuối cùng, cần xây dựng một quy hoạch tổng thể cho toàn bộ vịnh dựa trên cơ sở khoa học và phân vùng động lực ven bờ, từ đó hướng tới mục tiêu phát triển bền vững, hài hòa giữa kinh tế - xã hội và bảo vệ tài nguyên bờ biển.

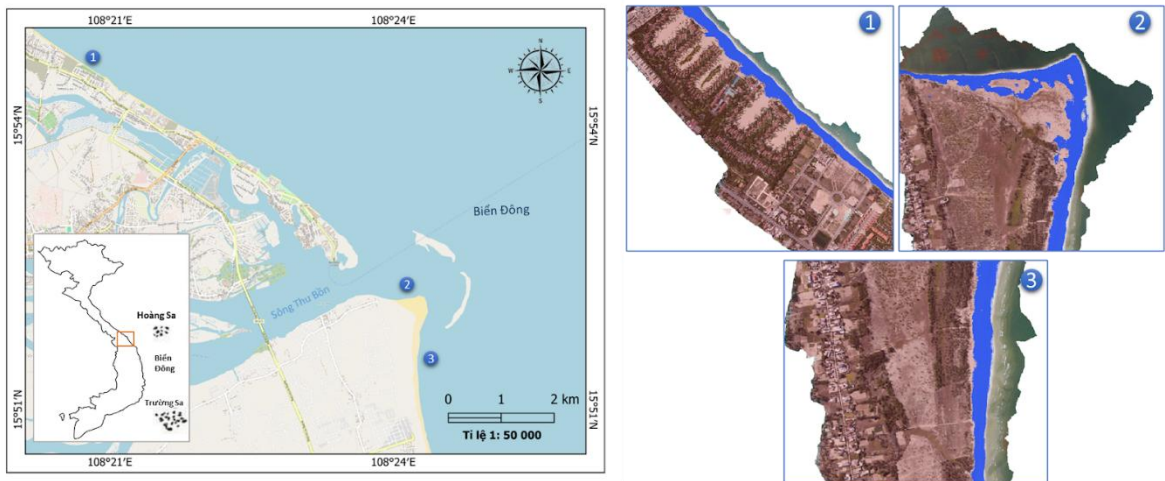
4.2.2. Đánh giá biến động khu vực Cửa Đại

4.2.2.1. Kết quả chiết xuất đường bờ bằng công nghệ học máy

Khu vực Cửa Đại nằm trong chuỗi đô thị ven biển vùng duyên hải Trung Bộ. Vị trí địa lý thuận lợi, giao thông phát triển và quan hệ liên vùng giúp kết nối với khu kinh tế Chân Mây - Lăng Cô (Thừa Thiên Huế) phía Bắc, khu kinh tế mở Chu Lai và khu công nghiệp Dung Quất phía Nam. Đây là cơ sở quan trọng để thiết lập và mở rộng liên kết kinh tế giữa các quận, huyện và các tỉnh/thành phố trong vùng. Tuy nhiên, khu vực này chịu ảnh hưởng của sóng bão và nước biển dâng. Theo công bố của Bộ Tài nguyên và Môi trường năm 2021, xu thế biến động mực nước biển khu vực thành phố Đà Nẵng giai đoạn 1978 - 2018 (dựa trên số

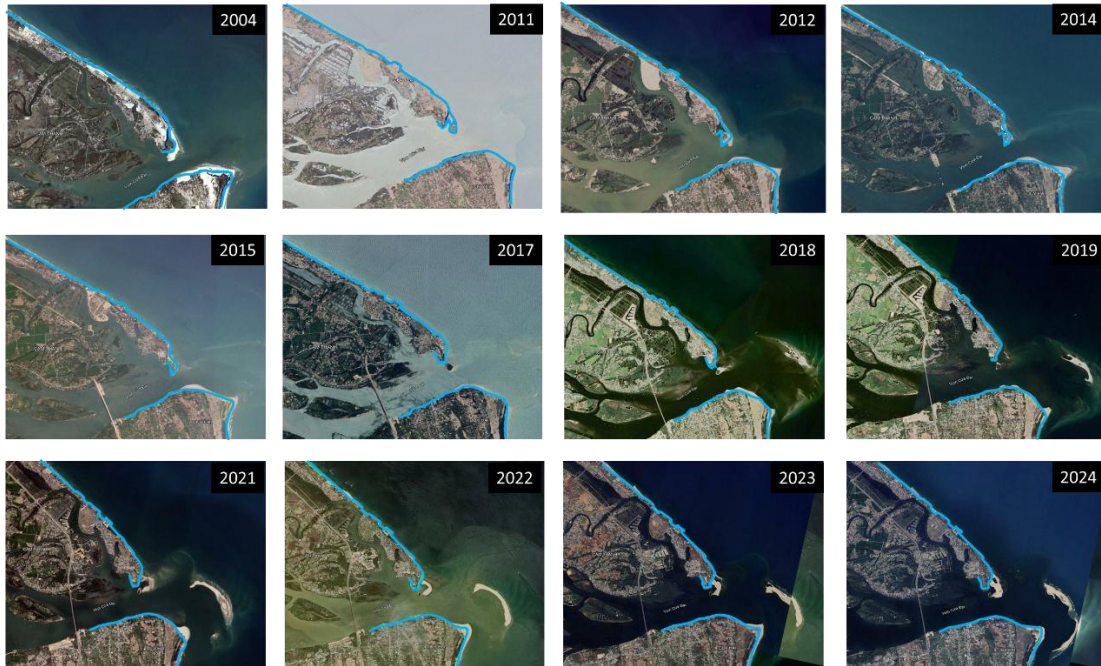
liệu thực đo của trạm hải văn Sơn Trà) có xu hướng tăng 2,6 mm/năm; trong khi số liệu thực đo về biến đổi độ cao sóng trung bình tại trạm hải văn Sơn Trà giai đoạn 1982 - 2018 là với tốc độ - 3,8 mm/năm.

Một số kết quả giải đoán của mô hình U-Net 256 thể hiện trong Hình 4.18 cho thấy khả năng phân biệt hiệu quả giữa vùng đất liền (màu đỏ) và vùng biển (màu xanh) tại các khu vực ven biển khác nhau của khu vực Cửa Đại. Tại vùng bờ có sự phát triển của các khu du lịch (1), đường bờ được xác định tương đối rõ ràng, không bị lẫn với các phần bãi cát bên trong khu du lịch. Mô hình thể hiện tốt ranh giới giữa bờ biển và đất trong khu vực có hạ tầng xây dựng. Ở vùng cửa sông (2), ranh giới bờ thể hiện sự phân tán và phức tạp hơn. Thảm thực vật ở khu vực cửa sông khá thưa và không đồng đều đã gây khó khăn của mô hình trong việc xử lý khu vực chuyển tiếp. Vì vậy khu vực này vẫn cần hiệu chỉnh lại sau giải đoán bằng mô hình. Với khu vực bờ cát (3), mô hình cho thấy đường bờ liên tục, và sát với thực tế địa hình thể hiện hiệu quả phân loại cao trong môi trường tự nhiên đồng nhất.



Hình 4.18. Một số kết quả giải đoán bờ biển (màu xanh) và đất liền (màu đỏ) ở một số khu vực Cửa Đại: 1) khu vực bờ biển có khu du lịch phát triển; 2) khu vực cửa sông; 3) khu vực bờ cát.

Nhằm xác định hiện trạng đường bờ biển khu vực này cho tới nay, nghiên cứu sử dụng các ảnh viễn thám độ phân giải cao và ảnh UAV từ năm 2004 đến năm 2024 có độ phân giải 0,7 m với mô hình học máy U-Net 256 để giải đoán đường bờ trong. Kết quả được chiết tách và đưa vào mô hình DSAS trong phần mềm ArcGIS để đánh giá biến động đường bờ trong của khu vực Cửa Đại (Hình 4.19).



Hình 4.19. Đường bờ trong khu vực Cửa Đại, Đà Nẵng được chiết tách từ năm 2004 đến 2024 để đưa vào mô hình DSAS

4.2.2.2. Đánh giá kết quả DSAS trong phân tích biến động đường bờ

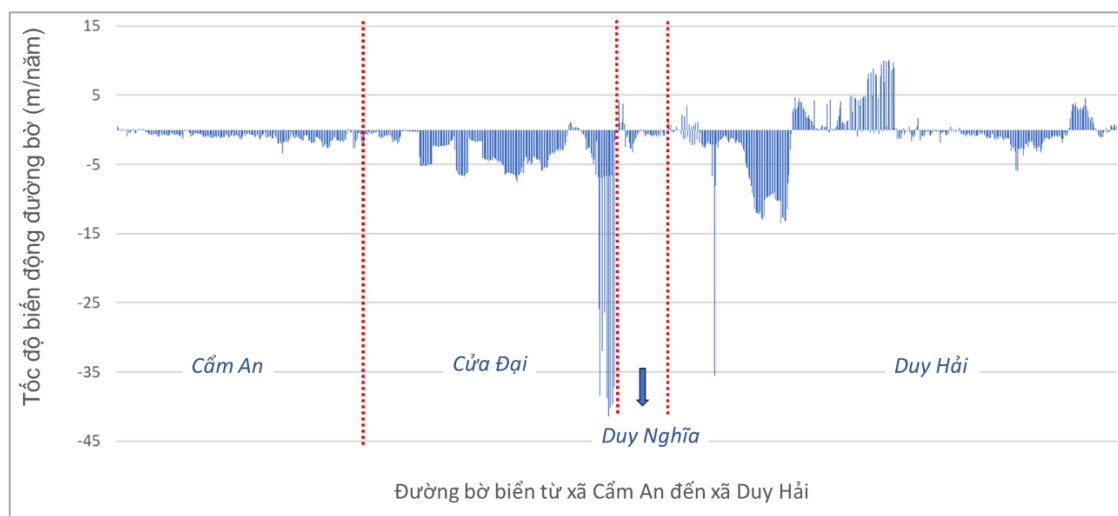
Để tính toán tốc độ biến động đường bờ theo các phương pháp như đã đề cập ở trên, tại khu vực Cửa Đại, nghiên cứu đã thiết lập được 868 lát cắt vuông góc với các đường bờ và đường cơ sở với khoảng cách giữa các đường là 20m. Theo kết quả tính toán thì trong khoảng 20 năm (từ 2004 đến 2024) phạm vi biến động đường bờ (giữa đường xa nhất và gần nhất) ở khu vực này đạt giá cực đại là 409.3m và chỗ biến động ít nhất là 0m. Theo cơ sở sử dụng phương pháp hồi quy tuyến tính, trọng số thường cho kết quả có độ tin cậy cao nhất. Vì vậy kết quả của phương pháp này được dùng để phân tích và đánh giá kết quả biến động đường bờ của từng khu vực.

Kết quả tính toán cho thấy, phạm vi biến động lớn nhất của các đường bờ trong khoảng thời gian từ 2004 đến 2024 có giá trị trung vị đạt 36.8m. Các kết quả của cả 3 phương pháp EPR, LRR và WLR về cơ bản khá tương đồng nhau. Theo kết quả phương pháp WLR thì tốc độ xói lở cực đại trong khu vực đạt khoảng -41.6m/năm, bồi tụ mạnh nhất đạt khoảng 33.2m/năm. Kết quả thống kê cho thấy, số mặt cắt có xu thế xói lở (tốc độ xói $> -0,2\text{m/năm}$) là 651/868 mặt cắt, chiếm 75%; số mặt cắt được cho là có xu thế bồi (tốc độ bồi $> 0,5\text{m/năm}$) là 146/868, chiếm 16,8% tổng số mặt cắt trong vùng nghiên cứu (Bảng 4.5).

Bảng 4.5. Bảng thống kê một số thông số cơ bản theo các phương pháp khác nhau, giai đoạn 2004-2024

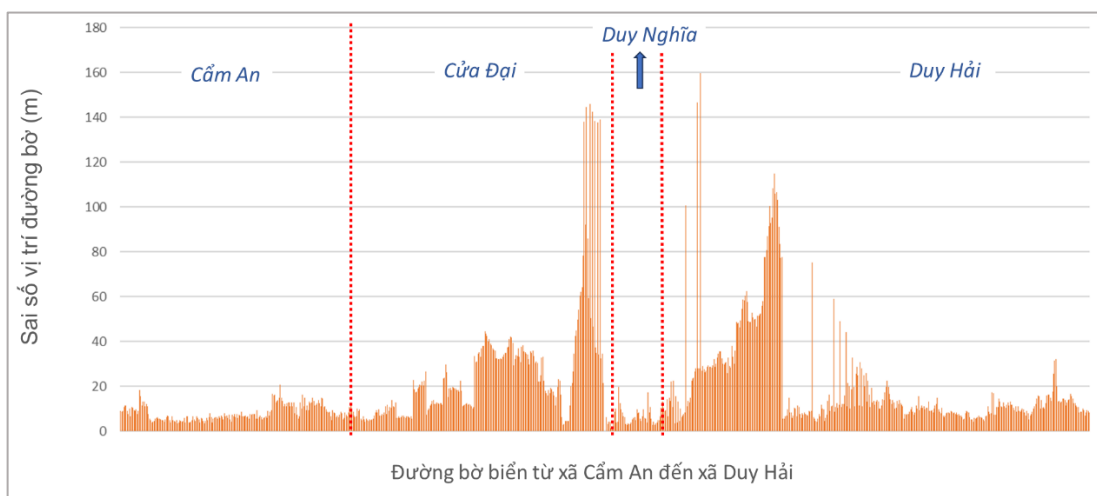
TT	Giai đoạn 2004 - 2024			
	<i>SCE</i> (m)	<i>EPR</i> (m/năm)	<i>LRR</i> (m/năm)	<i>WLR</i> (m/năm)
Max	409,3	10,92	10,11	33,21
Min	0	-41,42	-44,2	-41,66
Median	36,82	-0,84	-0,925	-1,185
Mean	71,53	-1,95	-1,76	-1,25
% mặt cắt xói (tốc độ xói < - 0.2m/năm)	-	72,93	75,81	75
% mặt cắt bồi (tốc độ bồi >0.5 m/năm)	-	15,55	12,67	16,82
% mặt cắt ít biến động (tốc độ từ - 0,2 đến 0,5 m/năm)	-	11,52	11,52	8,18

Với phương pháp tính toán LRR, biểu đồ cho thấy sự biến động mạnh (Hình 4.20). Khu vực biến động xói lở có thể kể đến là ở khu vực cửa Đại lên tới hơn 35m, và khu vực bờ biển thuộc xã Duy Hải (lên tới gần 15m). Các khu vực biến động bồi tụ chủ yếu nằm ở khu vực ven biển xã Duy Hải khoảng 5-7m. Khu vực sai số cao nhất là ở khu vực Cửa Đại và Duy Hải (hình 4.21).

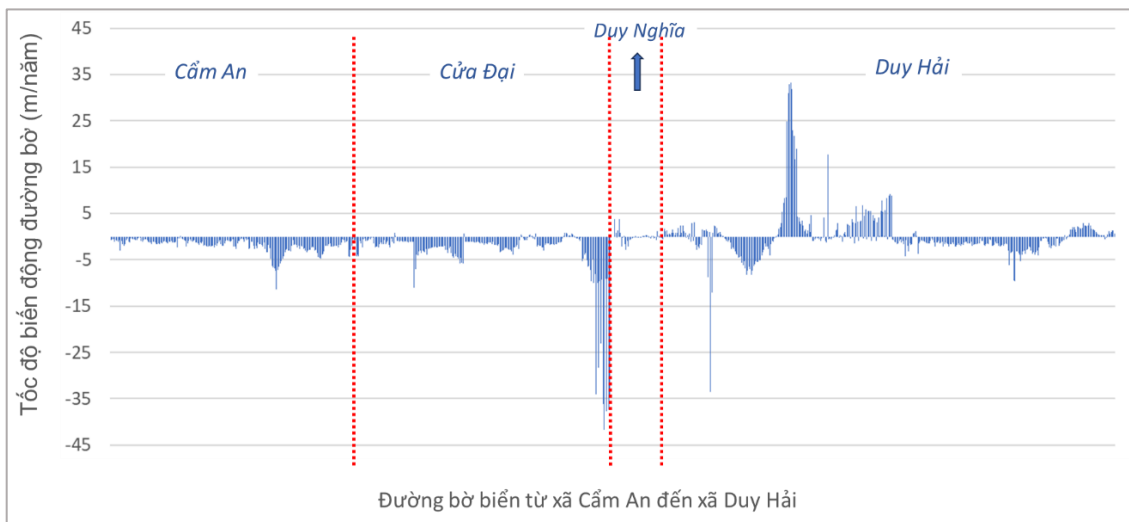


Hình 4.20. Xu thế biến động đường bờ giai đoạn 2004 - 2024 khu vực Cửa Đại theo phương pháp LRR (đơn vị: m/năm)

Phương pháp tính toán WLR là phương pháp hồi quy tuyến tính có trọng số, và biểu đồ dưới đây cho thấy khu vực có biến động bờ trong mạnh (Hình 4.22). Các khu vực biến động xói lở/ bồi tụ được tính bằng phương pháp này cũng có sự tương đồng với phương pháp LRR. Khu vực biến động xói lở lớn có thể kể đến là khu vực bờ biển thuộc xã Cửa Đại (hơn 35m), đặc biệt khu vực phía Nam Cửa Đại. Xói lở ở Cửa Đại không diễn ra tuyến tính. Nó có thể đứng yên trong vài năm nhờ hệ thống kè tạm, nhưng sau đó bị bật đi hàng chục mét chỉ trong một mùa biển động. Sự đứt gãy trong chuỗi dữ liệu này khiến mô hình WLR và LRR gặp sai số lớn. Bên cạnh đó, sự ổn định của WSE cho thấy quá trình xói lở ở Cẩm An diễn ra đều đặn qua các năm. Một số bãi biển thuộc xã Cẩm An và Duy Hải cũng xuất hiện xói mạnh trên 5m/năm.

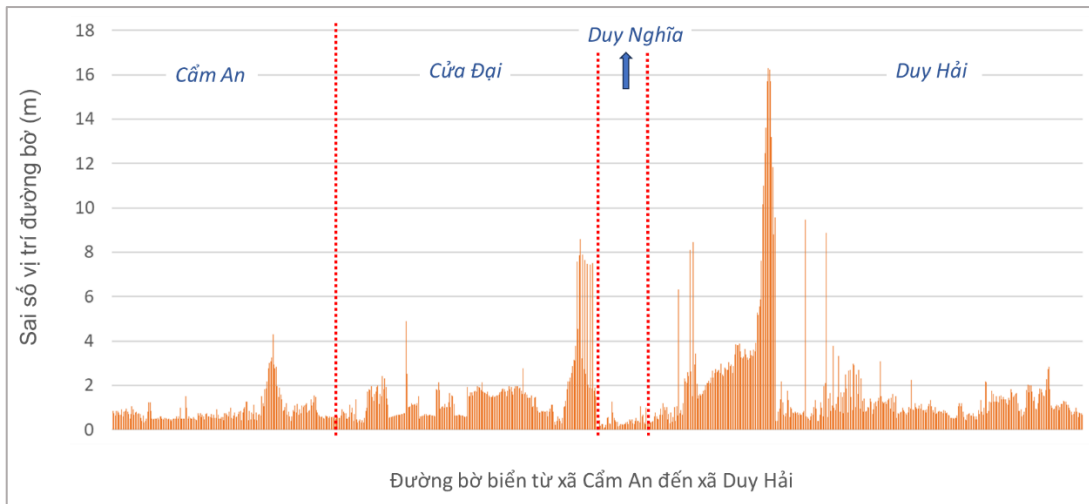


Hình 4.21. Biểu đồ phân bố sai số tính toán theo phương pháp LRR (sai số là LSE) cho giai đoạn 2004-2024 (đơn vị: m)



Hình 4.22. Xu thế biến động đường bờ giai đoạn 2004 - 2024 khu vực Cửa Đại theo phương pháp WLR (đơn vị m/năm).

Theo kết quả Bảng 4.5 thì có sự khác biệt rất lớn giữa giá trị xói lở ở trong phương pháp WLR so với 2 phương pháp còn lại. Điều này có thể lý giải là do khi gộp đường bờ tất cả các thể hệ vào tính toán, các đường bờ ở nhiều giai đoạn khác nhau, dữ liệu xác định đường bờ có độ chính xác khác nhau nên độ tin cậy rất khác nhau. Khi sử dụng phương pháp EPR thì kết quả chỉ thể hiện cho 2 đường bờ là năm 2004 và 2024, nên tốc độ không phản ánh đúng xu thế biến đổi rất mạnh của đoạn bờ biển Cửa Đại trong những năm gần đây.



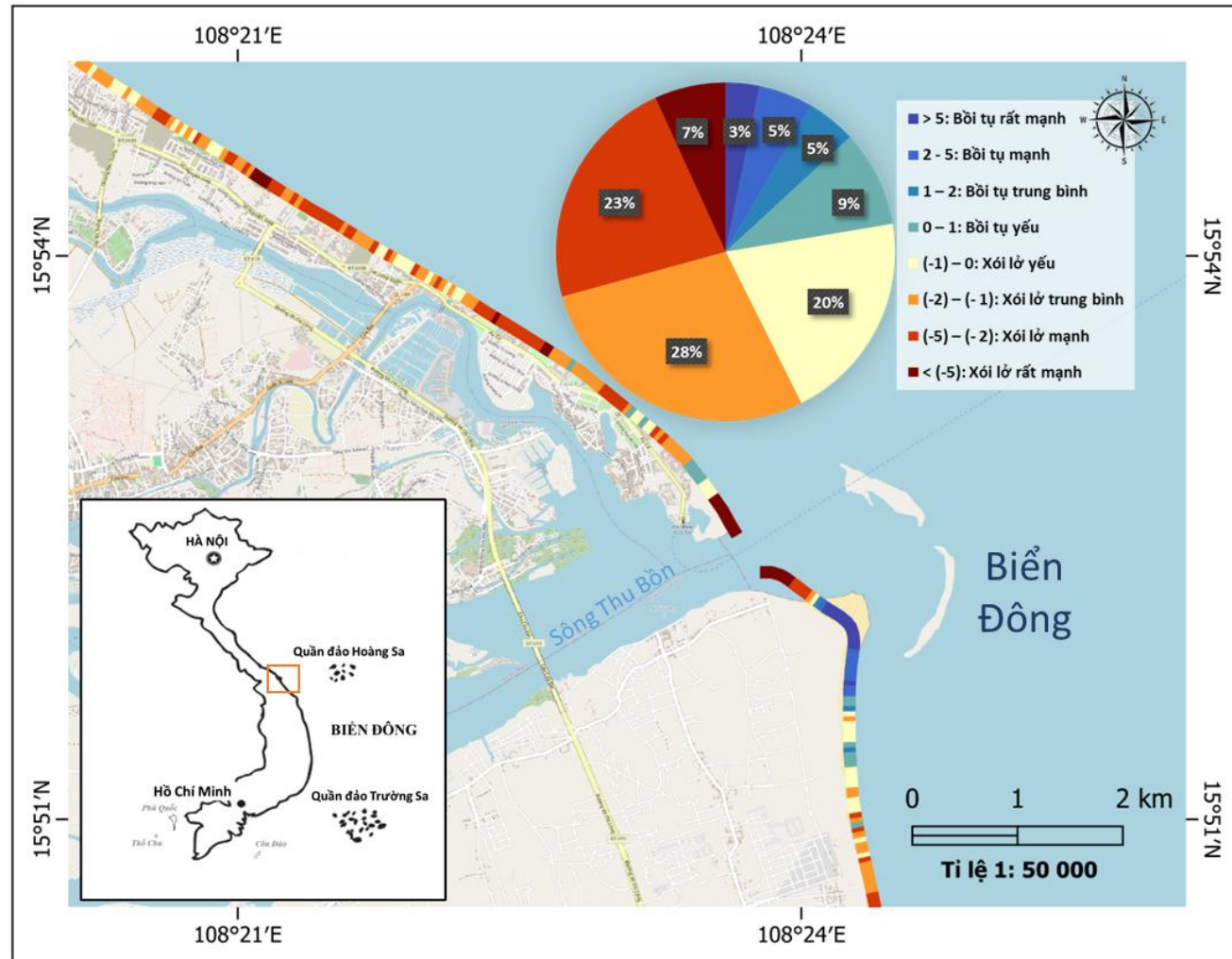
Hình 4.23. Biểu đồ phân bố sai số tính toán theo phương pháp WLR (sai số là WSE) cho giai đoạn 2004 – 2024 (đơn vị m).

Còn phương pháp LRR, do các đường bờ có mức độ tin cậy rất khác nhau, nhưng chúng lại không được xét đến trong tính toán (các đường bờ có trọng số như nhau), nên kết quả khó phản ánh đúng tình hình biến động thực tế của đường bờ khu vực. Đối với phương pháp WLR, việc xây dựng phương trình đường hồi quy sẽ ưu tiên cho các bộ dữ liệu có độ chính xác cao trước và giảm dần mức độ ưu tiên đối với các bộ dữ liệu có độ chính xác thấp hơn. Sai số của phương pháp tính hồi quy có trọng số là nhỏ hơn rất nhiều so với phương pháp hồi quy tuyến tính bình thường (Hình 4.21 và 4.23). Trong phần mềm Google Earth, càng những năm gần đây thì chất lượng ảnh vệ tinh có mức độ chi tiết càng cao (độ phân giải càng cao). Điều này tạo thuận lợi cho việc giải đoán đường bờ sẽ ngày một chính xác hơn. Hay nói cách khác, các đường bờ trong những năm gần đây có độ chính xác ngày một cao nên trọng số ưu tiên trong tính toán hồi quy cho các đường bờ giai đoạn này cao nhất. Vì vậy kết quả thể hiện có độ chính xác cao nhất.

4.2.2.3. Đánh giá thực trạng biến động đường bờ

Trên cơ sở các kết quả tính toán về biến động đường bờ biển giai đoạn 2004 đến 2024, nghiên cứu đã tiến hành phân đoạn bờ biển theo các đặc trưng xói lở/bồi

tụ khu vực Cửa Đại. Theo đó, bờ biển khu vực được phân thành 8 nhóm nguy cơ khác nhau là đoạn bờ bồi tụ rất mạnh, mạnh, trung bình, và yếu đến đoạn bờ xói lở yếu, trung bình, mạnh, và rất mạnh và có thể trở thành thảm họa (Hình 4.24). Theo đó, nhóm đoạn bờ có hoạt động xói lở trung bình là chiếm ưu thế 28,1%, tiếp đến là đoạn bờ xói lở mạnh chiếm 22,4%; đoạn bờ xói lở yếu chiếm khoảng 20,2%; các đoạn bờ có nguy cơ xói lở rất mạnh có khoảng 6,8% tổng chiều dài bờ biển trong khu vực trong khi đoạn bờ bồi tụ rất mạnh chỉ khoảng 3,2%. Tại khu vực nghiên cứu có 4,7% đoạn bờ có hiện tượng bồi tụ trung bình và 9,2% đoạn bờ có hiện tượng bồi tụ yếu. Có thể thấy khu vực này có xu hướng xói lở mạnh hơn so với xu hướng bồi tụ. Thời điểm từ tháng 9 đến tháng 12 là các tháng có bão và hiện tượng xói lở bờ biển diễn ra cực kỳ nghiêm trọng khi sóng có thể tác động đến khu vực nhà dân ở bên trong bờ. Đặc biệt chuỗi mưa bão lớn cuối năm 2017, trong đó có các cơn bão và áp thấp nhiệt đới hoạt động mạnh trên khu vực miền Trung. Dưới tác động kết hợp của sóng lớn, gió mùa Đông Bắc cường độ cao và triều cường, bờ biển Cửa Đại đã ghi nhận nhiều đợt sạt lở nghiêm trọng chỉ trong thời gian ngắn. Nhiều đoạn bờ bị biển lấn sâu từ 10–20 m chỉ sau một mùa mưa bão; bãi biển bị thu hẹp nhanh chóng, hình thành các vách sạt đứng cao 3–5 m, sóng biển tác động trực tiếp vào phần đất ổn định phía trong.



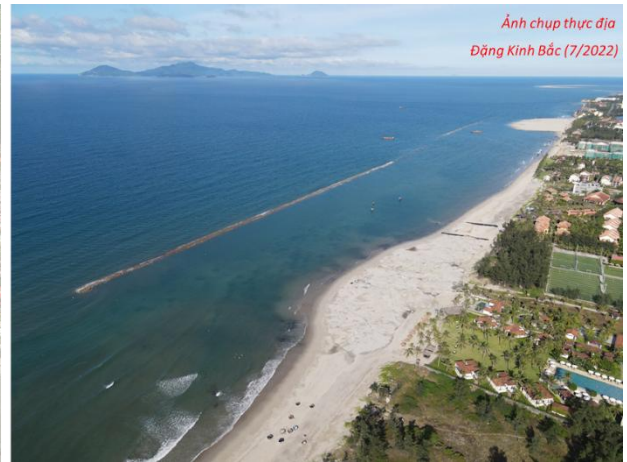
Hình 4.24. Bản đồ biến động đường bờ trong khu vực Cửa Đại từ năm 2004 đến 2024

Sau năm 2017, hiện tượng xói lở không suy giảm mà tiếp tục duy trì và gia tăng theo các mùa mưa bão liên tiếp. Tại Cửa Đại, khách sạn Hội An Hideaway nằm ở phía nam bãi tắm Cửa Đại đã bị hư hỏng nặng nề do xói lở bờ biển cuối năm 2017, không có khả năng phục hồi, phải xây dựng lại sau năm 2020. Đến nay, dưới tác động của các hiện tượng thời tiết cực đoan ngày càng gia tăng, xói lở tiếp tục diễn biến phức tạp. Các đợt mưa lớn kết hợp triều cường đã gây sạt lở sâu từ 5–10 m tại nhiều đoạn bờ, tạo mái đứng cao, uy hiếp trực tiếp các khu du lịch, tuyến giao thông ven biển và khu dân cư phía trong. Theo các báo cáo tổng hợp, tổng diện tích đất ven biển bị mất do xói lở trong giai đoạn 2016–2022 lên tới khoảng 112 ha, trong đó tỷ lệ chiều dài bờ biển trong tình trạng xói lở đã tăng nhanh so với giai đoạn trước.

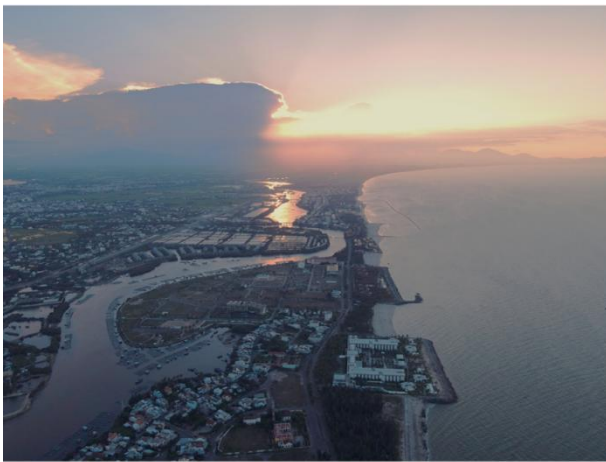
Bên cạnh đó, biến động khu vực Cửa Đại gắn liền với những thay đổi theo thời gian về đặc trưng về nhiên và xã hội. Đặc biệt là từ năm 2010 đến nay, đây là giai đoạn đã có những tác động mạnh mẽ hơn của các hoạt động phát triển kinh tế và các hiện tượng thời tiết cực đoan tác động đến bờ/bãi biển. Hoạt động xây dựng các trung tâm nghỉ dưỡng xâm lấn bờ/bãi biển đã phần nào tác động và làm mất cân bằng tự nhiên của bãi biển khu vực. Vì vậy mà hoạt động xói lở ở giai đoạn này đặc biệt mạnh mẽ ở một số đoạn bờ biển như ở khu vực bờ biển phường Cửa Đại (Hình 4.25, Hình 4.26 và Hình 4.27).



Hình 4.25. Bờ biển trước đường Âu Cơ, phường Cửa Đại thay đổi từ 2016 đến 2022 sau khi được gia cố kè bằng các bao cát (Nguồn: Đặng Kinh Bắc)



Hình 4.26. Bãi biển Cửa Đại thay đổi từ 2019 đến 2022 sau khi được gia cố kè song song với bờ và đổ cát lấn biển (Nguồn: Đặng Kinh Bắc, 2022)



Hình 4.27. Thực trạng lấn biển tại khu vực Cửa Đại, Đà Nẵng (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 6/2023)

Theo khảo sát thực địa 2025, khu vực bờ biển An Bàng Cẩm An, có vách xói dựng đứng, sóng đánh làm mất dần vật chất khiến hệ sinh thái rừng phi lao bị bật rễ gãy đổ, nơi vách xói mạnh nhất chỉ cách khu du lịch 19,7m và cách hệ thống đường gia thông khoảng 36m (Hình 4.28).



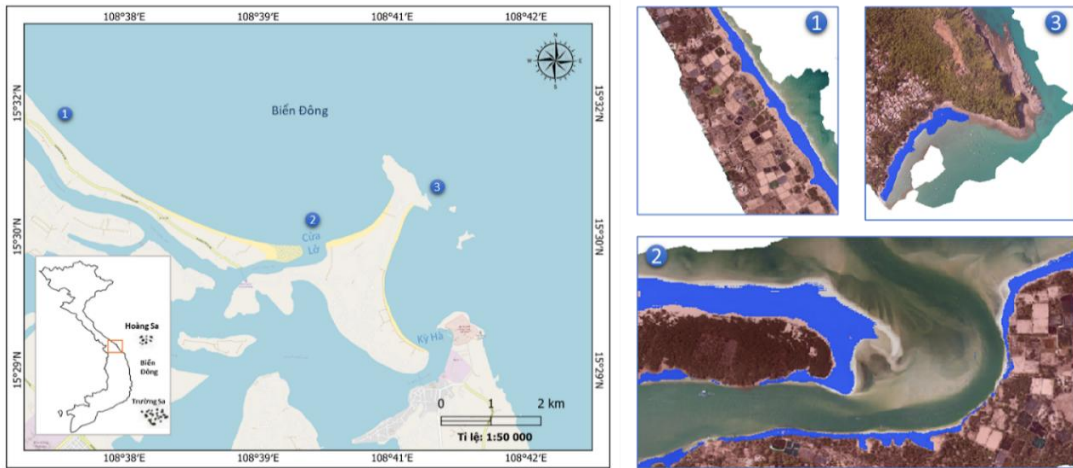
Hình 4.28. Thực trạng xói lở ở bờ biển Cẩm An. (Nguồn: Giang Tuấn Linh, 2025)

4.2.3. Đánh giá biến động khu vực Núi Thành

4.2.3.1. Kết quả chiết xuất đường bờ bằng công nghệ học máy

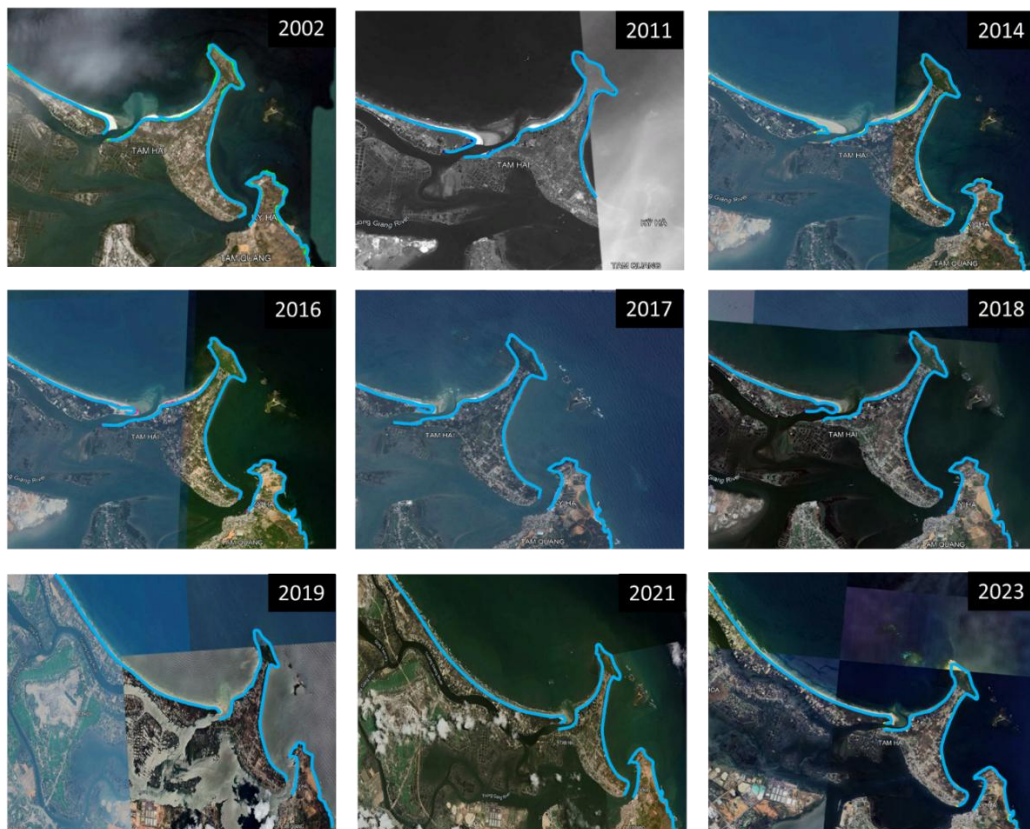
Khu vực Núi Thành thuộc lưu vực sông Thu Bồn - Vu Gia, nằm trong hệ thống sông Trường Giang đổ về phía cửa Lở. Dữ liệu thống kê cho thấy các khu vực bờ biển Tam Hải, Tam Nghĩa và Tam Quang có tình trạng xói lở nghiêm trọng, ảnh hưởng nghiêm trọng tới đời sống người dân. Tháng 3 năm 2023, hơn 1km đường bờ biển ở Tam Hải, Núi Thành bị xói lở nặng. Đoạn kè cứng dài 150m ở Tam Kỳ cũng bị sụt lún hư hỏng tạo ra các bờ vực cao 1m đến 2m, gây khó khăn cho các hoạt động lễ hội biển và du lịch cộng đồng nơi đây. Bờ biển xã Tam Tiên, dài 8km thì có 2km bị xâm thực và xói lở nặng, và đe dọa các hộ dân nơi đây đặc biệt ở hai thôn Hà Lộc và Ngọc An. Khu vực này, mỗi năm sóng lấn sau vào bờ hơn 1m. Bên cạnh đó, tình trạng bồi lấp cửa sông, xâm nhập mặn ở khu vực huyện Núi Thành cũng là những trở ngại lớn cho công việc sản xuất nông nghiệp và giao thông đường thủy tại địa phương.

Một số kết quả giải đoán của mô hình U-Net 256 thể hiện trong Hình 4.29 cho thấy khả năng phân biệt hiệu quả giữa vùng đất liền (màu đỏ) và vùng biển (màu xanh) tại các khu vực ven biển khác nhau của khu vực Núi Thành. Ở khu vực bờ cát có nuôi trồng thủy sản (1), đường bờ được xác định rõ dọc theo ranh giới giữa vùng biển và hệ thống ao nuôi nằm gần bờ. Mô hình phân tách tốt giữa nước biển, bờ biển và các ao nuôi hải sản. Tại khu vực Cửa Lở (2), kết quả cho thấy sự phức tạp trong việc xác định đường bờ do hình thái lòng sông – cửa biển có tính biến động cao. Mô hình vẫn duy trì được ranh giới tổng thể giữa nước biển, bờ biển và đất liền, tuy nhiên một số vùng nhỏ bị phân loại nhầm hoặc thiếu liên tục, phản ánh giới hạn của mô hình trong vùng bờ bị phân cắt nhỏ. Các khu vực này vẫn cần hiệu chỉnh sau khi giải đoán bằng mô hình. Với khu vực bờ đá Tam Hải (3) cũng tương tự khu vực bờ đá ở Vịnh Đà Nẵng, khu vực này mô hình giải đoán là khu vực đất liền. Do đó, khi chiết tách đường bờ trong khu vực này vẫn cần hiệu chỉnh bổ sung.



Hình 4.29. Một số kết quả giải đoán bờ biển (màu xanh) và đất liền (màu đỏ) ở một số khu vực Núi Thành: 1) khu vực bờ cát có nuôi trồng thủy hải sản; 2) khu vực Cửa Lở; 3) khu vực bờ đá Tam Hải.

Nhằm xác định hiện trạng đường bờ biển khu vực này cho tới nay, nghiên cứu sinh đã sử dụng ảnh viễn thám độ phân giải cao và UAV từ năm 2002 đến năm 2023 có độ phân giải 0,7 m với mô hình học máy U-Net 256 để giải đoán đường bờ trong. Kết quả được chiết tách và đưa vào mô hình DSAS trong phần mềm ArcGIS để đánh giá biến động đường bờ trong của khu vực (Hình 4.30).



Hình 4.30. Đường bờ trong (đường line màu) khu vực Núi Thành, Đà Nẵng được chiết tách từ năm 2002 đến 2023 để đưa vào mô hình DSAS.

4.2.3.2. Đánh giá kết quả DSAS trong phân tích biến động đường bờ

Để tính toán tốc độ biến động đường bờ khu vực Núi Thành, nghiên cứu sinh đã thiết lập được 1500 lát cắt vuông góc với các đường bờ và đường cơ sở với khoảng cách giữa các đường là 20m. Theo kết quả tính toán thì trong khoảng 20 năm (từ 2002 đến 2023) phạm vi biến động đường bờ (giữa đường xa nhất và gần nhất) ở khu vực này đạt giá cực đại là 982,27m và chỗ biến động ít nhất là 0m. Theo những phân tích kỹ thuật, phương pháp hồi quy tuyến tính có trọng số được dùng để phân tích và đánh giá kết quả biến động đường bờ khu vực trọng điểm này.

Kết quả ở Bảng 4.6 cho thấy sự khác biệt đáng kể về giá trị xói lở giữa phương pháp WLR và hai phương pháp còn lại. Điều này có thể được giải thích bởi việc khi tính toán đường bờ tất cả các thể hệ, các đường bờ ở các giai đoạn khác nhau, dữ liệu xác định đường bờ có độ chính xác khác nhau, dẫn đến độ tin cậy khác nhau.

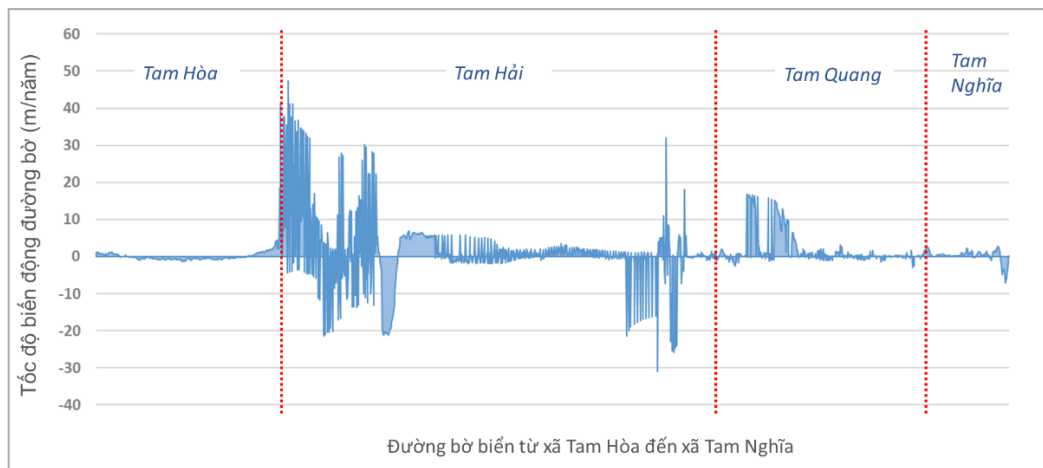
Bảng 4.6. Bảng thống kê một số thông số cơ bản theo các phương pháp khác nhau, giai đoạn 2002-2023.

TT	Giai đoạn 2002 - 2023			
	SCE (m)	EPR (m/năm)	LRR (m/năm)	WLR (m/năm)
Max	982,27	44,07	47,39	108,75
Min	0	-34,57	-30,95	-76,35
Median	27,745	0,16	0,14	0,335
Mean	121.23	1.74	1.80	1.99
% mặt cắt xói (tốc độ xói < -0.2m/năm)	-	31,1	33,4	22,69
% mặt cắt bồi (tốc độ bồi >0.5 m/năm)	-	38,1	39,33	31,31
% mặt cắt ít biến động (tốc độ từ -0,2 đến 0,5 m/năm)	-	30,8	27,27	46

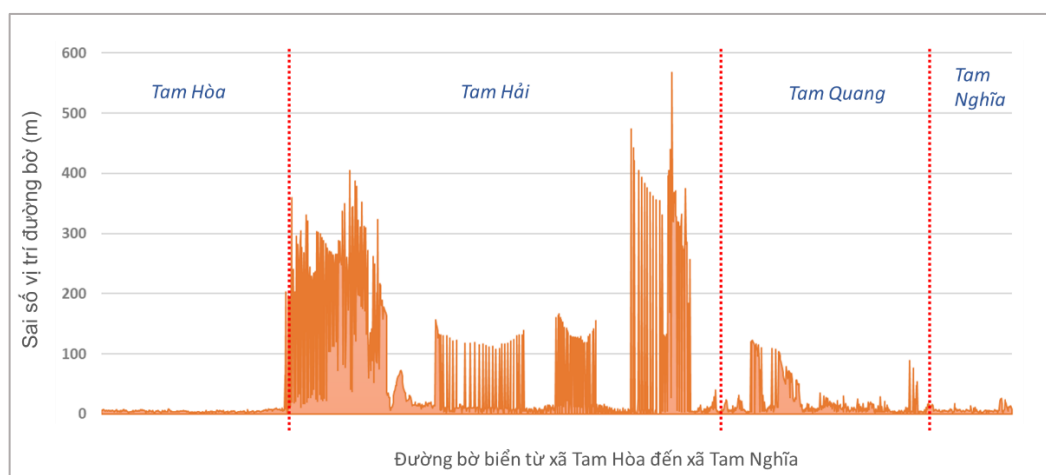
Kết quả tính toán ở Bảng 4.6, phạm vi biến động lớn nhất của các đường bờ trong khoảng thời gian từ 2002 đến 2023 có giá trị trung vị đạt 27,7m. Theo kết quả phương pháp WLR, tốc độ xói lở cực đại trong khu vực đạt khoảng 76,3m/năm và bồi tụ mạnh nhất đạt khoảng 108,7m/năm. Bảng thống kê cho thấy số mặt cắt có xu thế xói lở (tốc độ xói > 0,2m/năm) là 473/1500 mặt cắt, chiếm 22,7%; số mặt cắt được cho là có xu thế bồi (tốc độ bồi >0,5m/năm) là 653/1500, chiếm

31,3% tổng số mặt cắt trong vùng nghiên cứu. Trong đó khu vực có tốc độ xói lở mạnh là phía bờ phải Cửa Lở, xã Tam Hải.

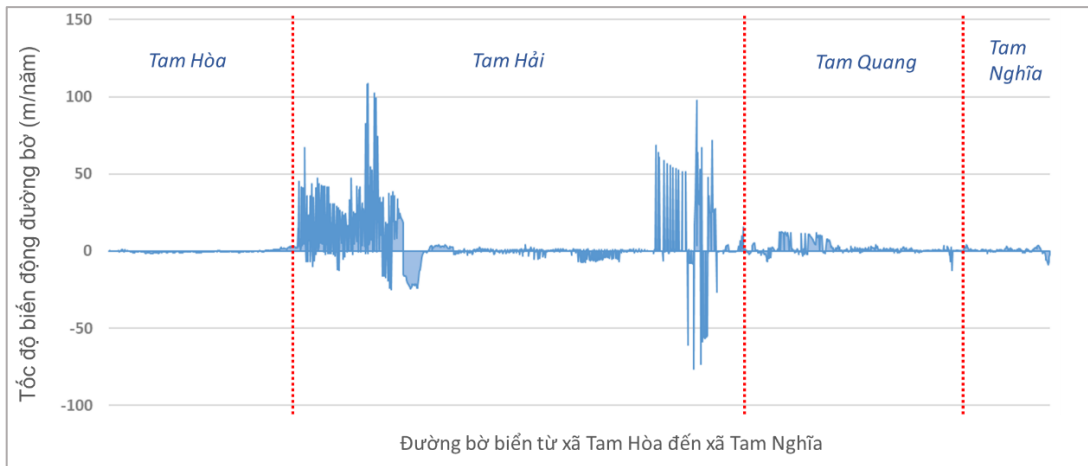
Dựa trên đánh giá biến động đường bờ từ bắc xuống nam bằng phương pháp tính toán LRR (được thể hiện trong Hình 4.31), quá trình bồi tụ - xói lở diễn ra hết sức phức tạp tại khu vực trọng điểm này. Khu vực biến động xói lở có thể kể đến là ở khu vực bờ biển xã Tam Hải lên tới hơn 30m. Các khu vực biến động bồi tụ chủ yếu nằm ở khu vực ven biển xã Tam Hải và Tam Quang, có nơi bồi tụ mạnh từ 5 đến gần 50m. Độ sai số của phương pháp tính toán này cao nhất là ở khu vực Tam Hải (Hình 4.32). Mặc dù vậy, phương pháp LRR không xem xét/tính toán mức độ tin cậy khác nhau trên toàn bộ các đường bờ. Điều này khiến trọng số tính toán trên các đoạn bờ là như nhau, khó phản ánh chính xác tình hình biến động thực tế của đường bờ khu vực.



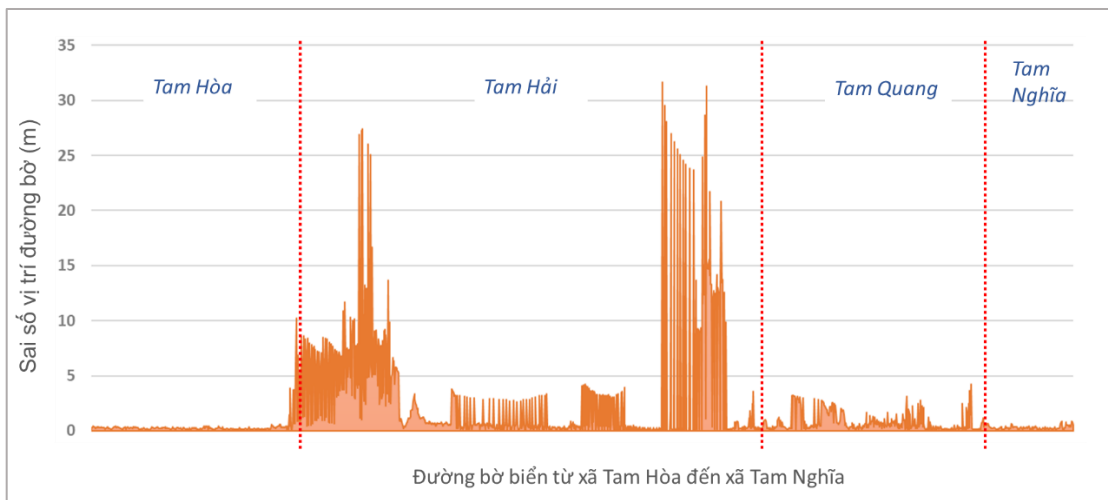
Hình 4.31. Xu thế biến động đường bờ giai đoạn 2002 - 2023 khu vực Núi Thành theo phương pháp LRR (đơn vị: m/năm).



Hình 4.32. Biểu đồ phân bố sai số tính toán theo phương pháp LRR (sai số là LSE) cho giai đoạn 2002 – 2023 (đơn vị: m).



Hình 4.33. Xu thế biến động đường bờ giai đoạn 2002 - 2023 khu vực Núi Thành theo phương pháp WLR (đơn vị m/năm)



Hình 4.34. Biểu đồ phân bố sai số tính toán theo phương pháp WLR (sai số là WSE) cho giai đoạn 2002 – 2023 (đơn vị: m).

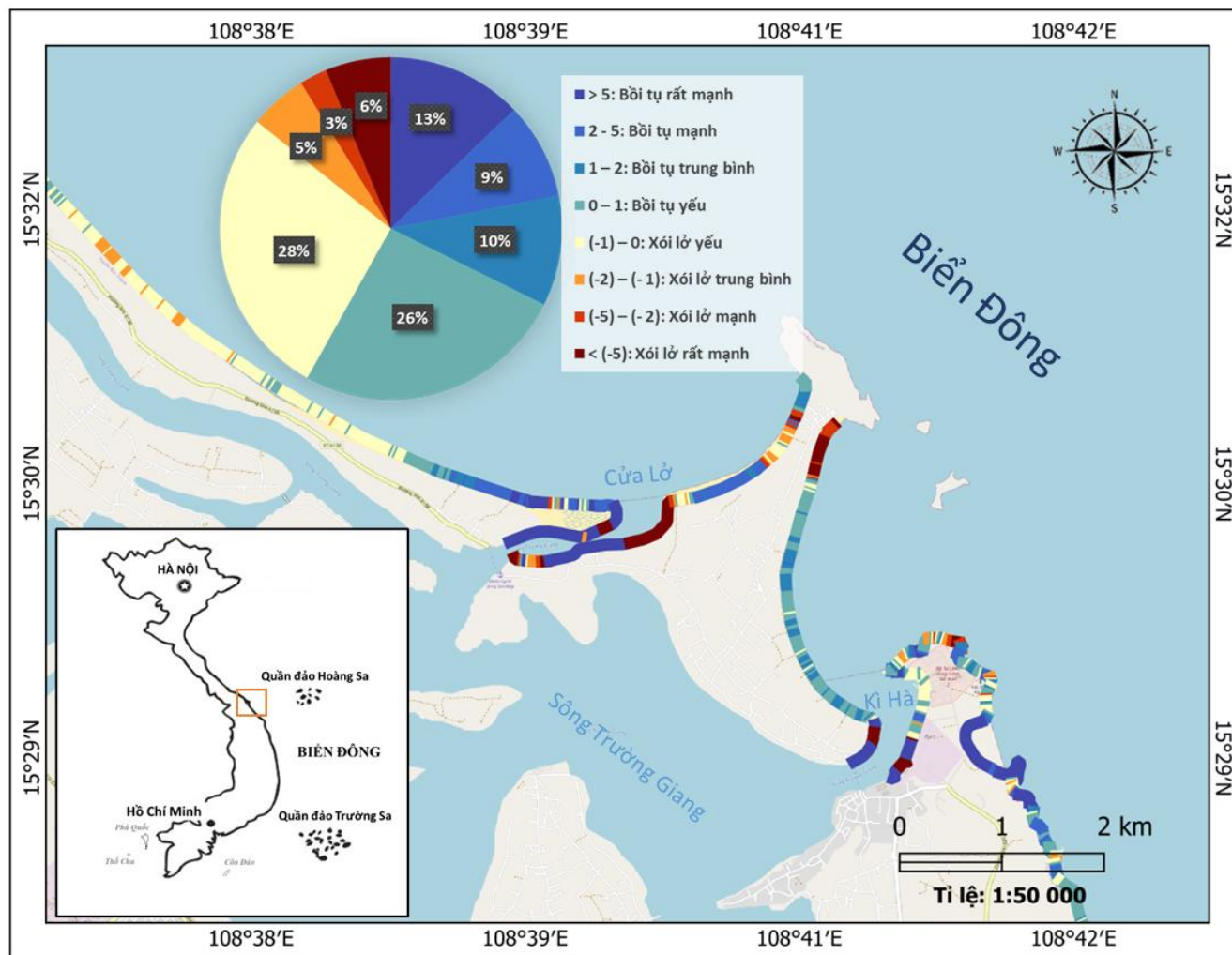
Với phương pháp tính toán WLR, Hình 4.33 cho thấy sự biến động chủ yếu quan sát rõ rệt tại xã Tam Hải. Các đoạn bờ xã Tam Hòa và Tam Nghĩa là các đoạn bờ biển ổn định nhất huyện Núi Thành. Do đường bờ gần như không thay đổi qua các thời kỳ, mô hình hồi quy tuyến tính khớp với dữ liệu. Kết quả tốc độ biến động tại đây rất đáng tin cậy cho các phân tích về địa động lực dài hạn. Khu vực bồi tụ đáng chú ý từ 0 đến hơn 100m. Các khu vực xói lở cũng chủ yếu nằm ở ven biển xã Tam Hải khu vực Cửa Lở (0 đến gần 50m). Độ sai số của phương pháp tính toán sai số cao nhất có thể lên tới hơn 30m² tại xã Tam Hải. Tam Hải là xã đảo nằm kẹp giữa Cửa Lở và cửa An Hòa. Sự dịch chuyển của các doi cát cửa sông diễn ra rất nhanh và không theo quy luật tuyến tính. Các hoạt động xây dựng kè chống xói lở và việc nạo vét luồng lạch vào cảng Kỳ Hà đã làm thay đổi cơ học hình thái đường bờ. Những đỉnh bồi tụ +100m/năm thường là kết quả của việc bồi

đắp nhân tạo hoặc sự hình thành đột ngột của các bãi cát sau công trình chỉnh trị cửa sông. Ở bờ biển xã Tam Quang, sai số chỉ khoảng 5m² (Hình 4.34). Khu vực này bao gồm hệ thống cảng và khu công nghiệp. Tốc độ bồi tụ ở đây chủ yếu là kết quả của việc san lấp mặt bằng xây dựng cảng biển. Tuy nhiên, vì việc xây dựng này diễn ra có lộ trình và ổn định sau khi hoàn thành nên sai số WSE không quá cao như ở khu vực đảo tự nhiên Tam Hải.

Phương pháp WLR sử dụng phương trình hồi quy sẽ ưu tiên các bộ dữ liệu có độ chính xác cao hơn và giảm dần mức độ ưu tiên đối với các thông tin có độ chính xác thấp. Sai số của phương pháp hồi quy có trọng số nhỏ hơn nhiều so với phương pháp hồi quy tuyến tính thông thường (Hình 4.32 và 4.34). Vì vậy, kết quả phản ánh mức độ chính xác tốt nhất và phản ánh đúng thực tế hoạt động xói lở/bồi tụ mạnh mẽ ở khu vực Cửa Lở trong những giai đoạn gần đây.

4.2.3.3. Đánh giá thực trạng biến động đường bờ trong 20 năm

Trên cơ sở các kết quả tính toán về biến động đường bờ biển giai đoạn 2002 đến 2023, nghiên cứu đã tiến hành phân đoạn bờ biển theo các đặc trưng xói lở/bồi tụ khu vực Núi Thành thành 8 nhóm như đối với 2 khu vực trọng điểm đã phân tích trước đó (Hình 4.35). Nhóm đoạn bờ có hoạt động xói lở yếu là chiếm ưu thế 27,6%, tiếp đến là đoạn bờ bồi tụ yếu chiếm 25,8%; đoạn bờ bồi tụ trung bình chiếm khoảng 10,4%; các đoạn bờ có nguy cơ xói lở mạnh và rất mạnh có khoảng 8,8% tổng chiều dài bờ biển. Trong khi đó, đoạn bờ bồi tụ mạnh đến rất mạnh chỉ khoảng 21,93%. Có thể thấy, đoạn bờ khu vực Núi Thành có xu hướng bồi tụ chiếm ưu thế hơn xói lở.

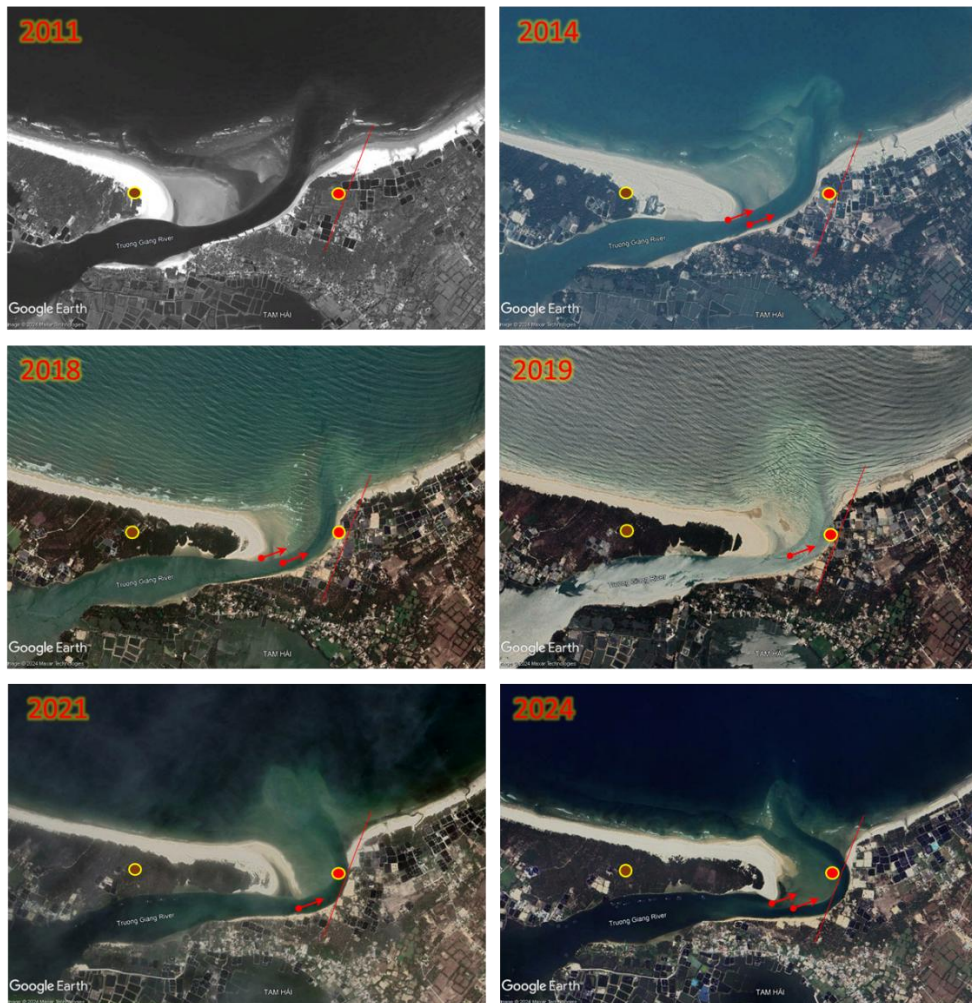


Hình 4.35. Bản đồ biến động đường bờ trong khu vực Núi Thành từ 2002 đến 2023.



*Hình 4.36. Thực trạng xói lở/bồi tụ tại khu vực cửa Lở và gành đá Bàn Than
(Nguồn: Giang Tuấn Linh, 6/2023)*

Theo kết quả biến động bờ biển ở khu vực Núi Thành thì xu hướng chính của biến động bờ biển Cửa Lở (Núi Thành) là bồi lấp cửa sông, có sự chuyển lạch của dòng sông Trường Giang theo hướng Đông Nam tương tự như xu thế giai đoạn 1985-1995. Quá trình đang tiếp diễn và có thể sẽ đóng lại trong tương lai. Điều này đã ảnh hưởng rất lớn đến các hộ dân cư sinh sống trên xã đảo Tam Hải cụ thể là thôn Bình Trung khi đe dọa đến hoạt động nuôi trồng thủy sản và đời sống sinh hoạt của họ do xói lở đã ăn sâu vào đất liền (Hình 4.36 và Hình 4.37).



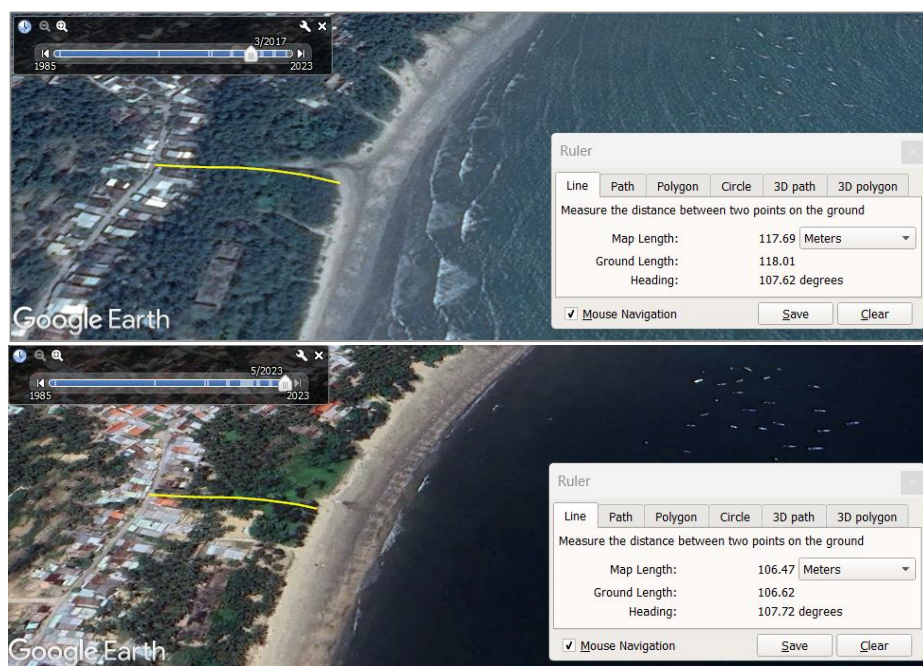
Hình 4.37. Biến động cửa sông Trường Giang giai đoạn 2011 – 2024 qua ảnh Worldview-2 từ nguồn dữ liệu Google Earth Pro

Dựa theo biểu đồ và bản đồ có thể thấy được sự biến động mạnh mẽ diễn ra tại khu vực phía bờ đông của Cửa Lở với đoạn xói lở gây giật lùi bờ biển mạnh (Hình 4.35). Khu vực này vốn là chỗ dòng chảy bị ảnh hưởng và bị lệch về phía Nam khiến cho bờ này bị xói một cách nghiêm trọng. Mặt khác tại khu vực cũng có xảy ra hiện tượng bồi tụ trên đoạn bờ biển dọc Tombolo Tam Hải và khu vực phía Tây (bờ trái) Cửa Lở. Theo tính biến động từ năm 2002 và 2023 thì bờ biển bồi tụ tại khu vực doi cát nổi đảo và điểm biến động lớn nhất bồi tụ lên đến gần 100m. Khu vực bồi cũng trùng với vùng được bảo vệ khỏi các tác động của gió nhờ Ghềnh đá Bàn Than.

Tháng 3/2023, hiện tượng xói lở bờ biển tại khu vực Cửa Lở, thôn Bình Trung, Tam Hải, Núi Thành (thành phố Đà Nẵng) diễn ra với cường độ đặc biệt nghiêm trọng, phản ánh rõ mức độ bất ổn của động lực biển tại vùng ven bờ miền Trung. Đoạn bờ biển dài hơn 1 km đã bị triều cường xâm thực sâu vào đất liền, làm bật gốc hàng chục cây dương liễu phòng hộ và gây sập đổ nhiều công trình

tạm ven biển. Triều cường không chỉ phá hủy hệ thực vật chắn gió, giữ cát mà còn lấn sâu vào khu dân cư, khiến nhiều hộ dân buộc phải di dời khẩn cấp. Qua phỏng vấn, người dân địa phương cho biết có thời điểm bờ biển bị lấn sâu 2 mét chỉ trong vòng vài giờ, và một số đoạn bờ bị biến đổi hình thái hoàn toàn sau một đợt sóng lớn. Bên cạnh đó, nhiều ao nuôi thủy sản và chòi tạm phục vụ sản xuất bị phá hủy hoàn toàn, gây thiệt hại sinh kế đáng kể. Đáng chú ý, khu vực chôn cất tập trung của địa phương hiện chỉ còn cách mép sạt lở chưa đầy 10 mét, tiềm ẩn nguy cơ cao về mặt xã hội – văn hóa nếu quá trình xói lở tiếp diễn. Tình trạng này không chỉ phản ánh tác động trực tiếp của triều cường và sóng lớn mà còn cho thấy xu hướng gia tăng mức độ nghiêm trọng của xói lở bờ biển dưới tác động của biến đổi khí hậu và nước biển dâng. Việc thiếu các biện pháp phòng chống kịp thời, kết hợp với áp lực phát triển ven biển, đang làm gia tăng tốc độ xói lở tại các khu vực vốn đã có cấu trúc địa hình yếu và dễ tổn thương.

Hiện tượng xói lở từ 2-5m cũng được phát hiện tại khu vực bờ đông của gành đá Bàn Than. Nhiều khu vực xuất hiện xói lở trên 5m. Ghi nhận từ năm 2017 đến 2023, quá trình xói lở hơn 10m đã diễn ra (Hình 4.38). Quan sát hiện trạng lớp phủ cho thấy quá trình này không chỉ là do tác động của sóng, mà còn do hoạt động thay đổi sử dụng đất của người dân khi diện tích rừng ven biển bị chuyển đổi thành các công trình xây dựng. Quá trình đô thị hóa diễn ra tương đối mạnh dọc dải ven biển, mức độ tổn thương bờ biển do xói lở bờ ngày càng gia tăng.



Hình 4.38. Xói lở hơn 10m bờ biển phía đông mũi Bàn Than từ 2017 đến 2023 đo từ nguồn dữ liệu Google Earth.



Hình 4.39. San lấp, cải tạo bờ biển quanh mũi Kỳ Hà từ 2014 đến 2023 từ nguồn dữ liệu Google Earth

Tại mũi An Hòa, hoạt động san lấp, cải tạo bờ biển phòng chống thiên tai và bảo vệ công trình quốc phòng được ghi nhận, gắn liền với hoạt động quốc phòng (Hình 4.39). Dự án xây dựng tuyến kè bảo vệ bờ biển Kỳ Hà quanh mũi An Hòa được thực hiện do Bộ Tư lệnh Quân khu 5 đầu tư, Công ty Cổ phần Xây lắp Thành An 96 – Binh đoàn 11, Bộ Quốc phòng làm đơn vị thi công. Tuyến kè có tổng chiều dài 1.673,6 mét và kết hợp san lấp để phục hồi diện tích bị xâm thực, gồm 5 hạng mục chính. Trong đó, có kè chống xói lở dài 1.553,6 mét và đê chắn sóng mở hàn dài 120 mét. Mục tiêu của dự án là khắc phục tình trạng xói lở và xâm thực bờ biển, đồng thời bảo vệ các công trình quốc phòng, tài sản và tính mạng của người dân trong khu vực lân cận. Công trình đã khởi công từ ngày 15/10/2020 và đã hoàn thành thi công đạt 100% khối lượng công việc, san lấp và gia cố diện tích lớn bờ biển, khiến diện tích bờ biển khu vực được mở rộng.

4.2.4. Xu thế biến động đường bờ và so sánh giữa các khu vực nghiên cứu

Kết quả tổng hợp cho thấy xu thế biến động đường bờ có sự khác biệt rõ rệt giữa ba khu vực nghiên cứu (Bảng 4.7). Tại Vịnh Đà Nẵng (giai đoạn 2002–2023), biến động đường bờ thể hiện xu thế bồi tụ và ổn định chiếm ưu thế. Giá trị WLR trung bình đạt 1,78 m/năm và giá trị trung vị đạt 0,24 m/năm, phản ánh xu thế bồi tụ tổng thể nhưng với cường độ không lớn. Phân bố các mặt cắt cho thấy tỷ lệ bồi tụ và ít biến động chiếm phần lớn chiều dài đường bờ, trong khi xói lở chỉ xuất hiện cục bộ. Điều này cho thấy đường bờ khu vực Vịnh Đà Nẵng duy trì trạng thái cân bằng động tương đối trong giai đoạn nghiên cứu.

Ngược lại, khu vực Cửa Đại (giai đoạn 2004–2024) thể hiện xu thế xói lở chi phối rõ rệt. Giá trị WLR trung bình đạt $-1,25$ m/năm và giá trị trung vị đạt $-1,185$ m/năm, cho thấy xói lở không chỉ xuất hiện cục bộ mà mang tính phổ biến trên nhiều mặt cắt. Tỷ lệ chiều dài đường bờ có xu thế xói lở chiếm tới 75%, trong khi tỷ lệ bồi tụ và ít biến động ở mức thấp. Biên độ biến động lớn, với các giá trị WLR âm đạt đến $-41,66$ m/năm, phản ánh mức độ xói lở mạnh và tính nhạy cảm cao của khu vực này trước các tác động động lực tự nhiên và nhân sinh trong giai đoạn nghiên cứu.

Đối với khu vực Núi Thành (giai đoạn 2002–2023), biến động đường bờ có xu thế bồi tụ chiếm ưu thế, song thể hiện tính phân hóa không gian rất rõ rệt. Giá trị WLR trung bình đạt $1,99$ m/năm và giá trị trung vị đạt $0,335$ m/năm cho thấy xu thế bồi tụ tổng thể, trong khi tỷ lệ các mặt cắt ít biến động chiếm tới 46% chiều dài đường bờ. Tuy nhiên, biên độ biến động tại khu vực này rất lớn, với giá trị WLR dao động từ $-76,35$ đến $+108,75$ m/năm, phản ánh sự tồn tại đồng thời của các đoạn xói lở và bồi tụ cường độ cao mang tính cục bộ.

Bảng 4.7. Tổng hợp các chỉ số biến động đường bờ theo phương pháp WLR tại các khu vực nghiên cứu trọng điểm

Khu vực	Vịnh Đà Nẵng	Cửa Đại	Núi Thành
Giai đoạn nghiên cứu	2002–2023	2004–2024	2002–2023
WLR trung bình (m/năm)	+1,78	-1,25	+1,99
WLR trung vị (m/năm)	+0,24	-1,185	+0,335
WLR Min (m/năm)	-3,43	-41,66	-76,35
WLR Max (m/năm)	+22,78	+33,21	+108,75
% mặt cắt xói lở	16,57	75,00	22,69
% mặt cắt bồi tụ	36,95	16,82	31,31
% mặt cắt ít biến động	46,47	8,18	46,00
Xu thế chi phối	Bồi tụ – ổn định	Xói lở chi phối	Bồi tụ chi phối, phân hóa mạnh

So sánh giữa ba khu vực nghiên cứu cho thấy Cửa Đại là khu vực có xu thế xói lở chi phối và mức độ rủi ro cao nhất, trong khi Vịnh Đà Nẵng và Núi Thành

có xu thế bồi tụ – ổn định chiếm ưu thế, song khác biệt về mức độ phân hóa không gian. Vịnh Đà Nẵng thể hiện trạng thái ổn định tương đối, còn Núi Thành có biến động mạnh hơn với sự đan xen giữa các đoạn xói lở và bồi tụ. Những khác biệt này phản ánh vai trò chi phối không đồng đều của các yếu tố động lực tự nhiên, điều kiện địa hình – địa mạo và tác động nhân sinh tại từng khu vực.

4.3 Khả năng ứng dụng kết quả nghiên cứu trong giám sát biến động đường bờ và quản lý bờ biển

4.3.1. Khả năng tái lập và triển khai phương pháp trong nghiên cứu biến động bờ biển

Một trong những giá trị quan trọng của luận án là xây dựng được quy trình nghiên cứu có khả năng tái lập và triển khai cho các khu vực ven biển khác ở Việt Nam. Tính tái lập của phương pháp được thể hiện ở việc toàn bộ quy trình từ thu thập dữ liệu, xây dựng bộ chỉ thị, nhận dạng đường bờ trong đến phân tích biến động đều được chuẩn hóa trên nền tảng viễn thám độ phân giải cao, GIS và các mô hình học máy phổ biến.

Trong nghiên cứu, đường bờ trong được xác định dựa trên các chỉ thị hình thái – vật chất ổn định như dải thực vật ven biển, đụn cát tiên tiêu, mép công trình nhân tạo hoặc ranh giới địa hình ổn định phía đất liền. Các chỉ thị này không chỉ phù hợp với khu vực Đà Nẵng mà còn có khả năng áp dụng cho nhiều vùng bờ khác của Việt Nam, đặc biệt tại khu vực ven biển miền Trung, nơi phổ biến các dạng bờ cát, bờ cửa sông, bờ đá và bờ nhân tạo.

Việc ứng dụng viễn thám độ phân giải cao kết hợp với học máy có ý nghĩa quan trọng trong nâng cao khả năng tái lập nghiên cứu biến động đường bờ. Khác với các phương pháp giải đoán thủ công phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm người phân tích, mô hình học máy cho phép chuẩn hóa quy trình nhận dạng đường bờ trên cùng một hệ tiêu chí và cùng cấu trúc dữ liệu đầu vào. Khi được huấn luyện bằng các bộ dữ liệu đã chuẩn hóa, mô hình có thể tái sử dụng cho các khu vực khác có điều kiện tương đồng, đồng thời giảm sự khác biệt giữa các lần giải đoán và giữa các nhóm nghiên cứu khác nhau. Điều này đặc biệt quan trọng đối với nghiên cứu biến động đa thời gian, nơi yêu cầu tính nhất quán cao giữa các thời điểm và các nguồn dữ liệu.

Bộ chỉ thị được xây dựng theo nguyên tắc gắn với các kiểu bờ hình thái – vật chất, thay vì phụ thuộc vào một nguồn dữ liệu hoặc một ngưỡng phổ cố định. Cách tiếp cận này cho phép linh hoạt sử dụng nhiều loại ảnh viễn thám khác nhau như ảnh UAV, ảnh vệ tinh độ phân giải cao hoặc ảnh Google Earth Pro, đồng thời

nâng cao khả năng thích ứng của mô hình khi triển khai ở các khu vực có điều kiện tự nhiên khác nhau.

Về mặt công nghệ, các mô hình học máy và học sâu sử dụng trong luận án đều là các mô hình phổ biến, có khả năng triển khai trên các nền tảng mã nguồn mở và môi trường tính toán thông dụng. Quy trình tiền xử lý dữ liệu, huấn luyện mô hình, đánh giá kết quả và phân tích biến động đều được xây dựng theo hướng chuẩn hóa, cho phép cập nhật dữ liệu mới và mở rộng nghiên cứu trong tương lai.

Nhìn chung, phương pháp nghiên cứu đề xuất trong luận án không chỉ phù hợp cho nghiên cứu biến động đường bờ biển tại thành phố Đà Nẵng mà còn có tiềm năng triển khai trong giám sát vùng bờ, đánh giá xói lở – bồi tụ và hỗ trợ quản lý hành lang bảo vệ bờ biển tại nhiều khu vực ven biển khác của Việt Nam.

4.3.2. Ứng dụng kết quả nghiên cứu trong giám sát biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng

Các kết quả nhận dạng đường bờ trong và phân tích biến động bờ biển trong luận án cho thấy khả năng ứng dụng trực tiếp trong giám sát biến động bờ biển thành phố Đà Nẵng theo không gian và thời gian. Hệ thống sản phẩm đầu ra gồm chuỗi đường bờ theo thời gian, bản đồ phân vùng xói lở – bồi tụ và các chỉ số dịch chuyển bờ có thể tích hợp trực tiếp vào cơ sở dữ liệu GIS phục vụ quản lý. Trước hết, việc ứng dụng mô hình học sâu (đặc biệt là U-Net) trên dữ liệu ảnh UAV độ phân giải cao cho phép giám sát biến động ngắn hạn và trung hạn tại các khu vực nhạy cảm như bờ cát biển mở, bờ cửa sông và các đoạn bờ chịu tác động mạnh của công trình nhân tạo. So với phương pháp giải đoán thủ công, cách tiếp cận này giúp giảm đáng kể thời gian xử lý, tăng tính khách quan và cho phép cập nhật kết quả với tần suất cao hơn.

Để triển khai hiệu quả trong thực tiễn, nghiên cứu kiến nghị thành phố Đà Nẵng cần từng bước đầu tư và hoàn thiện hạ tầng giám sát bờ biển, bao gồm: (i) hệ thống thiết bị bay không người lái (UAV) phục vụ chụp ảnh định kỳ tại các đoạn bờ trọng điểm; (ii) mạng lưới trạm quan trắc khí tượng – thủy văn ven biển và cửa sông để bổ sung dữ liệu động lực phục vụ phân tích; và (iii) hệ thống lưu trữ và xử lý dữ liệu không gian tích hợp GIS – AI.

Trên cơ sở đó, kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng như một công cụ hỗ trợ ra quyết định, giúp các cơ quan quản lý theo dõi sớm xu thế xói lở – bồi tụ, đánh giá hiệu quả của các công trình kè biển và điều chỉnh kịp thời các giải pháp can thiệp kỹ thuật hoặc phi kỹ thuật.

4.3.3. Ứng dụng trong quản lý vùng bờ và hành lang bảo vệ bờ biển

Một đóng góp quan trọng của luận án là cung cấp cơ sở khoa học trực tiếp cho quản lý tổng hợp vùng bờ và cho việc xây dựng, điều chỉnh hành lang bảo vệ bờ biển trên địa bàn thành phố Đà Nẵng. Trên cơ sở kết quả nhận dạng đường bờ trong và phân tích biến động đa thời gian, các khu vực xung yếu và các “điểm nóng” về xói lở – bồi tụ đã được xác định rõ ràng theo từng kiểu bờ hình thái và trong bối cảnh các kiểu vùng bờ khác nhau. Cách tiếp cận dựa trên đường bờ trong cho phép phản ánh đầy đủ hơn phạm vi ảnh hưởng dài hạn của các quá trình biển – ven biển, vượt qua hạn chế của các đánh giá dựa trên đường bờ ngoài mang tính tức thời.

Đối với vùng bờ cát biển mở, bao gồm cả bờ cát thấp và bờ cát cao – đụn cát, kết quả nghiên cứu cho thấy đây là khu vực chịu tác động tổng hợp mạnh mẽ nhất của động lực sóng biển và hoạt động nhân sinh ven bờ. Các đoạn bờ cát thấp, thường phân bố gần cửa sông hoặc dọc các bãi biển mở liên tục, có đặc điểm địa hình thấp, trầm tích bờ rời và khả năng tái phân bố nhanh theo mùa. Tại những khu vực này, xói lở bờ biển có xu hướng gia tăng rõ rệt trong các giai đoạn sóng lớn và bão mạnh, đặc biệt khi kết hợp với sự suy giảm nguồn bồi tích từ thượng lưu và sự xuất hiện của các công trình kè, đường giao thông và hạ tầng du lịch sát bờ.

Ngược lại, bờ cát cao – đụn cát, điển hình tại các đoạn từ Mỹ Khê – Non Nước đến Cẩm An – Duy Hải, giữ vai trò như một lá chắn tự nhiên quan trọng bảo vệ vùng đất phía trong. Tuy nhiên, kết quả phân tích biến động đường bờ trong cho thấy tại nhiều vị trí, các đụn cát tiền tiêu và dải thực vật ven biển đã và đang bị thu hẹp đáng kể do quá trình xây dựng hạ tầng du lịch, giao thông và công trình dịch vụ ven biển. Việc san gạt đụn cát, phá vỡ mối liên kết giữa trầm tích cát và thảm thực vật đã làm suy giảm khả năng tự ổn định của hệ thống bờ, khiến đường bờ trong dịch chuyển nhanh hơn vào đất liền trong các giai đoạn xói lở mạnh. Những đoạn bờ chịu tác động đồng thời của sóng biển có năng lượng cao và áp lực phát triển ven bờ chính là các điểm nóng xói lở, cần được ưu tiên trong việc xác định, điều chỉnh và bảo vệ nghiêm ngặt hành lang bảo vệ bờ biển. Kết quả luận án khẳng định rằng việc duy trì liên tục dải cát – thực vật ven biển là yếu tố then chốt nhằm ổn định vị trí đường bờ trong và giảm thiểu rủi ro xói lở dài hạn.

Đối với vùng bờ cửa sông, các phân tích không gian – thời gian cho thấy biến động đường bờ mang tính luân phiên bồi tụ – xói lở theo chu kỳ, chịu chi phối đồng thời bởi dòng chảy sông, chế độ triều và động lực sóng biển. Tại các cửa sông lớn như sông Hàn, Cu Đê và Thu Bồn, các doi cát, bãi bồi và dải thực vật cửa sông có xu hướng dịch chuyển đáng kể theo từng giai đoạn, đặc biệt trong bối cảnh thay đổi chế

độ dòng chảy do các công trình thủy điện và hoạt động chỉnh trị sông ở thượng lưu. Việc nhận dạng đường bờ trong cho phép xác định ranh giới ổn định nhất phía đất liền, qua đó khắc phục sự nhiễu loạn do dao động ngắn hạn của mép nước triều hoặc đường bờ ngoài.

Kết quả phân tích cho thấy việc sử dụng đường bờ trong làm ranh giới chuẩn giúp làm rõ phạm vi ảnh hưởng dài hạn của các quá trình bồi tụ và xói lở cửa sông, đồng thời nhận diện chính xác hơn các khu vực có nguy cơ mất ổn định cao khi kết hợp với hoạt động lấn biển, phát triển đô thị và hạ tầng ven sông – ven biển. Đây là cơ sở khoa học quan trọng để hỗ trợ điều chỉnh quy hoạch không gian vùng cửa sông, kiểm soát chặt chẽ các hoạt động lấn biển và xác định phạm vi hành lang bảo vệ bờ biển phù hợp với đặc thù động lực sông – biển tại từng cửa sông. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng, cách tiếp cận này góp phần nâng cao tính chủ động trong quản lý rủi ro và bảo đảm sự ổn định lâu dài của hệ thống bờ biển – cửa sông tại khu vực Đà Nẵng – Hội An.

Tiểu kết Chương 4

Kết quả đánh giá hiệu quả mô hình cho thấy các mô hình học sâu, đặc biệt là kiến trúc U-Net, có khả năng nhận dạng đường bờ trong từ ảnh viễn thám độ phân giải cao với độ chính xác và tính ổn định cao hơn so với các mô hình học máy truyền thống. Việc sử dụng ảnh UAV làm dữ liệu kiểm chứng góp phần nâng cao độ tin cậy của kết quả nhận dạng và lựa chọn mô hình phù hợp cho từng kiểu bờ và điều kiện dữ liệu.

Phân tích biến động đường bờ tại các khu vực trọng điểm như vịnh Đà Nẵng, các đoạn bờ cát biển mở và khu vực cửa sông cho thấy sự tồn tại đồng thời của các xu thế xói lở, bồi tụ và ổn định với mức độ biến động khác nhau theo không gian và thời gian. Kết quả nghiên cứu cũng làm rõ vai trò của các hoạt động nhân sinh như xây dựng công trình ven bờ, lấn biển và chỉnh trị dòng chảy trong việc làm thay đổi quy luật biến động tự nhiên của bờ biển.

Các kết quả đạt được khẳng định tính khả thi của việc ứng dụng viễn thám độ phân giải cao kết hợp học máy trong nghiên cứu và giám sát biến động bờ biển, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho quản lý vùng bờ và hành lang bảo vệ bờ biển tại thành phố Đà Nẵng và các khu vực ven biển khác ở Việt Nam.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. Kết luận:

1. Các kết quả tổng quan cho thấy ứng dụng viễn thám và học máy trong giám sát biến động đường bờ biển là xu thế tất yếu của khoa học Trái đất hiện đại. So với các phương pháp truyền thống còn hạn chế về tần suất cập nhật, chi phí và khả năng phản ánh động lực bờ, cách tiếp cận mới cho phép theo dõi liên tục và khách quan hơn. Trên cơ sở phân tích hệ thống các nghiên cứu trong và ngoài nước, luận án đã làm rõ khoảng trống khoa học liên quan đến đường bờ trong – ranh giới phản ánh trực tiếp quá trình xói lở – bồi tụ dài hạn nhưng chưa được định nghĩa và chuẩn hóa đầy đủ. Từ đó, luận án đề xuất khung tiếp cận mới, kết hợp phân tích hình thái địa mạo với viễn thám độ phân giải cao và học sâu, tạo nền tảng khoa học cho tự động hóa giám sát vùng bờ.

2. Khu vực ven biển từ thành phố Đà Nẵng đến dải ven biển huyện Núi Thành là không gian vùng bờ có mức độ phân hóa cao về địa mạo, động lực biển – sông và mức độ can thiệp của con người. Sự tồn tại đồng thời của bờ biển mở, cửa sông, vũng vịnh và bờ đá, cùng các dạng sử dụng đất ven biển khác nhau, đã tạo nên các kiểu biến động đường bờ không đồng nhất theo không gian. Việc nhận diện rõ các kiểu vùng bờ và lựa chọn khu vực nghiên cứu trọng điểm là cơ sở quan trọng để xây dựng bộ chỉ thị phù hợp và áp dụng hiệu quả các phương pháp viễn thám, GIS và học máy.

3. Luận án đã xây dựng được khung phương pháp nghiên cứu thống nhất, có khả năng tái lập, dựa trên tích hợp viễn thám độ phân giải cao, GIS và các mô hình học máy nhằm nhận dạng đường bờ trong và theo dõi biến động bờ biển. Việc kết hợp dữ liệu đa nguồn (UAV, ảnh vệ tinh độ phân giải cao và Google Earth Pro) cùng quy trình chuẩn hóa và kiểm chứng hình học chặt chẽ đã bảo đảm tính nhất quán không gian – thời gian của chuỗi dữ liệu, tạo cơ sở tin cậy cho phân tích biến động ở quy mô địa phương và khu vực.

4. Bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ trong được xây dựng trên cơ sở kế thừa các tiếp cận quốc tế, đồng thời điều chỉnh phù hợp với điều kiện tự nhiên, địa mạo và thực tiễn quản lý vùng bờ ở Việt Nam, với thành phố Đà Nẵng là nghiên cứu điển hình. Các chỉ thị được lựa chọn và hiệu chỉnh theo đặc điểm phân xạ phổ, hình thái và động lực bờ của các kiểu bờ chủ đạo (bờ cát cao, bờ cát thấp, bờ đá và bờ nhân tạo). Kết quả cho thấy bộ chỉ thị này giúp nâng cao độ chính xác trong nhận dạng ranh giới đường bờ, giảm ảnh hưởng của thủy triều và điều kiện môi

trường tức thời, đồng thời bảo đảm tính ổn định cần thiết cho phân tích biến động dài hạn.

5. Kết quả thử nghiệm các mô hình học máy cho thấy mô hình U-Net với kích thước ảnh đầu vào 256×256 đạt độ chính xác cao nhất, vượt trội so với các mô hình học máy truyền thống (RF, SVM) và các kiến trúc mạng khác. Mô hình này đã được áp dụng hiệu quả để giải đoán đường bờ trong và đường bờ ngoài tại các khu vực trọng điểm gồm Vịnh Đà Nẵng, Cửa Đại và Núi Thành.

6. Trên cơ sở kết quả nhận dạng và phân tích biến động, luận án đã làm rõ thực trạng và xu thế biến động bờ biển tại các khu vực nghiên cứu. Vịnh Đà Nẵng có xu hướng ổn định tương đối, với xói lở cục bộ phía nam sông Cu Đê và bồi tụ tại khu vực chân đèo Hải Vân. Khu vực Cửa Đại có xu thế xói lở chi phối, tốc độ xói lở trung bình khoảng $1,25 \text{ m/năm}$, trong đó phường Cửa Đại ghi nhận mức xói lở lớn nhất lên tới $-41,6 \text{ m/năm}$, trong khi khu vực Duy Hải có xu hướng bồi tụ. Khu vực Núi Thành chịu ảnh hưởng mạnh của sự chuyển dịch dòng chảy cửa sông Trường Giang, với biên độ biến động lớn tại Cửa Lở; xét tổng thể, khu vực này có xu thế bồi tụ nhẹ, khoảng $0,3 \text{ m/năm}$.

7. Các kết quả nghiên cứu không chỉ có ý nghĩa khoa học trong việc làm rõ cơ chế biến đổi hình thái bờ biển, mà còn cung cấp cơ sở thực tiễn cho công tác giám sát, cảnh báo và quản lý vùng bờ. Việc sử dụng đường bờ trong làm ranh giới chuẩn giúp nâng cao độ tin cậy của đánh giá biến động dài hạn, qua đó hỗ trợ hiệu quả cho quy hoạch không gian ven biển và xác định hành lang bảo vệ bờ biển tại thành phố Đà Nẵng và các khu vực có điều kiện tương tự.

II. Kiến nghị:

1. Đề triển khai và áp dụng lâu dài kết quả nghiên cứu trong giám sát biến động đường bờ biển, cần chuẩn hóa và tích hợp quy trình ứng dụng viễn thám và học máy, trọng tâm là kết hợp dữ liệu UAV và mô hình U-Net 256 , từ thu thập, xử lý ảnh đến trích xuất và quản lý dữ liệu không gian, đồng thời tích hợp trực tiếp vào hệ thống GIS quản lý vùng bờ và gắn với đào tạo, chuyển giao công nghệ cho các đơn vị địa phương.

2. Cần xây dựng cơ sở dữ liệu ảnh UAV ven biển được cập nhật định kỳ, kết hợp với dữ liệu lịch sử để hình thành chuỗi dữ liệu liên tục phục vụ phân tích xói lở – bồi tụ dài hạn và quản lý vùng bờ; đồng thời, trong các nghiên cứu tiếp theo, cần mở rộng tích hợp dữ liệu SAR, Lidar và các yếu tố động lực biển nhằm nâng cao độ chính xác và khả năng dự báo biến động đường bờ.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. **Giang Tuan Linh**, Bui Quang Thanh, Nguyen Thi Dieu Linh, Dang Van Bao, Truong Quang Hai, Phan Trong Trinh, Nguyen Hieu, Ngo Van Liem, Tran Van Trung, Muhammad Yasir, Dang Kinh Bac (2023), “Coastal landscape classification using convolutional neural network and remote sensing data in Vietnam”, *Journal of Environmental Management*, Volume 335, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117537>
2. **Giang Tuan Linh**, Dang Kinh Bac, Bui Quang Thanh (2023), “Coastline and shoreline change assessment in sandy coasts based on machine learning models and high-resolution satellite images”, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 45 (2), 251-270, 2023 DOI: <https://doi.org/10.15625/2615-9783/18407>
3. **Giang Tuấn Linh** và Đặng Kinh Bắc (2024), “Nghiên cứu cơ sở thực tiễn ứng dụng trí tuệ nhân tạo và viễn thám trong đánh giá biến động đường bờ biển Việt Nam”, Sách *Nghiên cứu và đào tạo Việt Nam học: Những vấn đề lý luận và thực tiễn (Research and training in Vietnamese studies: Theoretical and Practical Issue)*. NXB Đại học Quốc gia Hà Nội. ISBN: 978-604-43-4414-0.
4. Nguyễn Diệu Linh, Đặng Kinh Bắc, Phạm Thị Phương Nga, **Giang Tuấn Linh**, 2024, “Đánh giá biến động giá trị dịch vụ hệ sinh thái vùng cửa sông Thu Bồn, tỉnh Quảng Nam”, *Tạp chí Nghiên cứu Địa lý nhân văn*, số 1(42), ISSN 2354-0648.
5. Phạm Thị Phương Nga, Đặng Văn Bào, **Giang Tuấn Linh**, Đặng Kinh Bắc (2024), “Nghiên cứu đánh giá tiềm năng tài nguyên địa mạo cho phát triển du lịch đởi bờ biển Đà Nẵng – Quảng Ngãi”, *Kỷ yếu hội nghị khoa học Địa lý toàn quốc lần thứ XIV “Khoa học Địa lý Việt Nam với chuyển đổi số phục vụ phát triển bền vững trong bối cảnh biến đổi toàn cầu”*, Quyển 1. ISBN: 978-604-41-3801-5
6. Dang Kinh Bac, **Giang Tuan Linh** (2025), “Deep learning-assisted detection of coastline shifts at Cua Dai, Vietnam”, book *Advances in the Earth, Mining and Environmental Sciences for Safe and Sustainable Development*, Volume 2, Publish House for Science and Technology, ISBN: 978-604-357-453-1
7. **Giang Tuấn Linh**, Nguyễn Thị Chinh, Đặng Kinh Bắc, Nguyễn Quốc Cường (2025), “Ứng dụng mô hình học sâu và DSAS trong đánh giá biến động đường bờ vịnh Đà Nẵng”, *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ- Địa chất*, 1, 67 (Dec, 2025), 41-53. DOI:[https://doi.org/10.46326/JMES.2026.67\(1\).04](https://doi.org/10.46326/JMES.2026.67(1).04).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tài liệu tiếng Việt.

1. Lê Đức An, Ưông Đình Khanh, (2012), Địa mạo Việt Nam: Cấu trúc - Tài nguyên - Môi trường, *NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội*.
2. Đào Đình Bắc (chủ nhiệm), (2001), Nghiên cứu tai biến thiên nhiên trên cơ sở phương pháp địa mạo phục vụ phát triển đô thị dải đồng bằng ven biển Đà Nẵng – Quảng Ngãi, In *Báo cáo tổng kết đề tài cấp ĐHQGHN*.
3. Đặng Văn Bào (chủ nhiệm), (2020), Luận cứ khoa học cho việc thiết lập và giải pháp quản lý hành lang bảo vệ bờ biển Việt Nam, In *Báo cáo tổng hợp đề tài cấp quốc gia mã số: KC.09.17/16-20*.
4. Phạm Duy Huy Bình, Hoàng Thu Thảo, Nguyễn Thanh Bình, (2021), Đánh giá biến động cửa sông Tiên Châu, tỉnh Phú Yên bằng công nghệ viễn thám, *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, 722, 77–88. [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2021\(722\).77-88](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2021(722).77-88)
5. Đào Đình Châm (chủ nhiệm), (2020), Nghiên cứu đánh giá các yếu tố thủy thạch động lực ảnh hưởng đến các quá trình bồi, xói vùng cửa sông, ven bờ từ Quảng Nam đến Phú Yên trong điều kiện biến đổi khí hậu, nước biển dâng, In *Báo cáo tổng hợp đề tài cấp quốc gia mã số KC.09.03/16-20*.
6. Cục thống kê thành phố Đà Nẵng, (2022), *Niên giám thống kê các năm 2018, 2022 (thành phố Đà Nẵng và các quận ven biển)*.
7. Cục thống kê tỉnh Quảng Nam, (2022), *Niên giám thống kê năm các năm 2018, 2022 (tỉnh Quảng Nam và thành phố Hội An, các huyện ven biển)*.
8. Nguyễn Hải Đông, Đỗ Thị Phương Thảo, Doãn Thị Thái Hòa, Trần Thị Hiền, (2019), Kết hợp sử dụng ảnh viễn thám Landsat và Sentinel-2 trong giám sát biến động bờ biển khu vực tỉnh Quảng Nam, *Tạp chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường*, 28.
9. Tran, P. H., (2018), Assessing the Shoreline Changes in Tra Vinh Province using Multi-Temporal Remote Sensing Data, *Vietnam Journal of Science and Technology*, 56(5), 612–624. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/56/5/10944>
10. Phạm Hoàng Hải (chủ nhiệm), (2024), Nghiên cứu đánh giá xói lở, bồi tụ, tạo đảo và đề xuất giải pháp tổng thể nhằm ổn định vùng cửa sông Thu Bồn, tỉnh Quảng Nam, In *Báo cáo đề tài cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường, mã số TNMT.562.08*.
11. Nguyễn Hiệu, Đặng Văn Bào, (2009), Biến động địa hình vùng hạ lưu sông Thu Bồn: quá khứ và hiện tại – trong mối liên quan với quá trình phát triển và bảo tồn đô thị cổ Hội An, *Thông báo báo khoa học, Viện Văn hóa nghệ thuật Việt Nam*, 26-1/2009, 65–75.
12. Nguyễn Tiên Hoàng, Trần Hữu Tuyên, Nguyễn Đình Hòe, (2011), Nghiên cứu sử dụng ảnh vệ tinh để nhận diện sự biến động đường bờ biển tỉnh Thừa Thiên Huế, *Chuyên san khoa học Tự nhiên*, 65(2).
13. Lê Xuân Hồng, Lê Kim Thoa, (2007), *Địa mạo bờ biển Việt Nam*, NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội.
14. Cát Nguyên Hùng (chủ biên), (1995), *Báo cáo đo vẽ địa chất và điều tra khoáng sản nhóm từ Đà Nẵng – Hội An*, Lưu trữ địa chất.
15. Lê Đình Màu, (2006), Đặc điểm biến đổi đường bờ tại khu vực Cửa Đại (Hội An) từ năm 1965 đến 2003, In *Tuyển Tập Nghiên Cứu Biển* (pp. 38–48), Nhà

- xuất bản Khoa Học và Kỹ Thuật.
16. Vũ Văn Phái (2009), Nghiên cứu về xói lở bờ biển Việt Nam và biến đổi khí hậu toàn cầu, *Môi trường và phát triển bền vững trong bối cảnh biến đổi khí hậu*, tr233--240.
 17. Vũ Văn Phái, Đặng Văn Bào, (1992), Đặc điểm địa mạo khu vực Hội An và lân cận (vùng cửa sông Thu Bồn), In *Đô thị cổ Hội An* (pp. 87–100), NXB Khoa học Xã hội, Hà Nội.
 18. .Phái Vũ, V. P., Hoàng, T. V., Vũ, T. A., (2006), Xói lở bờ biển và quản lý môi trường bờ biển Việt Nam, *Tuyển tập các báo cáo Hội nghị Khoa học Địa lý toàn quốc lần thứ II*, 42–45.
 19. Phòng quân sự, T. cục kỹ thuật quốc phòng M., (2005), *Địa Chất Đới Bờ - (Trịnh Lê Hà dịch)*, NXB ĐH Quốc gia Hà Nội.
 20. Phan, V. T. P., Phạm, T. H. H., Bùi, T. L., (2023), Ứng dụng viễn thám, GIS đánh giá phạm vi và mức độ xói lở bờ biển Đồng bằng sông Cửu Long, đoạn từ Tiên Giang đến Sóc Trăng, *Tạp chí Khí tượng thủy văn*, 754(10).
 21. . Phạm, Q. S., Nguyễn, Đ. A., (2016), Diễn biến xói lở - bồi tụ ven biển hải hậu (tỉnh Nam Định) và vùng lân cận trong hơn 100 năm qua trên cơ sở phân tích tài liệu bản đồ địa hình và tư liệu viễn thám đa thời gian, *Vietnam journal of earth sciences*, 38(1). <https://doi.org/10.15625/0866-7187/38/1/7852>
 22. Nguyễn Tiến Thành, (2022), Phân tích và đánh giá diễn biến xói lở và bồi tụ ở khu vực tỉnh Quảng Nam bằng ảnh viễn thám và GIS, *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, 737(5), 15–25. [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022\(737\).15-25](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022(737).15-25)
 23. Nguyễn, N. T., Nnk, (2018), Phân tích biến động đường bờ khu vực bờ biển cửa sông Hậu bằng tư liệu viễn thám, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ biển, tập 17, số 4*.
 24. Trần, V. T., Doãn, H. P., (2017), Sử dụng ảnh viễn thám và gis nghiên cứu biến động đường bờ biển khu vực mũi Cà Mau, *Tạp chí Khí tượng thủy văn*, 35–40.
 25. Trần, T. T., Trần, Đ. H., (2023), Nghiên cứu ứng dụng ảnh Sentinel 2 đánh giá diễn biến đường bờ và biến đổi địa hình đáy biển khu vực cửa Nhật Lệ, Quảng Bình, *Tạp chí Khí tượng thủy văn*, 746, 1–11.
 26. Ninh Thu Trang, Nguyễn Quang Minh, Nguyễn Thái Sơn, Nguyễn Minh Hải, Nguyễn Anh Ngọc, (2023), Nghiên cứu diễn biến đường bờ và quá trình xói lở - bồi tụ dải ven biển thành phố Đà Nẵng, *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, 10(754), 101–113. [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023\(754\).101-113](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2023(754).101-113)
 27. . Bùi, T. K. T., Nguyễn, M. C., (2018), Phân Tích Biến Động Của Đường Bờ Biển Nha Trang, Tỉnh Khánh Hoà Ứng Dụng Công Nghệ Viễn Thám Và Hệ Thông Tin Địa Lý, *Khoa Học Kỹ Thuật Thủy Lợi Và Môi Trường*, 63. <https://earthexplorer.usgs.gov>.
 28. Nguyễn, V. T., Nguyễn, V. K., (2016), Quan trắc sự biến động đường bờ sử dụng dữ liệu vệ tinh LANDSAT đa thời gian ở khu vực Cửa Đại, Sông Thu Bồn, Quảng Nam, *Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ- Địa chất*, 57.
 29. Phạm Bá Trung, Nguyễn Hữu Sửu, (2002), Sự biến đổi địa hình bờ và đáy khu vực Cửa Đại (Hội An) tỉnh Quảng Nam, từ năm 1999 đến 2001, In *Tuyển tập báo cáo Khoa học Hội thảo khoa học “Biển Đông-2002” 2* (pp. 93–104), Nxb

Nông Nghiệp.

30. Trần, T. T., (2004), Tính toán vận chuyển bùn cát và nghiên cứu diễn biến đường đoạn Cửa Đại - Quảng Nam bằng mô hình UNIBEST, *Tạp chí khoa học Kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, 11(7), 128–140.

Tài liệu tiếng anh

31. Aagaard, T., Davidson-Arnott, R., Greenwood, B., Nielsen, J., (2004), Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution, *Geomorphology*, 60(1–2), 205–224. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.08.002>
32. Adeli, S., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L. J., Chapman, B., (2021), Moving Toward L-Band NASA-ISRO SAR Mission (NISAR) Dense Time Series: Multipolarization Object-Based Classification of Wetlands Using Two Machine Learning Algorithms, *Earth and Space Science*, 8(11). <https://doi.org/10.1029/2021EA001742>
33. Aedla, R., Dwarakish, G. S., Reddy, D. V., (2015), Automatic Shoreline Detection and Change Detection Analysis of Netravati-GurpurRivermouth Using Histogram Equalization and Adaptive Thresholding Techniques, *Aquatic Procedia*, 4, 563–570. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.073>
34. Aghdami-Nia, M., Shah-Hosseini, R., Rostami, A., Homayouni, S., (2022), Automatic coastline extraction through enhanced sea-land segmentation by modifying Standard U-Net, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 109, 102785. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102785>
35. Allan, J. C., Komar, P. D., Priest, G. R., (2003), Shoreline Variability on the High-Energy Oregon Coast and its Usefulness in Erosion-Hazard Assessments, *Journal of Coastal Research, SPECIAL ISSUE NO. 38.*, 83–105. <https://www.jstor.org/stable/25736601>
36. Andréfouët, S., Robinson, J. A., Hu, C., Feldman, G. C., Salvat, B., Payri, C., Muller-Karger, F. E., (2003), Influence of the spatial resolution of SeaWiFS, Landsat-7, SPOT, and International Space Station data on estimates of landscape parameters of Pacific Ocean atolls, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(2), 210–218. <https://doi.org/10.5589/m02-086>
37. Anfuso, G., Martínez Del Pozo, J. A., (2005), Towards management of coastal erosion problems and human structure impacts using GIS tools: case study in Ragusa Province, Southern Sicily, Italy, *Environmental Geology* 2005 48:4, 48(4), 646–659. <https://doi.org/10.1007/S00254-005-1322-2>
38. Apostolopoulos, D., Nikolakopoulos, K., (2021), A review and meta-analysis of remote sensing data, GIS methods, materials and indices used for monitoring the coastline evolution over the last twenty years, *European Journal of Remote Sensing*, 54(1), 240–265. <https://doi.org/10.1080/22797254.2021.1904293>
39. Aryal, B., Escarzaga, S. M., Vargas Zesati, S. A., Velez-Reyes, M., Fuentes, O., Tweedie, C., (2021), Semi-automated semantic segmentation of arctic shorelines using very high-resolution airborne imagery, spectral indices and weakly supervised machine learning approaches, *Remote Sensing*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/rs13224572>
40. Aurrocochea, I., Pethick, J. S., (1986), The Coastline its Physical and Legal

- Definition, *International Journal of Estuarine and Coastal Law*, 1(1), 29–42. <https://doi.org/10.1163/187529986X00032>
41. Ayalke, Z. G., Şişman, A., Akpınar, K., (2023), Shoreline extraction and analyzing the effect of coastal structures on shoreline changing with remote sensing and geographic information system: Case of Samsun, Turkey, *Regional Studies in Marine Science*, 61, 102883. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102883>
 42. Bartsch, A., Ley, S., Nitze, I., Pointner, G., Vieira, G., (2020), Feasibility Study for the Application of Synthetic Aperture Radar for Coastal Erosion Rate Quantification Across the Arctic, *Frontiers in Environmental Science*, 8(September), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00143>
 43. Behling, R., Milewski, R., Chabrillat, S., (2018), Spatiotemporal shoreline dynamics of Namibian coastal lagoons derived by a dense remote sensing time series approach, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 68, 262–271. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.009>
 44. Bengoufa, S., Niculescu, S., Mihoubi, M. K., Belkessa, R., Rami, A., Rabehi, W., Abbad, K., (2021), Machine learning and shoreline monitoring using optical satellite images: case study of the Mostaganem shoreline, Algeria, *Journal of Applied Remote Sensing*, 15(02). <https://doi.org/10.1117/1.jrs.15.026509>
 45. Berhane, T. M., Lane, C. R., Wu, Q., Autrey, B. C., Anenkhonov, O. A., Chepinoga, V. V., Liu, H., (2018), Decision-tree, rule-based, and random forest classification of high-resolution multispectral imagery for wetland mapping and inventory, *Remote Sensing*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/rs10040580>
 46. Binh, T. Van, Mau, L. D., Phai, V. Van, (2019), Some issues of geomorphology to serve coastal environmental management of Quang Nam province, *Tap chí Khoa học và Công nghệ biển*, 19(4A), 79–91. <https://doi.org/10.15625/1859-3097/19/4A/14599>
 47. Bird, E. C. F., (1985), Coastline changes: a global review., *Coastline changes: a global review*. <https://doi.org/10.2307/632970>
 48. Bird, E. C. F., (2008), *Coastal Geomorphology: An Introduction* (2nd ed), John Wiley & Sons, Ltd.
 49. Boak, E. H., Turner, I. L., (2005), Shoreline Definition and Detection: A Review, *Journal of Coastal Research*, 214(214), 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
 50. Boggs, G. S., (2010), Assessment of SPOT 5 and QuickBird remotely sensed imagery for mapping tree cover in savannas, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(4), 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.11.001>
 51. Boukhennaf, A., Mezouar, K., (2023), Long and short-term evolution of the Algerian coastline using remote sensing and GIS technology, *Regional Studies in Marine Science*, 61, 102893. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102893>
 52. Burningham, H., Fernandez-Nunez, M., (2020), Shoreline change analysis, In *Sandy Beach Morphodynamics* (pp. 439–460), Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00019-9>
 53. Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Palomar-Vázquez, J., Fernández-

- Sarría, A., (2019), Characterizing beach changes using high-frequency Sentinel-2 derived shorelines on the Valencian coast (Spanish Mediterranean), *Science of The Total Environment*, 691, 216–231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.084>
54. Çelik, O. İ., Gazioğlu, C., (2022), Coast type based accuracy assessment for coastline extraction from satellite image with machine learning classifiers, *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(1), 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.01.010>
 55. Cervantes, J., Garcia-Lamont, F., Rodríguez-Mazahua, L. Lopez, A., (2020), A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends, *Neurocomputing*, 408, 189–215.
 56. Cheng, D., Meng, G., Xiang, S., Pan, C., (2016), Efficient sea–land segmentation using seeds learning and edge directed graph cut, *Neurocomputing*, 207, 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.04.020>
 57. Choung, Y. J., Jo, M. H., (2017), Comparison between a Machine-Learning-Based Method and a Water-Index-Based Method for Shoreline Mapping Using a High-Resolution Satellite Image Acquired in Hwado Island, South Korea, *Journal of Sensors*, 2017(2009). <https://doi.org/10.1155/2017/8245204>
 58. Chu, Z., Tian, T., Feng, R., Wang, L., (2019), Sea-Land Segmentation With Res-UNet And Fully Connected CRF, *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3840–3843. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8900625>
 59. Correll-Brown, R., Wellman, E. H., Eulie, D. O., Scyphers, S. B., Smith, C. S., Polk, M. A., Gittman, R. K., (2022), Shifting Baselines May Undermine Shoreline Management Efforts in the United States, *Frontiers in Climate*, 4. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.719109>
 60. Cover, T. M., Hart, P. E., (1967), Nearest Neighbor Pattern Classification, *IEEE Transactions on Information Theory*, 13(1), 21–27. <https://doi.org/10.1109/TIT.1967.1053964>
 61. Cui, B., Jing, W., Huang, L., Li, Z., Lu, Y., (2021), SANet: A Sea-Land Segmentation Network Via Adaptive Multiscale Feature Learning, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 116–126. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3040176>
 62. Dang, K. B., Dang, V. B., Ngo, V. L., Vu, K. C., Nguyen, H., Nguyen, D. A., Nguyen, T. D. L., Pham, T. P. N., Giang, T. L., Nguyen, H. D., Hieu Do, T., (2022), Application of deep learning models to detect coastlines and shorelines, *Journal of Environmental Management*, 320(March), 115732. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115732>
 63. Dang, K. B., Giang, T. L., Dang, V. B., Phan, T. T., Truong, Q. H., Ngo, V. L., Do, T. H., Dang, N. V., Forino, G., (2024), Deep learning models integrating multi-sensor and -temporal remote sensing to monitor landslide traces in Vietnam, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 105(March), 104391. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104391>
 64. Dang, K. B., Nguyen, M. H., Nguyen, D. A., Phan, T. T. H., Giang, T. L., Pham, H. H., Nguyen, T. N., Van Tran, T. T., Bui, D. T., (2020), Coastal wetland classification with deep u-net convolutional networks and sentinel-2 imagery:

- A case study at the tien yen estuary of vietnam, *Remote Sensing*, 12(19), 1–26. <https://doi.org/10.3390/rs12193270>
65. Ding, Z., Su, F., Zhang, J., Zhang, Y., Luo, S., Tang, X., (2019), Clustering coastal land use sequence patterns along the sea-land direction: A case study in the coastal zone of Bohai Bay and the Yellow River Delta, China, *Remote Sensing*, 11(17). <https://doi.org/10.3390/rs11172024>
 66. Doherty, Y., Harley, M. D., Vos, K., Splinter, K. D., (2022), A Python toolkit to monitor sandy shoreline change using high-resolution PlanetScope cubesats, *Environmental Modelling & Software*, 157, 105512. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105512>
 67. Dolan, R., Fenster, M. S., Holme, S. J., (1991), Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion, *Journal of Coastal Research*, 7(3). <https://journals.flvc.org/jcr/article/view/78527>
 68. Donald E. Guy, J., (1999), Erosion Hazard Area Mapping, Lake County, Ohio, *Journal of Coastal Research, Special Issue NO. 28*, 185–196. <https://www.jstor.org/stable/25736195>
 69. Emanuele Alcaras, Pier Paolo Amoroso, Francesco Giuseppe Figliomeni, C. P. & A. V., (2022), *Machine Learning Approaches for Coastline Extraction from Sentinel-2 Images: K-Means and K-Nearest Neighbour Algorithms in Comparison*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-17439-1_27
 70. Enguehard, L., Falco, N., Schmutz, M., Newcomer, M. E., Ladau, J., Brown, J. B., Bourgeau-Chavez, L., Wainwright, H. M., (2022), Machine-Learning Functional Zonation Approach for Characterizing Terrestrial–Aquatic Interfaces: Application to Lake Erie, *Remote Sensing*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/rs14143285>
 71. Esmail, M., Mahmod, W. E., Fath, H., (2019), Assessment and prediction of shoreline change using multi-temporal satellite images and statistics: Case study of Damietta coast, Egypt, *Applied Ocean Research*, 82, 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.11.009>
 72. Farris, A. S., List, J. H., (2007), Shoreline Change as a Proxy for Subaerial Beach Volume Change, *Journal of Coastal Research*, 233, 740–748. <https://doi.org/10.2112/05-0442.1>
 73. Feng, J., Wang, S., Gu, Z., (2024), A novel sea-land segmentation network for enhanced coastline extraction using satellite remote sensing images, *Advances in Space Research*, 74(5), 2200–2213. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.06.011>
 74. Ferreira, B., Silva, R. G., Iten, M., (2022), Earth Observation Satellite Imagery Information Based Decision Support Using Machine Learning, *Remote Sensing*, 14(15), 3776. <https://doi.org/10.3390/rs14153776>
 75. Ferreira, Ó., Garcia, T., Matias, A., Taborda, R., Dias, J. A., (2006), An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores, *Continental Shelf Research*, 26(9), 1030–1044. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.12.016>
 76. Figliomeni, F. G., Specht, M., Parente, C., Specht, C., Stateczny, A., (2024), Modeling and Accuracy Assessment of Determining the Coastline Course Using Geodetic, Photogrammetric and Satellite Measurement Methods: Case

- Study in Gdynia Beach in Poland, *Electronics*, 13(2), 412. <https://doi.org/10.3390/electronics13020412>
77. Fogarin, S., Zanetti, M., Dal Barco, M. K., Zennaro, F., Furlan, E., Torresan, S., Pham, H. V., Critto, A., (2023), Combining remote sensing analysis with machine learning to evaluate short-term coastal evolution trend in the shoreline of Venice, *Science of the Total Environment*, 859(November 2021), 160293. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160293>
 78. Foody, G. M., Mathur, A., (2004), Toward intelligent training of supervised image classifications: Directing training data acquisition for SVM classification, *Remote Sensing of Environment*, 93(1–2), 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.017>
 79. Foody, G. M., Muslim, A. M., Atkinson, P. M., (2005), Super-resolution mapping of the waterline from remotely sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, 26(24), 5381–5392. <https://doi.org/10.1080/01431160500213292>
 80. Ford, M., (2013), Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands, *Remote Sensing of Environment*, 135, 130–140. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.027>
 81. Gentleman, R., Hornik, K., Parmigiani, G., Wickham, H., (2008), Applied Spatial Data Analysis with R, In *Media*, Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78171-6>
 82. Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N., Rooney, J. J., (2007), The Predictive Accuracy of Shoreline Change Rate Methods and Alongshore Beach Variation on Maui, Hawaii, <https://doi.org/10.2112/05-0521.1>, 2007(231), 87–105. <https://doi.org/10.2112/05-0521.1>
 83. Giang, T. L., Bui, Q. T., Nguyen, T. D. L., Dang, V. B., Quang, H. T., Phan, T. T., Nguyen, H., Ngo, V. L., Tran, V. T., Muhammad, Y., Dang, K. B., (2023), Coastal landscape classification using convolutional neural network and remote sensing data in Vietnam, *Journal of Environmental Management*, 335, 117537. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117537>
 84. Gonçalves, G., Santos, S., Duarte, D., Gomes, J., (2019), Monitoring Local Shoreline Changes by Integrating UASs, Airborne LiDAR, Historical Images and Orthophotos, *Proceedings of the 5th International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management*, 126–134. <https://doi.org/10.5220/0007744101260134>
 85. Gordana, K., Avdan, U., (2019), Evaluating Sentinel-2 Red-Edge Bands for Wetland Classification, *Proceedings*, 18(1), 12. <https://doi.org/10.3390/ecrs-3-06184>
 86. Guariglia, A., Buonamassa, A., Losurdo, A., Saladino, R., Trivigno, M. L., Zaccagnino, A., Colangelo, A., (2006), A multisource approach for coastline mapping and identification of shoreline changes, *Annals of Geophysics*, 49(1). <https://doi.org/10.4401/ag-3155>
 87. Hong, P. V., Tuan, T. A., Nguyet, N. T. A., (2019), Application of remote sensing and GIS for assessing the level of change of land use status in the coast of Ngoc Hien district (Ca Mau province) due to the impact of sea level rise, *Tap*

- chí Khoa học và Công nghệ biển*, 19(3B), 227–237.
<https://doi.org/10.15625/1859-3097/19/3B/14528>
88. Hossen, M. F., Sultana, N., (2023), Shoreline change detection using DSAS technique: Case of Saint Martin Island, Bangladesh, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 30, 100943.
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100943>
 89. Huang, H., Lin, L., Tong, R., Hu, H., Zhang, Q., Iwamoto, Y., Han, X., Chen, Y. W., Wu, J., (2020), UNet 3+: A Full-Scale Connected UNet for Medical Image Segmentation, *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, 2020-May(ii), 1055–1059.
<https://doi.org/10.1109/ICASSP40776.2020.9053405>
 90. IPCC, (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basic. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
 91. Jensen, D. J., Cavanaugh, K. C., Thompson, D. R., Fagherazzi, S., Cortese, L., Simard, M., (2022), Leveraging the Historical Landsat Catalog for a Remote Sensing Model of Wetland Accretion in Coastal Louisiana, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 127(6), 1–15.
<https://doi.org/10.1029/2022JG006794>
 92. Jo, T., (2021), *Machine Learning Foundations Supervised, Unsupervised, and Advanced Learning*, Springer Cham.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-65900-4>
 93. Jong-sen Lee, Jurkevich, I., (1990), Coastline Detection And Tracing In SAR Images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(4), 662–668. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1990.572976>
 94. Kaichang, D., Ruijin, M., Rongxing, L., (2003), Geometric Processing of Ikonos Stereo Imagery for Coastal Mapping Applications, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(8), 873–879.
<https://doi.org/10.14358/PERS.69.8.873>
 95. Kalkan, K., Bayram, B., Maktav, D., Sunar, F., (2013), Comparison of support vector machine and object based classification methods for coastline detection, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W2(7W2), 125–127.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W2-125-2013>
 96. Kim, H., Lee, S. B., Min, K. S., (2017), Shoreline Change Analysis using Airborne LiDAR Bathymetry for Coastal Monitoring, *Journal of Coastal Research*, 79, 269–273. <https://doi.org/10.2112/SI79-055.1>
 97. Kuhn, D., Prüfer, S., (2014), Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany, *Geomorphology*, 213, 153–165.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.005>
 98. Kurniawan, I. A., Marfai, M. A., (2020), Shoreline changes analysis of Kendal Coastal Area, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 451(1), 012056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/451/1/012056>
 99. Lafon, V., Dupuis, H., Howa, H., Froidefond, J.-M., (2002), Determining ridge

- and runnel longshore migration rate using Spot imagery, *Oceanologica Acta*, 25(3–4), 149–158. [https://doi.org/10.1016/S0399-1784\(02\)01190-8](https://doi.org/10.1016/S0399-1784(02)01190-8)
100. Lentz, E. E., Hapke, C. J., (2011), Geologic framework influences on the geomorphology of an anthropogenically modified barrier island: Assessment of dune/beach changes at Fire Island, New York, *Geomorphology*, 126(1–2), 82–96. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.032>
 101. Li, R., Liu, W., Yang, L., Sun, S., Hu, W., Zhang, F., Li, W., (2018), DeepUNet: A Deep Fully Convolutional Network for Pixel-Level Sea-Land Segmentation, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(11), 3954–3962. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2833382>
 102. Li, R., Ma, R., Di, K., (2002), Digital Tide-Coordinated Shoreline, *Marine Geodesy*, 25(1–2), 27–36. <https://doi.org/10.1080/014904102753516714>
 103. Liêm, N. V., Bào, Đ. V., Kinh, B., (2020), Phân loại bờ biển theo điều kiện địa chất – địa mạo phục vụ thiết lập hành lang bảo vệ bờ biển Việt Nam, *Tạp chí địa chất*, A(373), 160–175.
 104. Liu, H., Sherman, D., Gu, S., (2007), Automated Extraction of Shorelines from Airborne Light Detection and Ranging Data and Accuracy Assessment Based on Monte Carlo Simulation, *Journal of Coastal Research*, 236, 1359–1369. <https://doi.org/10.2112/05-0580.1>
 105. Liu, P., Wang, C., Ye, M., Han, R., (2024), Coastal Zone Classification Based on U-Net and Remote Sensing, *Applied Sciences*, 14(16), 7050. <https://doi.org/10.3390/app14167050>
 106. Luijendijk, A., Hagenaars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., Aarninkhof, S., (2018), The State of the World’s Beaches, *Scientific Reports*, 8(1), 6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
 107. Luijendijk, A., Kras, E., Calkoen, F., Moreno-Rodenas, A., (2023), UNRAVELLING THE DRIVERS OF SHORELINE CHANGE, *Coastal Engineering Proceedings*, 37, 22. <https://doi.org/10.9753/icce.v37.management.22>
 108. Lv, Q., Wang, Q., Song, X., Ge, B., Guan, H., Lu, T., Tao, Z., (2024), Research on coastline extraction and dynamic change from remote sensing images based on deep learning, *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1443512>
 109. Manaf, S. A., Mustapha, N., Sulaiman, M. N., Husin, N. A., Abdul Hamid, M. R., (2018), Change analysis on historical shorelines extracted from medium resolution satellite images: A case study on the southern coast of Peninsular Malaysia, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 169(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012101>
 110. Manaf, S. A., Mustapha, N., Sulaiman, M. N., Husin, N. A., Shafri, H. Z. M., Razali, M. N., (2018), Hybridization of SLIC and extra tree for object based image analysis in extracting shoreline from medium resolution Satellite images, *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 11(1). <https://doi.org/10.22266/ijies2018.0228.07>
 111. Mao, Y., Harris, D. L., Xie, Z., Phinn, S., (2022), Global coastal geomorphology – integrating earth observation and geospatial data, *Remote*

- Sensing of Environment*, 278(May). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113082>
112. Middleton, J. H., Cooke, C. G., Kearney, E. T., Mumford, P. J., Mole, M. A., Nippard, G. J., Rizos, C., Splinter, K. D., Turner, I. L., (2013), Resolution and Accuracy of an Airborne Scanning Laser System for Beach Surveys, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(10), 2452–2464. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00174.1>
 113. Minghelli, A., Spagnoli, J., Lei, M., Chami, M., Charmasson, S., (2020), Shoreline Extraction from WorldView2 Satellite Data in the Presence of Foam Pixels Using Multispectral Classification Method, *Remote Sensing*, 12(16), 2664. <https://doi.org/10.3390/rs12162664>
 114. Misra, A., Ramakrishnan, B., (2020), Assessment of coastal geomorphological changes using multi-temporal Satellite-Derived Bathymetry, *Continental Shelf Research*, 207(July), 104213. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104213>
 115. Moore, L. J., Benumof, B. T., Griggs, G. B., (1999), Coastal Erosion Hazards in Santa Cruz and San Diego Counties, California, *Journal of Coastal Research, Special Issue NO. 28.*, 121–139. <https://www.jstor.org/stable/25736191>
 116. Morton, R. A., Speed, F. M., (1998), Evaluation of Shorelines and Legal Boundaries Controlled by Water Levels on Sandy Beaches, *Journal of Coastal Research*, Vol. 14 no. <https://journals.flvc.org/jcr/article/view/80736>
 117. Narumalani, S., Mishra, D. R., Burkholder, J., Merani, P. B. T., Willson, G., (2006), A comparative evaluation of ISODATA and spectral angle mapping for the detection of saltcedar using airborne hyperspectral imagery, *Geocarto International*, 21(2), 59–66. <https://doi.org/10.1080/10106040608542384>
 118. Nazeer, M., Waqas, M., Shahzad, M. I., Zia, I., Wu, W., (2020), Coastline Vulnerability Assessment through Landsat and Cubesats in a Coastal Mega City, *Remote Sensing*, 12(5), 749. <https://doi.org/10.3390/rs12050749>
 119. Ngo, V. L., Dang, V. B., Dang, K. B., Ngo, C. C., Pham, T. P. N., Benjamin, B., Giap, T. K. C., (2020), Assessment of shoreline changes for setback zone establishment from Son Tra (Da Nang city) to Cua Dai (Hoi An city), Vietnam, *Science of the Earth*, 42(2), 363–383. <https://doi.org/https://doi.org/10.15625/0866-7187/42/4/15410>
 120. Niedermeier, A., Romanessen, E., Lehner, S., (2000), Detection of coastlines in SAR images using wavelet methods, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2270–2281. <https://doi.org/10.1109/36.868884>
 121. Noamen, R., Rihem, M. E. F., Zouhour, Y., Riadh, E. M., Sonia, G., (2024), Diachronic study of coastline behavior using remote sensing: a case study of Korba beach, Tunis, *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 9(2), 1033–1049. <https://doi.org/10.1007/s41207-024-00478-3>
 122. Nolet, C., Poortinga, A., Roosjen, P., Bartholomeus, H., Ruessink, G., (2014), Measuring and modeling the effect of surface moisture on the spectral reflectance of coastal beach sand, *PLoS ONE*, 9(11), 1–9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112151>
 123. Nunziata, F., Buono, A., Migliaccio, M., Benassai, G., Luccio, D. Di, (2018), Shoreline erosion of microtidal beaches examined with UAV and remote sensing techniques, *2018 IEEE International Workshop on Metrology for the*

- Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea)*, 162–166. <https://doi.org/10.1109/MetroSea.2018.8657843>
124. O’Connell, J. F., (2003), The art and science of mapping and interpreting shoreline change data: The Massachusetts experience., *Proceedings of the 13th Biennial Coastal Zone Conference, Baltimore, MD, USA*.
 125. Pan, Y., Pi, D., Khan, I. A., Meng, H., (2023), DUFuse: Deep U-Net for visual and infrared images fusion, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(9), 12549–12561. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-04323-9>
 126. Pandian, P. K., Ramesh, S., Murthy, M. V. R., Ramachandran, S., Thayumanavan, S., (2004), Shoreline Changes and Near Shore Processes Along Ennore Coast, East Coast of South India, [https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)20\[828:SCANSP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)20[828:SCANSP]2.0.CO;2), 20(3), 828–845. [https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)20](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)20)
 127. Pantanahiran, W., (2019), USING REMOTE SENSING DATA FOR CALCULATING THE COASTAL EROSION IN SOUTHERN THAILAND, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W7, 51–56. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W7-51-2019>
 128. Papakonstantinou, A., Topouzelis, K., Pavlogeorgatos, G., (2016), Coastline Zones Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spatial Data, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 5(6), 75. <https://doi.org/10.3390/ijgi5060075>
 129. Paravolidakis, V., Ragia, L., Moirogiorgou, K., Zervakis, M. E., (2018), Automatic coastline extraction using edge detection and optimization procedures, *Geosciences (Switzerland)*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/geosciences8110407>
 130. Pardo-Pascual, J., Sánchez-García, E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vázquez, J., Priego de los Santos, E., Fernández-Sarría, A., Balaguer-Beser, Á., (2018), Assessing the Accuracy of Automatically Extracted Shorelines on Microtidal Beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 Imagery, *Remote Sensing*, 10(2), 326. <https://doi.org/10.3390/rs10020326>
 131. Peng, S., Guo, C., Wu, X., Deng, L.-J., (2023), U2Net: A General Framework with Spatial-Spectral-Integrated Double U-Net for Image Fusion, *Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia*, 3219–3227. <https://doi.org/10.1145/3581783.3612084>
 132. Petropoulos, G. P., Kalivas, D. P., Griffiths, H. M., Dimou, P. P., (2015), Remote sensing and GIS analysis for mapping spatio-temporal changes of erosion and deposition of two Mediterranean river deltas: The case of the Axios and Aliakmonas rivers, Greece, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35(PB), 217–228. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.004>
 133. Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Ryirenda, V. R., Murayama, Y., Ranagalage, M., Oktaviani, N., Kusuma, H. A., Zhang, T., Su, J., Liu, C., Chen, W. H., Liu, H., Liu, G., Cavour, M., Duzgun, H. S., Kemec, S., Demirkan, D. C., Chaire, R., ... Peerbhay, K., (2019), Remote sensing Sentinel-2 Data for Land Cover / Use Mapping : A Review, *Remote Sensing*, 42(3), 14.

134. Piragnolo, M., Masiero, A., Pirotti, F., (2017), Comparison of Random Forest and Support Vector Machine classifiers using UAV remote sensing imagery, *Geophysical Research Abstracts EGU General Assembly*, 19(iii), 2017–15692. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-15692-1.pdf>
135. Plant, N. G., Aarninkhof, S. G. J., Turner, I. L., Kingston, K. S., (2007), The Performance of Shoreline Detection Models Applied to Video Imagery, *Journal of Coastal Research*, 2007(233), 658–670. [https://doi.org/https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2007\)23\[658:TPOSDM\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.2112/1551-5036(2007)23[658:TPOSDM]2.0.CO;2)
136. Poma, X. S., Sappa, A., Humanante, P., Arbarinia, A., (2021), *Dense Extreme Inception Network for Edge Detection*, 2439, 0–3. <http://arxiv.org/abs/2112.02250>
137. Powers, D. M. W., Ailab, (2020), *Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation*. <https://arxiv.org/pdf/2010.16061>
138. Pradeep, J., Shaji, E., Chandran C S, S., H, A., Chandra, S. S. V., Dev, S. G. D., Babu, D. S. S., (2022), Assessment of coastal variations due to climate change using remote sensing and machine learning techniques: A case study from west coast of India, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 275(February), 107968. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107968>
139. Priest, G. R., (1999), Coastal Shoreline Change Study Northern and Central Lincoln County, Oregon, *Journal of Coastal Research, Special Issue NO. 28*, 140–157. <https://www.jstor.org/stable/25736192>
140. Pucino, N., Kennedy, D. M., Carvalho, R. C., Allan, B., Ierodionou, D., (2021), Citizen science for monitoring seasonal-scale beach erosion and behaviour with aerial drones, *Scientific Reports*, 11(1), 3935. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83477-6>
141. Pucino, N., Kennedy, D. M., Young, M., Ierodionou, D., (2022), Assessing the accuracy of Sentinel-2 instantaneous subpixel shorelines using synchronous UAV ground truth surveys, *Remote Sensing of Environment*, 282(September), 113293. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113293>
142. Puskarczyk, E., (2019), Artificial neural networks as a tool for pattern recognition and electrofacies analysis in Polish palaeozoic shale gas formations, *Acta Geophysica*, 67(6), 1991–2003. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00359-2>
143. Quang, D. N., Anh, N. Q. D., Tam, H. S., Tinh, N. X., Tanaka, H., Viet, N. T., (2023), Evaluation of Cua Lo Estuary’s Morpho-Dynamic Evolution and Its Impact on Port Planning, In *Journal of Marine Science and Engineering* (Vol. 11, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/jmse11030611>
144. Rahaman, M., Esraz-Ul-Zannat, M., (2021), Evaluating the impacts of major cyclonic catastrophes in coastal Bangladesh using geospatial techniques, *SN Applied Sciences*, 3(8). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04700-7>
145. Rahman, M. K., Crawford, T. W., Islam, M. S., (2022), Shoreline Change Analysis along Rivers and Deltas: A Systematic Review and Bibliometric Analysis of the Shoreline Study Literature from 2000 to 2021, *Geosciences*, 12(11), 410. <https://doi.org/10.3390/geosciences12110410>

146. Rajawat, A. S., Chauhan, H. B., Ratheesh, R., Rhode, S., Bhanderi, R. J., Mahapatra, M., Kumar, M., Yadav, R., Abraham, S. P., Singh, S. S., Keshri, K. N., (2014), Assessment of coastal erosion along Indian coast on 1 : 25, 000 scale using satellite data, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-8, 119–125. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-8-119-2014>
147. Reeve, D. E., Spivack, M., (2004), Evolution of shoreline position moments, *Coastal Engineering*, 51(8–9), 661–673. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.002>
148. Robin, M., (2002), *Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique.*, In Le Littoral, Regards, Pratiques et Savoirs; Baron-Yelles, N., Goeldner-Gionella, L., Velut, S., Eds.; Etudes Offertes à Fernand Verger Edition Rue d’Ulm; Presses Universitaires de l’Ecole Normale Supérieure: Paris, France, 2002;
149. Romagnoli, C., Mancini, F., Brunelli, R., (2006), Historical Shoreline Changes at an Active Island Volcano: Stromboli, Italy, *Journal of Coastal Research*, 224, 739–749. <https://doi.org/10.2112/05-0554.1>
150. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T., (2015), U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation, In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 9351, pp. 234–241). https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
151. Ruggiero, P., Kaminsky, G. M., Gelfenbaum, G., (2003), Linking Proxy-Based and Datum-Based Shorelines on a High-Energy Coastline: Implications for Shoreline Change Analyses, *Journal of Coastal Research, SPECIAL ISSUE NO. 38.*, 57–82.
152. Sagar, S., Roberts, D., Bala, B., Lymburner, L., (2017), Extracting the intertidal extent and topography of the Australian coastline from a 28 year time series of Landsat observations, *Remote Sensing of Environment*, 195, 153–169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.009>
153. Santos, C. A. G., Nascimento, T. V. M. do, Mishra, M., Silva, R. M. da, (2021), Analysis of long- and short-term shoreline change dynamics: A study case of João Pessoa city in Brazil, *Science of The Total Environment*, 769, 144889. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144889>
154. Schellekens, J., Amani, M., (2022), Coastal Erosion Detection Using Landsat Satellite Imagery and Support Vector Machine Algorithm, *Journal of Ocean Technology*, 17(2), 54–64.
155. Seale, C., Redfern, T., Chatfield, P., Luo, C., Dempsey, K., (2022), Coastline detection in satellite imagery: A deep learning approach on new benchmark data, *Remote Sensing of Environment*, 278(November 2021), 113044. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113044>
156. Shamsolmoali, P., Zareapoor, M., Wang, R., Zhou, H., Yang, J., (2019), A Novel Deep Structure U-Net for Sea-Land Segmentation in Remote Sensing Images, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(9), 3219–3232. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2925841>

157. Sheik, M., Chandrasekar, (2012), A shoreline change analysis along the coast between Kanyakumari and Tuticorin, India, using digital shoreline analysis system, *Taylor and Francis Group, LLC*.
158. Shenbagaraj, N., Mani, N. D., Muthukumar, M., (2014), Isodata Classification Technique to Assess the Shoreline Changes of Kolachel to Kayalpattanam Coast, *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(4), 311–314.
159. Slott, J. M., Murray, A. B., Ashton, A. D., Crowley, T. J., (2006), Coastline responses to changing storm patterns, *Geophysical Research Letters*, 33(18). <https://doi.org/10.1029/2006GL027445>
160. Sowmya, K., Sri, M. D., Bhaskar, A. S., Jayappa, K. S., (2019), Long-term coastal erosion assessment along the coast of Karnataka, west coast of India, *International Journal of Sediment Research*, 34(4), 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.12.007>
161. Stauble, D. K., (2003), The Use of Shoreline Change Mapping in Coastal Engineering Project Assessment, *Journal of Coastal Research, SPECIAL ISSUE NO. 38.*, 178–206. <https://www.jstor.org/stable/25736606>
162. Stive, M. J. ., Aarninkhof, S. G. ., Hamm, L., Hanson, H., Larson, M., Wijnberg, K. M., Nicholls, R. J., Capobianco, M., (2002), Variability of shore and shoreline evolution, *Coastal Engineering*, 47(2), 211–235. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00126-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00126-6)
163. Stutz, M. L., (2020), Coastal Erosion and Shoreline Change, In *Coastal and Marine Environments* (pp. 69–78), CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429441004-7>
164. Su, Y., Xu, H., Yan, L., (2017), Support vector machine-based open crop model (SBOCM): Case of rice production in China, *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24(3), 537–547. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.01.024>
165. Sun, W., Chen, C., Liu, W., Yang, G., Meng, X., Wang, L., Ren, K., (2023), Coastline extraction using remote sensing: a review, *GIScience & Remote Sensing*, 60(1). <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2243671>
166. SUNAMURA, T., (2015), Rocky coast processes: with special reference to the recession of soft rock cliffs, *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 91(9), 481–500. <https://doi.org/10.2183/pjab.91.481>
167. Tambe, R. G., Talbar, S. N., Chavan, S. S., (2021), Deep multi-feature learning architecture for water body segmentation from satellite images, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 77, 103141. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2021.103141>
168. Thieler, E. R., Hapke, C. J., (2011), *USGS science for the Nation's changing coasts; shoreline change assessment* (Fact Sheet). <https://doi.org/10.3133/fs20113074>
169. Think*, N. A., Hens, L., (2017), A Digital Shoreline Analysis System (DSAS) applied on mangrove shoreline changes along the Giao Thuy coastal area (Nam Dinh, Vietnam) during 2005-2014, *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 39(1). <https://doi.org/10.15625/0866-7187/39/1/9231>
170. Toure, S., Diop, O., Kpalma, K., Maiga, A. S., (2019), Shoreline detection using optical remote sensing: A review, *ISPRS International Journal of Geo-*

- Information*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/ijgi8020075>
171. Trần, T. V., Trịnh, T. B., (2009), Application of remote sensing for shoreline change detection in Cuu Long estuary, *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*, 25(4). <https://js.vnu.edu.vn/EES/article/view/1879>
 172. Trépanier, I., Dubois, J.-M. M., Bonn, F., (2002), Suivi de l'évolution du trait de cote a partir d'images HRV (XS) de SPOT: Application au delta du fleuve Rouge, Viet-nam, *International Journal of Remote Sensing*, 23(5), 917–937. <https://doi.org/10.1080/01431160110070348>
 173. Tsai, Y. L. S., (2022), Monitoring 23-year of shoreline changes of the Zengwun Estuary in Southern Taiwan using time-series Landsat data and edge detection techniques, *Science of the Total Environment*, 839(March), 156310. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156310>
 174. Tsiakos, C. A. D., Chalkias, C., (2023), Use of Machine Learning and Remote Sensing Techniques for Shoreline Monitoring: A Review of Recent Literature, *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/app13053268>
 175. Turner, I. L., Harley, M. D., Short, A. D., Simmons, J. A., Bracs, M. A., Phillips, M. S., Splinter, K. D., (2016), A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia, *Scientific Data*, 3(1), 160024. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.24>
 176. Tzepkenlis, A., Grammalidis, N., Kontopoulos, C., Charalampopoulou, V., Kitsiou, D., Pataki, Z., Patera, A., Nitis, T., (2022), An Integrated Monitoring System for Coastal and Riparian Areas Based on Remote Sensing and Machine Learning, *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/jmse10091322>
 177. Ustin, S. L., Middleton, E. M., (2021), Current and near-term advances in Earth observation for ecological applications, *Ecological Processes*, 10(1), 1–57. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00255-4>
 178. V, W. R., Whitman, D., Zhang, K., Leatherman, S. P., (2004), Mapping Shoreline Position Using Airborne Laser Altimetry, [https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)20\[884:MSPUAL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)20[884:MSPUAL]2.0.CO;2), 20(3), 884–892. [https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)20](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)20)
 179. Valderrama-Landeros, L., Flores-de-Santiago, F., (2019), Assessing coastal erosion and accretion trends along two contrasting subtropical rivers based on remote sensing data, *Ocean & Coastal Management*, 169, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.12.006>
 180. Vitousek, S., Buscombe, D., Vos, K., Barnard, P. L., Ritchie, A. C., Warrick, J. A., (2023), The future of coastal monitoring through satellite remote sensing, *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, 1. <https://doi.org/10.1017/cft.2022.4>
 181. Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., Turner, I. L., (2019), CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery, *Environmental Modelling & Software*, 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
 182. Vreugdenhil, M., Navacchi, C., Bauer-Marschallinger, B., Hahn, S., Steele-Dunne, S., Pfeil, I., Dorigo, W., Wagner, W., (2020), Sentinel-1 cross ratio and vegetation optical depth: A comparison over Europe, *Remote Sensing*, 12(20), 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs12203404>

183. Wang, D., Cui, X., Xie, F., Jiang, Z., Shi, Z., (2017), Multi-feature sea–land segmentation based on pixel-wise learning for optical remote-sensing imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 38(15), 4327–4347. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1317938>
184. Wang, Z., Liu, J., Li, J., Zhang, D. D., (2018), Multi-Spectral Water Index (MuWI): A Native 10-m Multi-Spectral Water Index for Accurate Water Mapping on Sentinel-2, *Remote Sensing*, 10(10), 1643. <https://doi.org/10.3390/rs10101643>
185. Wattelez, G., Dupouy, C., Juillot, F., (2022), Unsupervised Optical Classification of the Seabed Color in Shallow Oligotrophic Waters from Sentinel-2 Images: A Case Study in the Voh-Koné-Pouembout Lagoon (New Caledonia), *Remote Sensing*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/rs14040836>
186. Wei Jing, Binge Cui, Y. L., Huang, L., (2021), BS-Net: Using Joint-Learning Boundary and Segmentation Network for Coastline Extraction from Remote Sensing Images, *Remote Sensing Letters*, Volume 12(12), 1260–1268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1979271>
187. Woodroffe, C. D., (2002), *Coasts: Form, Process and Evolution*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316036518>
188. Yang, M., Zou, L., Cai, H., Qiang, Y., Lin, B., Zhou, B., Abedin, J., Mandal, D., (2022), Spatial-Temporal Land Loss Modeling and Simulation in a Vulnerable Coast: A Case Study in Coastal Louisiana, *Remote Sensing*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/rs14040896>
189. Young, A. P., (2018), Decadal-scale coastal cliff retreat in southern and central California, *Geomorphology*, 300, 164–175. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2017.10.010>
190. Young, A. P., Guza, R. T., Dickson, M. E., O'Reilly, W. C., Flick, R. E., (2013), Ground motions on rocky, cliffed, and sandy shorelines generated by ocean waves, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(12), 6590–6602. <https://doi.org/10.1002/2013JC008883>
191. Young, A. P., Guza, R. T., O'Reilly, W. C., Burvingt, O., Flick, R. E., (2016), Observations of coastal cliff base waves, sand levels, and cliff top shaking, *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(11), 1564–1573. <https://doi.org/10.1002/esp.3928>
192. Yu, L., Wang, Z., Tian, S., Ye, F., Ding, J., Kong, J., (2017), Convolutional Neural Networks for Water Body Extraction from Landsat Imagery, *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 16(01), 1750001. <https://doi.org/10.1142/S1469026817500018>
193. Yu, W., Yao, X., Shao, L., Liu, J., Shen, Y., Zhang, H., (2022), Classification of Desertification on the North Bank of Qinghai Lake, *Computers, Materials & Continua*, 72(1), 695–711. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.023191>
194. Yu, Y., Acton, S. T., (2004), Automated delineation of coastline from polarimetric SAR imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 25(17), 3423–3438. <https://doi.org/10.1080/0143116032000160444>
195. Yulianto, F., Suwarsono, Maulana, T., Khomarudin, M. R., (2019), Analysis of the dynamics of coastal landform change based on the integration of remote sensing and gis techniques: Implications for tidal flooding impact in

- pekalongan, central java, Indonesia, *Quaestiones Geographicae*, 38(3), 17–29.
<https://doi.org/10.2478/quageo-2019-0025>
196. Zhou, H., Wang, Z., Ma, W., He, T., Wan, H., Wang, J., Liang, S., (2022), Land Surface Albedo Estimation With Chinese GF-1 WFV Data in Northwest China, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 849–861. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3136852>
197. Zuzek, P. J., Nairn, R. B., Thieme, S. J., (2003), Spatial and temporal considerations for calculating shoreline change rates in the Great Lakes basin, *Journal of Coastal Research, SPECIAL ISSUE NO. 38*, 125–146.

PHỤ LỤC

Phụ lục 1: Danh sách 70 tài liệu thống kê việc ứng dụng viễn thám và học máy trong nghiên cứu biến động bờ biển

STT	Bài báo	Phương pháp giải đoán đường bờ	Ảnh viễn thám
1	Evaluating the impacts of major cyclonic catastrophes in coastal Bangladesh using geospatial techniques [144]	Maximum Likelihood Classifier, Random Forest, ANN	Landsat, Sentinel 2
2	Coastline detection in satellite imagery: A deep learning approach on new benchmark data [155]	U-Net model	Sentinel 2
4	Leveraging the historical Landsat catalog for a remote sensing model of wetland accretion in coastal Louisiana. [91]	Random Forest	Landsat
5	Spatial–Temporal Land Loss Modeling and Simulation in a Vulnerable Coast: A Case Study in Coastal Louisiana. [188]	Logistic Regression, eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) model, Random forest	Landsat
6	Remote sensing and gis analysis for mapping spatio-temporal changes of erosion and deposition of two mediterranean river deltas: The case of the axios and aliakmonas rivers, Greece.[132]	SVM	Landsat
7	Coastal erosion detection using landsat satellite imagery and support vector machine algorithm. [154]	SVM	Landsat
8	Shoreline Extraction from WorldView2 Satellite Data in the Presence of Foam Pixels Using Multispectral Classification Method. [113]	SVM, Maximum likelihood classification, Neural Network (NN)	WorldView 2
9	Assessment of coastal geomorphological changes using multi-temporal Satellite-Derived Bathymetry. [114]	Support Vector Regression (SVR)	Landsat
10	Global coastal geomorphology— Integrating earth observation and geospatial data. [111]	Support vector machine (SVM), Neural network, Gaussian Naive Bayes, Decision Tree, Random forest, adaptive boosting	Landsat

11	Efficient sea-land segmentation using seeds learning and edge directed graph cut. [56]	SVM	Google Earth
12	Multi-feature sea-land segmentation based on pixel-wise learning for optical remote-sensing imagery.[183]	a multi-feature sea-land classifier	Google-Earth, Venezuelan Remote Sensing Satellite-1 (VRSS-1), Gaofen-1
13	Machine learning and shoreline monitoring using optical satellite images: Case study of the Mostaganem shoreline, Algeria.[44]	random forest (RF), support vector machine (SVM)	Pleiades
14	Long and short-term evolution of the Algerian coastline using remote sensing and GIS technology. [51]	Phân ngưỡng, tính chỉ số NDVI	Landsat
15	A novel sea-land segmentation network for enhanced coastline extraction using satellite remote sensing images. [73]	semantic segmentation model, CSAFNet, U-Net	Google Earth
16	Shoreline extraction and analyzing the effect of coastal structures on shoreline changing with remote sensing and geographic information system: Case of Samsun, Turkey. [41]	Phân ngưỡng, tính chỉ số NDVI	Landsat
17	Hybridization of SLIC and Extra Tree for Object Based Image Analysis in Extracting Shoreline from Medium Resolution Satellite Images [110]	Decision Tree (DT), Naïve Bayes (NB), k-NearestNeighbour (kNN), Linear Discriminant Analysis(LDA), Quadratic Discriminant Analysis (QDA),Logistic Regression (LR), SGD Classifier, SVM, Random forest, multi-Layer PerceptronArtificial Neural Network (MLP), AdaBoost (ADB), Gradient Boosting	Landsat
18	Machine- Learning Functional Zonation Approach for Characterizing	hierarchical clustering	Landsat

	Terrestrial–Aquatic Interfaces: Application to Lake Erie. [70]		
19	Machine Learning Approaches for Coastline Extraction from Sentinel-2 Images: K-Means and K-Nearest Neighbour Algorithms in Comparison. [69]	K-Means and K-Nearest Neighbour Algorithms in Comparison.	Sentinel 2
20	An Integrated Monitoring System for Coastal and Riparian Areas Based on Remote Sensing and Machine Learning. [176]	CNN-based U-Net algorithm, the SegFormer,	Landsat, Sentinel 2, Sentinel 1
21	Assessment of coastal variations due to climate change using remote sensing and machine learning techniques: A case study from west coast of India. [138]	Phân ngưỡng và tính chỉ số NDVI	Landsat
22	Automatic Coastline Extraction Using Edge Detection and Optimization Procedures. [129]	K-means Clustering, phân ngưỡng	aerial images, WorldView-2
23	Semi-Automated Semantic Segmentation of Arctic Shorelines Using Very High-Resolution Airborne Imagery, Spectral Indices and Weakly Supervised Machine Learning Approaches. [39]	U-Net Architecture, random forest, xgboost—and spectral water indices—Normalized Difference Water Index (NDWI), and Normalized Difference Surface Water Index (NDSWI)	NOAA Airborne Imagery
24	Change analysis on historical shorelines extracted from medium resolution satellite images: A case study on the southern coast of Peninsular Malaysia. [109]	Multilayer Perceptron (MLP), K-Nearest Neighbour (kNN) and Support Vector Machine	SPOT-5, Landsat
25	Coast type-based accuracy assessment for coastline extraction from satellite image with machine learning classifiers [54]	Support Vector Machines (SVMs), Multi-Layer Perceptron (MLP) and Random Forests (RF), Extra Trees (ET), Adaptive Boosting (AdaB) and Gradient Boosting	Sentinel 2
26	DeepUNet: A Deep Fully Convolutional Network for Pixel-Level Sea-Land Segmentation. [101]	DeepUnet	Google Earth

27	A Novel Deep Structure U-Net for Sea-Land Segmentation in Remote Sensing Images. [156]	Dense U-Net	Google-Earth, ISPRS
28	Sea-land Segmentation with Res-UNet and fully connected CRF. [58]	Res-Unet	Google Earth
29	BS-Net: Using Joint-Learning Boundary and Segmentation Network for Coastline Extraction from Remote Sensing Images [186]	BS-net	Gaofen-1
30	SANet: A Sea-Land Segmentation Network Via Adaptive Multiscale Feature Learning. [61]	SANet	Gaofen-1
31	Application of deep learning models to detect coastlines and shorelines. [62]	U-Net, U2-Net, U-Net3+, and DexiNed	Google Earth
32	Assessing the accuracy of Sentinel-2 instantaneous subpixel shorelines using synchronous UAV ground truth surveys. [141]	Unet+++, indices, threshold	UAV, Sentinel 2
33	CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. [181]	CoastSat, Multilayer Perceptron , indices	Landsat, Sentinel 2
34	Monitoring 23-year of shoreline changes of the Zengwun Estuary in Southern Taiwan using time-series Landsat data and edge detection techniques. [173]	ACM edge detection	Landsat
35	Moving toward L-Band NASA-ISRO SAR Mission (NISAR) Dense Time Series: Multipolarization Object-Based Classification of Wetlands Using Two Machine Learning Algorithms. [32]	SVM và RF	Aerial imagery, NISAR
36	Assessment of coastal erosion along the Indian coast on 1 : 25, 000 scale using satellite data of 1989– 1991 and 2004– 2006 time frames. [146]	Số hóa theo mực chiều cao nhất	SPOT, IRS, Landsat, Esourcesat-1 AWiFS
37	Assessment and prediction of shoreline change using multi-temporal satellite images and statistics: Case study of Damietta coast, Egypt. [71]	Phân loại theo Iso cluster, Phân ngưỡng	Landsat
38	Coastline zones identification and 3D coastal mapping using UAV spatial data. [128]	Phân loại fuzzy, Số hóa	UAV
39	Using remote sensing data for calculating the coastal erosion in Southern Thailand. [127]	Số hóa	IKONOS, Quickbird, Worldview-2, Pleiades

40	Characterizing beach changes using high-frequency Sentinel-2 derived shorelines on the Valencian coast (Spanish Mediterranean). [53]	Phân ngưỡng đối tượng và mathematical morphology techniques	Sentinel 2
41	Assessing coastal erosion and accretion trends along two contrasting subtropical rivers based on remote sensing data. [179]	Số hóa	Aerial photographs, Landsat, Spot
42	Analysis of the dynamics of coastal landform change based on the integration of remote sensing and gis techniques: Implications for tidal flooding impact in pekalongan, central java, Indonesia. [195]	Số hóa	Landsat
43	Multi- spectral water index (MuWI): A native 10-m multi-spectral water index for accurate water mapping on sentinel-2. [184]	Chỉ số Multi-Spectral Water	Sentinel 2
44	Monitoring Local Shoreline Changes by Integrating UASs, Airborne LiDAR, Historical Images and Orthophotos. [84]	Số hóa	LiDAR, UAV
45	Shoreline erosion of microtidal beaches examined with UAV and remote sensing techniques. [123]	Sobel edge detector	UAV, SAR
46	Research on coastline extraction and dynamic change from remote sensing images based on deep learning. [108]	DeepLabv3+	Landsat
47	Extracting the intertidal extent and topography of the Australian coastline from a 28 year time series of Landsat observations. [152]	Tính chỉ số và phân ngưỡng	Landsat
48	Spatiotemporal shoreline dynamics of Namibian coastal lagoons derived by a dense remote sensing time series approach. [43]	Tính chỉ số và phân ngưỡng	Landsat
49	Modeling and Accuracy Assessment of Determining the Coastline Course Using Geodetic, Photogrammetric and Satellite Measurement Methods: Case Study in Gdynia Beach in Poland. [76]	Maximum likelihood	UAV, Landsat, Sentinel 2
50	Coastal Zone Classification Based on U-Net and Remote Sensing. [105]	Unet, SegNet and DeepLab v3+, Support Vector Machine (SVM) and Random Forest (RF)	Gaofen-2
51	Combining remote sensing analysis with machine learning to evaluate	Logistic regression	Sentinel 2

	short-term coastal evolution trend in the shoreline of Venice. [77]		
52	Shoreline change detection using DSAS technique: Case of Saint Martin Island, Bangladesh. [88]	Tasseled cap transformation, vector generalization	Landsat
53	Automatic Shoreline Detection and Change Detection Analysis of Netravati-Gurpur Rivermouth Using Histogram Equalization and Adaptive Thresholding Techniques. [33]	Histogram Equalization and Adaptive Thresholding Techniques	Indian Remote Sensing Satellite (IRS P6) LISS-III (2005, 2007 and 2010) and IRS R2 LISS-III (2013)
54	Diachronic study of coastline behavior using remote sensing: a case study of Korba beach, Tunis. [121]	Phân tách đất và nước, phân loại pixel theo histogram	Landsat, Sentinel 2
55	Feasibility Study for the Application of Synthetic Aperture Radar for Coastal Erosion Rate Quantification Across the Arctic. [42]	Phân ngưỡng	TerraSAR-X, Sentinel-1, ALOS PALSAR 1/2
56	Phân tích biến động của đường bờ biển Nha Trang, tỉnh Khánh Hòa ứng dụng công nghệ viễn thám và hệ thống tin địa lý. [27]	Tính chỉ số và phân loại có giám sát	Landsat 8
57	Đánh giá biến động cửa sông Tiên Châu, tỉnh Phú Yên bằng công nghệ viễn thám. [4]	Tính chỉ số	Landsat 7,8
58	Sử dụng ảnh viễn thám và gis nghiên cứu biến động đường bờ biển khu vực mũi Cà Mau. [24]	Phân ngưỡng	Landsat 7, 8
59	Phân tích và đánh giá diễn biến xói lở và bồi tụ ở khu vực tỉnh Quảng Nam bằng ảnh viễn thám và GIS. [22]	Phân ngưỡng	Landsat 5, 8
60	Nghiên cứu ứng dụng ảnh Sentinel 2 đánh giá diễn biến đường bờ và biến đổi địa hình đáy biển khu vực cửa Nhật Lệ, Quảng Bình. [25]	Tính chỉ số và phân ngưỡng	Sentinel 2
61	A Digital Shoreline Analysis System (DSAS) applied on mangrove shoreline changes area (Nam Dinh, Vietnam) during 2005-2014 along the Giao Thuy Coastal. [169]	Phân loại có giám định	Landsat 7,8, Corona, Spot4, 5, Ikonos
62	Diễn biến xói lở - bồi tụ ven biển Hải Hậu (tỉnh Nam Định) và vùng lân cận		Landsat, Spot,

	trong hơn 100 năm qua trên cơ sở phân tích tài liệu bản đồ địa hình và tư liệu viễn thám đa thời gian. [21]		Radarsat, Sentinel
63	Assessing the shoreline changes in Tra Vinh province using multi-temporal remote sensing data. [9]	Tính chỉ số và phân ngưỡng	Landsat 5, 7,8
64	Phân tích biến động đường bờ khu vực bờ biển cửa sông Hậu bằng tư liệu viễn thám. [23]	Phân loại bán tự động, pixel based	Landsat
65	Ứng dụng viễn thám, GIS đánh giá phạm vi và mức độ xói lở bờ biển Đồng bằng sông Cửu Long, đoạn từ Tiền Giang đến Sóc Trăng. [20]	Tính chỉ số AWEIsh	Landsat
66	Quan trắc sự biến động đường bờ sử dụng dữ liệu vệ tinh LANDSAT đa thời gian ở khu vực Cửa Đại, Sông Thu Bồn, Quảng Nam. [28]	Phân ngưỡng	Landsat
67	Đánh giá biến động cửa sông Tiên Châu, tỉnh Phú Yên bằng công nghệ viễn thám. [4]	Tính chỉ số và phân ngưỡng	Landsat
68	Assessing the shoreline changes for setback zone establishment from Son Tra (Danang city) to Cua Dai (Hoi An city), Vietnam. [119]	Tính chỉ số và phân ngưỡng	Landsat
69	Application of remote sensing and GIS for assessing the level of change of land use status in the coast of Ngoc Hien district (Ca Mau province) due to the impact of sea level rise. [87]		Spot, Landsat
70	Nghiên cứu diễn biến đường bờ và quá trình xói lở - bồi tụ dải ven biển thành phố Đà Nẵng. [26]	Phân ngưỡng	Landsat, Sentinel 2

Phụ lục 2. Bảng tổng hợp các chỉ thị xác định đường bờ [170]

Loại chỉ thị	Chỉ thị	Mô tả tại các điểm/trường hợp cụ thể	
Đường tham chiếu hình thái	Đụn cát	Chân đụn cát [100]	Chân đụn cát hoặc các điểm nhô ra của các đụn cát là những nơi có sự thay đổi về độ cao và độ dốc có thể quan sát được về phía đất liền.
		Mép đụn cát [190]	Sự trượt lở vật liệu ở sườn trước của đụn cát có thể hình thành một dải tích tụ vật liệu ở chân đụn, qua đó che khuất vị trí chân đụn cát. Trong trường hợp này, có thể sử dụng mép đỉnh đụn cát, tương ứng với giới hạn thực vật để làm ranh giới đường bờ.
		Đỉnh đụn cát [197]	Đỉnh đụn cát là đỉnh cao nhất, nơi độ dốc thay đổi dấu hiệu từ điểm dương (hướng về phía đất liền) đến điểm âm (hướng ra biển).
	Vách đá và bãi biển	Đỉnh núi, đỉnh vách đá, đỉnh của vách đá [190] [189] [97]	Đỉnh núi (đỉnh vách đá) đề cập đến cạnh trên của vách đá.
		Chân vách đá, chân vách dốc [191]	Ở những khu vực có vách đá sắc nhọn, không hình thành hàm ếch, thường xuyên chịu tác động trực tiếp của sóng và không bị tích tụ vật liệu sạt lở.
	Trong trường hợp của khối đá ở chân vách	Đỉnh của vách trượt lở [139]	Chỉ thị được dùng trên bờ vách biển trong các khu vực có sự dịch chuyển vật liệu, ví dụ, dòng đất đá, lở đất.
		Chân của taluy đá vụn [49]	Chân của taluy đá vụn có thể được lựa chọn khi vách đá chịu tác động của các hiện tượng dịch chuyển khối.
		Ranh giới vết trượt lở [148]	Tương tự như chân taluy đá vụn, ranh giới của vết nứt sạt có thể được sử dụng trong trường hợp vách đá xảy ra hiện tượng dịch chuyển khối.
	Trong trường hợp vùng biển được bảo vệ	Mép ngoài cùng của công trình bảo vệ bờ biển [116]	Trên những bãi biển có cấu trúc nhân sinh cứng, phần lớn là các mép của các công trình bảo vệ bờ biển, và đôi khi một loại cây có thể được sử dụng. Những đường tham chiếu này không thể hiện sự tiên hóa của đường bờ ở loại bãi biển này vì chúng bao quanh đường bờ và có thể được sửa đổi bất cứ lúc nào.
		Mép trong của công trình bảo vệ bờ biển [115]	
		Đỉnh của cấu trúc bảo vệ bờ [68]	

Loại chỉ thị	Chỉ thị	Mô tả tại các điểm/trường hợp cụ thể
	Đỉnh gờ bãi “berm” [126]	Đỉnh gờ bãi là đặc trưng hình thái phân chia giữa phần bãi trước có độ dốc lớn và phần bãi sau có độ dốc thoải hơn. Đây là một dạng địa hình tích tụ được hình thành bởi quá trình sóng tràn vào bờ trong điều kiện sóng bình thường (thường vào mùa hè), đồng thời cũng là một dạng địa hình xâm thực khi bị xói lở bởi sóng trong điều kiện mực nước dâng cao bất thường (thường vào mùa đông).
	Chân gờ bãi “Berm” [82]	Nó là cơ sở của bãi biển kéo dài từ đỉnh cồn cát đến mực triều thấp.
Giới hạn thực vật	Thảm thực vật, rìa biển của thảm thực vật cồn cát [75]	Đường thực vật là một chỉ thị sinh học về giới hạn ngập nước thường xuyên do mực nước cao; do đó nó là chỉ thị lý tưởng của biến động đường bờ.
	Ranh giới thảm thực vật ổn định [172]	Đường ranh giới thực vật là một ranh giới tự nhiên được hình thành bởi hệ thực vật, tương ứng với đường ranh giới thảm thực vật ổn định, lâu dài. Nó rất dễ nhận dạng, ngay cả trên các ảnh tư liệu cũ vốn không đủ độ sắc nét để xác định các đụn cát phôi thai.
	Ranh giới giữa loài <i>Ammophila arenaria</i> và <i>Agropyrum Junceum</i> ở những cồn cát ven biển ôn đới [49]	Loài cây <i>Ammophila arenaria</i> và <i>Agropyrum Junceum</i> là những cây được sử dụng để ngăn cồn cát di chuyển vào trong đất liền.
	Giới hạn trên của tảo hoặc địa y biển trên các bức tường của vách đá [166]	Giới hạn trên là ranh giới cao nhất mà nước biển thường xuyên tới, cho phép tảo và địa y có thể tồn tại. Giới hạn trên của tảo hoặc địa y có thể được sử dụng trong trường hợp vách đá.
Mực thủy triều tức thời và giới hạn vùng ẩm	Đường mép nước (dòng lầy, bến lầy) [79]	là nơi tiếp xúc giữa khối nước và độ dốc của bãi biển. Nó đề cập đến giới hạn của bọt của sóng vỡ (dòng nước biển dâng lên bãi biển sau khi sóng vỡ).
	Đường/Đất ướt/khô (ranh giới ướt / khô, giới hạn ướt, đường ướt / cát) [178]	Đó là nơi kết thúc đới sóng vỡ thay đổi khi thủy triều lên và trong khi thủy triều xuống; nó di chuyển ra biển và đánh dấu giới hạn phía đất liền của phần cát bị tụt đi do sóng vỡ.

Loại chỉ thị	Chỉ thị	Mô tả tại các điểm/trường hợp cụ thể
	Đường mực nước cao [149]	là mức nước của kỳ triều cao gần nhất, tương ứng với giới hạn làm ướt phía trên của bãi trước do đợt triều cường vừa tác động. Đường mực nước cao tức thời thường được chọn làm chỉ thị đường bờ trên các ảnh viễn thám vì nó rất dễ nhận diện
	Đường tích tụ vật trôi dạt do thủy triều [124]	Đường tích tụ vật trôi dạt do triều cao là đường các mảnh vụn còn sót lại trên bãi biển sau khi thủy triều rút. Nó thường bao gồm cỏ biển (eelgrass) hoặc các loại vật liệu trôi nổi khác.
	Mực nước cao trung bình [151]	Nó được xem là đại diện cho vị trí trung bình của mực nước biển cao. Nhưng mực nước cao trung bình không hoàn toàn là mốc đo thủy triều bởi vì định nghĩa của nó có tính đến các tiêu chí khác bao gồm cả giới hạn thực vật.
Mực thủy triều khu vực	Mực triều trung bình [31]	Sự lên xuống của thủy triều dọc bờ biển là một quá trình phức tạp ảnh hưởng đến việc thiết lập một chỉ báo bờ biển. Các mốc dữ liệu thủy triều chủ yếu đề cập đến thủy triều cao hoặc thủy triều thấp. Dữ liệu thủy triều khác nhau đã được sử dụng thành công như các chỉ số bờ biển. Chúng ta có thể sử dụng nhiều loại như mực nước biển trung bình, và mực nước cao trung bình kỳ triều cường.
	Mực triều cao trung bình [72]	
	Mực nước cao trung bình trong kỳ triều cường [147]	
	Mực nước cao trung bình [35]	
	Mực nước thấp trung bình [162]	
	Mực nước thấp trung bình kỳ triều cường [40]	
Mực nước biển thấp nhất [99]		
Tham chiếu số/ Đường biên đặc trưng phổ	Đường biên cường độ phổ [135]	Đó là đường cường độ ánh sáng tối đa. Giống như tất cả các đường biên đặc trưng phổ, đường này là một đường tham chiếu số do xử lý hình ảnh mà ra.
	Đường bờ chiết xuất từ đặc trưng quang học [135]	Các tính năng này đại diện cho một vị trí trung bình của đường bờ tức thời trong khoảng mười phút.

Loại chỉ thị	Chỉ thị	Mô tả tại các điểm/trường hợp cụ thể
	Đường trục trung tâm bãi biển [49]	Là đường trung tuyến của dạng hình học bãi biển, nằm trong phạm vi được giới hạn bởi ranh giới thực vật (hoặc chân cồn cát) và đường cát ướt của bãi trước.
Đường ranh giới bãi biển	Độ rộng bãi biển [37]	Thông số này xác định sự biến thiên về chiều rộng của bãi giữa giới hạn phía trong và giới hạn phía ngoài. Giới hạn phía trong được xác định tại chân cồn cát hoặc giới hạn dưới của thảm thực vật; trong khi đó, vị trí của giới hạn phía ngoài lại thay đổi tùy thuộc vào quan điểm của từng tác giả
Đường giới hạn xâm nhập bão	Ranh giới xâm nhập bão [49]	Khoảng cách xâm nhập là khoảng cách từ đường bờ phía biển đến vùng thảm thực vật dày. Khu vực này thường kéo dài tới mặt sườn hướng biển của đụn cát tiền tiêu.
	Đỉnh bề mặt bồi tích do sóng bão [116]	Các bề mặt bồi tích do sóng bão được hình thành tại những bãi biển bị xâm thực mạnh và có độ cao đất liền thấp hơn mức nước dâng do bão. Đỉnh của bề mặt bồi tích này tạo nên độ cao lớn nhất của bãi biển và là chỉ thị để đánh giá sự biến động đường bờ đối với những loại bãi biển này.

Phụ lục 3. Bộ chỉ thị đường bờ phục vụ đánh giá biến động bờ biển Trung Bộ Việt Nam

(Ký hiệu mức độ đóng góp: ✓ kế thừa; ★ cải tiến; ★★ mới của luận án)

Nhóm chỉ thị	STT	Tên chỉ thị	Mô tả chi tiết	Dấu hiệu nhận biết trên ảnh (VT/UAV)	Dấu hiệu nhận biết trên thực địa	Kế thừa / đóng góp
Hình thái ổn định	1	Đỉnh đụn cát	Điểm cao nhất của thân đụn cát trong mặt cắt ngang bờ, phản ánh trạng thái phát triển, tích tụ và ổn định dài hạn của hệ bãi-đụn. Chỉ thị này đại diện cho ranh giới hình thái ít chịu tác động của dao động triều và biến động mùa.	Sóng đụn thể hiện rõ trên DEM/UAV; đường đổi độ dốc rõ ràng; kết cấu bề mặt cát khô đồng nhất; ít biến động trên chuỗi ảnh đa thời gian.	Điểm gãy hướng dốc (sườn biển → sườn trong); cát khô, chặt; thường có thảm thực vật ổn định phía trong.	✓
	2	Chân đụn cát cổ	Ranh giới hình thái ổn định, còn lưu vết của chân đụn trong các giai đoạn trước, phản ánh vị trí đường bờ trong quá khứ gắn với các trận bão mạnh hoặc thay đổi cân bằng trầm tích dài hạn.	Đường gãy dốc mờ nhưng liên tục; ổn định trên chuỗi ảnh dài hạn; thường trùng với bậc địa hình thấp hoặc ranh giới thảm thực vật.	Chuyển tiếp bãi – đụn đã phong hóa; không có sạt mới; thảm cỏ hoặc cây bụi phát triển lâu năm.	★
	3	Mép/đỉnh đụn cát ổn định	Mép ngoài của đụn cát không bị xói lở trong điều kiện hiện tại, phân biệt với vách xói đang hoạt động; phản ánh trạng thái cân bằng tương đối của bờ.	Ranh giới sắc vừa; ít dịch chuyển giữa các ảnh đa thời gian; không xuất hiện vết xói mới.	Mép đụn thoải; bề mặt ổn định; không có dấu hiệu sạt lở gần đây.	★

	4	Đỉnh vách đá	Mép trên của bờ đá hoặc vách mài mòn, đại diện cho đường bờ dài hạn ở các đoạn bờ đá chịu chi phối mạnh bởi cấu trúc địa chất.	Độ dốc lớn, bóng đổ rõ; ranh giới uốn lượn theo cấu trúc địa chất; ổn định trên chuỗi ảnh.	Chuyển tiếp rõ giữa mặt bằng/đồi và vách đá; đá góc lộ ra.	✓
	5	Chân vách đá ổn định	Ranh giới chân vách ít chịu xói mòn hiện tại, phản ánh trạng thái ổn định tương đối của bờ đá trong giai đoạn gần đây.	Biên đá–cát/nước ổn định trên chuỗi ảnh; không mở rộng vùng xói.	Ít mảnh đá rơi mới; hốc xói hạn chế; bề mặt tương đối ổn định.	✓
	6	Đỉnh thềm biển cổ	Bậc địa hình thềm biển cổ hình thành trong các mực biển quá khứ, phản ánh tiến hóa dài hạn của đường bờ và bồi cảnh kiến tạo – mực nước biển.	Đường đồng mức liên tục, cao hơn bãi hiện tại; hình thái bậc rõ trên DEM.	Bề mặt phẳng; trầm tích biển cổ hoặc nền đá mài mòn.	★★
Hình thái bán ổn định (theo mùa)	7	Đỉnh gờ bãi (*Berm crest*)	Gờ tích tụ hình thành do sóng, phân tách bãi trước và bãi sau; vị trí thay đổi theo mùa nhưng vẫn có hình thái rõ ràng.	Dải gờ song song bờ; thể hiện rõ trên ảnh UAV và DEM độ phân giải cao.	Gờ cát liên tục; vật liệu khô hơn so với bãi trước.	✓
	8	Chân gờ bãi (*Berm toe*)	Ranh giới ngoài của gờ bãi, phản ánh giới hạn tác động thường xuyên của sóng trong điều kiện trung bình.	Vệt ẩm hoặc đổi độ dốc nhẹ; biến động theo mùa.	Cát ẩm, nén chặt; dấu vết sóng lặp lại.	✓
	9	Chân đụn cát hiện tại	Ranh giới hiện thời giữa bãi và đụn cát đang điều chỉnh theo điều kiện sóng–gió mùa.	Dịch chuyển nhẹ giữa các ảnh đa thời gian; ranh giới tương đối rõ.	Bắt đầu tăng dốc; cát khô dần về phía trong.	✓

	10	Rìa đụn cát hoạt động (*Active dune margin*)	Biên giữa đụn cát ổn định và vùng cát gió di động, phản ánh trạng thái chuyển tiếp động.	Thay đổi kết cấu bề mặt từ mịn sang thô; biến động theo mùa gió.	Gọn cát rõ; thực vật thưa hoặc mới phục hồi.	★
Hình thái xói lở – bồi tụ hoạt động	11	Mép vách xói lở hiện tại	Vách hoặc gờ xói lở đang hoạt động do tác động trực tiếp của sóng, triều hoặc bão trong giai đoạn hiện tại; phản ánh trạng thái mất cân bằng hình thái rõ rệt.	Đường gãy sắc, dịch chuyển nhanh trên chuỗi ảnh; mất bãi rõ rệt sau các đợt sóng/bão.	Vách cát đứng hoặc gần đứng; vật liệu rơi mới; không có thảm phủ ổn định.	✓
	12	Chân vách sạt lở	Vùng tích tụ vật liệu sạt lở tại chân vách, phản ánh quá trình xói – sạt đang diễn ra và chu trình tái phân bố trầm tích.	Dải loang màu, biến đổi nhanh; thường mở rộng sau mưa lớn hoặc bão.	Đá vụn, cát rời; dầu trượt mới; bề mặt không ổn định.	✓
	13	Ranh giới bồi tụ mới	Biên giới của trầm tích mới được bồi tụ trong giai đoạn gần đây, thường xuất hiện sau bão, lũ hoặc thay đổi hướng dòng chảy.	Dải sáng hoặc âm khác biệt rõ với nền cũ; hình thái còn sắc nét.	Cát mới tơi, chưa phân tầng; bề mặt thấp, dễ tái xói.	★
	14	Mép bãi bồi mới	Biên ngoài của bãi bồi ngắn hạn, phản ánh pha phục hồi hoặc tái phân bố trầm tích cục bộ.	Biên lồi mới xuất hiện; hình dạng chưa ổn định.	Bãi trẻ, vật liệu rời; dễ bị sóng tái tác động.	★
	15	Đỉnh doi cát cửa sông	Phần cao nhất của doi cát chịu tác động tương tác giữa dòng chảy sông và động lực biển; rất nhạy cảm với biến động trầm tích.	Dạng lưới hoặc doi rõ rệt; dịch chuyển hình thái theo mùa.	Cát xáo trộn; dòng chảy chia nhánh; bề mặt không ổn định.	✓

Hình thái sinh học	16	Chân đụn cát có đỉnh bởi thực vật (*Vegetated dune toe*)	Chân đụn cát được ổn định nhờ hệ rễ thực vật, phản ánh trạng thái cân bằng sinh – địa mạo tương đối.	Ranh giới cát–xanh trùng với NDVI cao; ổn định trên chuỗi ảnh.	Rễ bám cát; bề mặt ít xáo trộn; thảm thực vật liên tục.	★★
	17	Mép đụn cát ổn định có thực vật (*Vegetated stable dune edge*)	Mép ngoài của đụn cát được “neo” bởi thảm thực vật, hạn chế xói lở và dịch chuyển hình thái.	Biên cát–xanh sắc nét; ít dịch chuyển theo thời gian.	Thực vật phát triển liên tục; ít dấu hiệu sạt lở.	★★
	18	Mép bãi ổn định nhờ thảm cỏ (*Grass-stabilized backshore*)	Bãi trên đụn cát ổn định sinh học bởi thảm cỏ, phản ánh giai đoạn ổn định tương đối của bờ cát.	Dải xanh thấp, kết cấu đồng nhất; ổn định theo mùa.	Cỏ bền vững; rễ nông nhưng lan rộng.	★
	19	Ranh giới hình thái gắn với rừng phòng hộ (*Protective forest boundary*)	Ranh giới hình thái trùng với mép rừng phòng hộ ven biển, thể hiện vai trò ổn định bờ của thảm cây gỗ.	Dải xanh đậm, tán cây rõ; ranh giới ổn định.	Cây gỗ phát triển; nền đất ít xói.	★
Hình thái nhân sinh	20	Mép kè biển	Mép ngoài của công trình kè bảo vệ bờ, đại diện cho đường bờ nhân tạo do con người xác lập.	Biên thẳng, sắc; hình dạng hình học rõ.	Kè bê tông hoặc đá; sóng phản xạ mạnh.	✓
	21	Chân công trình chắn sóng	Ranh giới tiếp xúc giữa công trình chắn sóng và bãi, thường là điểm tập trung xói hoặc bồi cục bộ.	Bóng đổ rõ; thay đổi hình thái cục bộ.	Xói chân công trình; trầm tích phân dị.	✓
	22	Mép lấn biển	Biên mở rộng đất ra biển do san lấp, làm thay đổi đột ngột hình thái và cân bằng trầm tích.	Đường thẳng mới; khác biệt rõ về màu sắc và kết cấu.	Vật liệu san lấp; nền mới chưa ổn định.	✓

	23	Ranh giới san lấp ven biển	Ranh giới giữa nền tự nhiên và nền san lấp nhân tạo, phản ánh sự can thiệp trực tiếp của con người.	Khác biệt rõ về kết cấu bề mặt và phân xạ.	Vật liệu nhân tạo; kết cấu không đồng nhất.	✓
	24	Mép bãi nuôi bãi nhân tạo (*Nourished beach edge*)	Biên ngoài của bãi được bơm cát nhân tạo nhằm phục hồi hoặc bảo vệ bờ.	Cát đồng nhất; hình dạng tương đối thẳng trong giai đoạn đầu.	Cát mới, chưa ổn định; dễ tái phân bố.	★
Sinh học – sinh thái	25	Ranh giới thảm thực vật ổn định phía biển	Giới hạn ngoài cùng của thảm thực vật ổn định về phía biển, phản ánh mức độ tác động lặp lại của sóng, triều và gió biển trong điều kiện trung bình – dài hạn.	Đường ranh NDVI tăng đột ngột; ổn định trên chuỗi ảnh đa thời gian.	Bắt đầu xuất hiện thảm cỏ/cây bụi liên tục; ít dấu hiệu bật gốc.	✓
	26	Thảm thực vật ổn định dài hạn	Vùng thảm thực vật ít biến động theo mùa, phản ánh trạng thái ổn định sinh thái của bờ biển trong giai đoạn gần đây.	Dải xanh bền vững; ít biến động chỉ số NDVI theo thời gian.	Cây/cỏ lâu năm; hệ rễ phát triển; nền đất ổn định.	✓
	27	Ranh giới thực vật đụn cát	Biên chuyển tiếp giữa cát di động và cát cố định bởi thực vật, phản ánh mức độ ổn định của hệ đụn.	Thay đổi rõ kết cấu bề mặt và NDVI; ranh giới liên tục.	Rễ bám cát; thực vật thưa dần ra phía biển.	✓
	28	Ranh giới thực vật thưa	Vùng chuyển tiếp sinh thái giữa bãi trống và thảm thực vật ổn định, nhạy cảm với biến động sóng – gió.	NDVI trung gian; biến động theo mùa.	Cỏ thưa; cát còn di động.	★
	29	Ranh giới phục hồi thực vật sau bão (*Post-storm	Biên tái sinh của thảm thực vật trên các khu vực từng bị phá hủy bởi bão hoặc xói lở mạnh.	Quá trình “xanh hóa” dần trên chuỗi ảnh đa thời gian.	Cây non, cỏ tái sinh; dấu tích xáo trộn còn rõ.	★★

		vegetation recovery line*)				
	30	Ranh giới rửa trôi thực vật	Biên phá hủy thảm thực vật do ngập, xói hoặc dòng tràn mạnh trong các sự kiện cực đoan.	NDVI giảm mạnh; biên không đều.	Cây gãy, tro gốc; đất bị rửa trôi.	★
	31	Ranh giới rừng phòng hộ ven biển	Mép ngoài của rừng phòng hộ, đóng vai trò chắn gió – cát và ổn định bờ trong dài hạn.	Dải xanh đậm, tán cây rõ; ổn định theo thời gian.	Cây gỗ lớn; nền đất ổn định.	✓
	32	Ranh giới thực vật cửa sông/đầm phá	Biên thảm thực vật chịu ảnh hưởng ngập mặn và dao động mực nước tại cửa sông, đầm phá.	Thay đổi màu sắc và kết cấu; NDVI dao động theo mùa.	Chuyển tiếp loài; bùn mịn; rễ chịu mặn.	✓
Thủy động lực (tức thời)	33	Đường nước tức thời	Ranh giới nước–đất tại thời điểm chụp ảnh, phản ánh trạng thái mực nước và điều kiện sóng – triều tức thời.	Biên sáng–tối rõ; thay đổi mạnh giữa các ảnh.	Mép nước quan sát trực tiếp.	✓
	34	Ranh giới ướt – khô	Biên giữa cát ẩm và cát khô do tác động của swash, phản ánh phạm vi sóng tác động thường xuyên.	Dải sẫm song song bờ; biến động nhanh.	Cát ẩm phía biển; khô dần vào trong.	✓
	35	Mép sóng vỡ	Vị trí sóng vỡ tại thời điểm quan sát, liên quan trực tiếp đến độ dốc bãi và điều kiện sóng.	Dải bọt trắng liên tục hoặc đứt đoạn.	Sóng vỡ liên tiếp; bọt dày.	✓
	36	Vùng đới sóng tràn tức thời (*Swash zone extent*)	Phạm vi nước tràn lên bãi trong từng chu kỳ sóng, phản ánh động lực sóng tức thời.	Dải ướt hẹp, răng cưa.	Vết nước rút nhanh trên bề mặt bãi.	★
	37	Độ rộng bãi tức thời	Khoảng cách từ mép nước đến bãi trên tại thời điểm chụp, biến động mạnh theo triều và sóng.	Thay đổi rõ giữa các ảnh cùng ngày	Bãi rộng/hẹp tùy điều kiện triều.	★

		(*Instantaneous beach width*)		hoặc khác thời điểm.		
Cực đoan – bão	38	Đường tràn bão	Giới hạn xâm nhập tối đa của sóng bão vào đất liền, phản ánh cường độ và phạm vi tác động của bão.	Dải tràn rõ rệt sau bão; khác biệt rõ với nền xung quanh.	Vết tràn, cát phủ; rác bão.	✓
	39	Phạm vi ngập bão	Vùng đất bị ngập do nước dâng bão, thường mở rộng nhanh trong thời gian ngắn.	Vùng tối/liên tục trên ảnh sau bão.	Dấu ngập; rác, bùn bám.	✓
	40	Mép xói lở đột biến sau bão	Biên mất bãi hoặc xói lở mạnh hình thành ngay sau sự kiện bão.	Đường gãy mới, sắc; khác biệt rõ so với trước bão.	Vách xói đứng; vật liệu rơi mới.	✓
	41	Vách xói đụn cát do bão	Vách xói đứng hình thành trên sườn đụn do sóng bão vượt bãi.	Đường thẳng rõ, bóng đổ mạnh.	Vách cát đứng, bề mặt mới.	✓
	42	Dấu vết dòng tràn bão	Rãnh xói do dòng tràn mạnh trong bão, thể hiện hướng và cường độ dòng chảy.	Vết xói hẹp, kéo dài.	Rãnh xói rõ; vật liệu bị cuốn trôi.	★
	43	Dải bồi tụ sau bão	Vùng trầm tích mới được lắng đọng sau bão, phản ánh pha phục hồi hoặc tái phân bố vật liệu.	Dải sáng/âm khác nền cũ.	Cát mới, chưa ổn định.	★
	44	Dải tác động bão tổng hợp	Phạm vi tổng hợp chịu ảnh hưởng đồng thời của sóng, ngập và xói lở trong một sự kiện bão.	Vùng ảnh hưởng liên tục, chồng lấn nhiều dấu hiệu.	Dấu ngập – xói – bồi chồng lấn.	★★

Phụ lục 4. Bộ chỉ thị nhận dạng đường bờ thành phố Đà Nẵng ứng dụng viễn thám độ phân giải cao và mô hình học máy

Nhóm chỉ thị	STT	Tên chỉ thị	Mô tả khái quát	Dấu hiệu nhận biết trên ảnh (VT/UAV)	Dấu hiệu nhận biết trên thực địa
Bờ cát cao – Ranh giới hình thái–sinh học ổn định đụn cát	1	Đỉnh đụn cát	Điểm cao nhất của thân đụn cát; phản ánh trạng thái phát triển và ổn định dài hạn của hệ bãi–đụn, ít chịu nhiễu triệu và biến động tức thời; sử dụng làm mốc đường bờ trong.	Sống đụn rõ trên DEM/ảnh UAV; đường đôi độ dốc sắc; bề mặt cát khô, kết cấu bề mặt đồng nhất; bóng đổ tuyến tính.	Điểm gãy dốc (sườn trước → sườn sau); cát khô, ổn định; ít dấu vết xáo trộn mới.
	2	Chân đụn cát cổ	Ranh giới hình thái ổn định hình thành trong giai đoạn phát triển trước; đóng vai trò “dấu mốc lịch sử” của đường bờ trong trong điều kiện bão lớn hoặc biến đổi trầm tích quá khứ.	Đường gãy dốc mờ nhưng liên tục; thay đổi nhẹ về cao độ/kết cấu bề mặt; thường trùng dải thực vật thấp, ổn định đa thời gian.	Chuyển tiếp bãi–đụn đã phong hóa; bề mặt cát nén; thảm cỏ/bụi thấp ổn định.
	3	Mép/đỉnh đụn cát ổn định	Mép ngoài của thân đụn trong trạng thái cân bằng tương đối; ít hoặc không chịu xói lở hiện tại; đại diện ranh giới dài hạn của bờ cát cao.	Biên ranh vừa sắc; ít dịch chuyển giữa các ảnh; phân biệt với vách xói bão (biên rất sắc, bóng đổ mạnh).	Mép đụn thoải; không có vách xói đứng; cát ít xáo trộn; thực vật ổn định phía trong.
	4	Đỉnh thềm biển cổ	Ranh giới địa hình biển cổ bảo tồn; phản ánh giới hạn tiến hóa rất dài hạn của đường bờ trong tại nơi còn dấu tích thềm biển.	Đường đồng mức cao, liên tục trên DEM; bề mặt phẳng tương đối; tương phản với bãi–đụn hiện đại.	Bề mặt phẳng cổ, phong hóa; vật liệu cổ; thường gắn thảm thực vật lâu năm/đất ổn định.

	5	Chân đụn cát được cố định bởi thực vật	Ranh giới bãi–đụn nơi đụn đã được cố định sinh học; ổn định hơn chỉ thị hình thái thuần cát trong điều kiện bão.	Biên NDVI tăng rõ; chuyển kết cấu bề mặt từ cát trống sang phủ xanh; ranh giới ổn định đa thời gian.	Thảm cỏ/cây bụi phát triển liên tục; rễ bám cát; nền ít bị thổi bay.
	6	Mép đụn cát ổn định có thảm thực vật	Mép ngoài thân đụn được thảm thực vật neo giữ; phản ánh cân bằng hình thái–sinh học của hệ đụn cát.	Biên cát–xanh rõ trên ảnh HR/UAV; NDVI cao liên tục phía trong; ít dịch chuyển theo mùa.	Mép đụn thoải; thực vật liên tục; cát ít di động; không có vết xói mới.
	7	Ranh giới đụn cát gắn với rừng phòng hộ	Ranh giới hình thái–sinh học liên kết đụn cát với dải rừng phòng hộ; biểu hiện ổn định cao của đường bờ trong.	Dải xanh đậm, tán cây rõ; biên rừng liên tục; ổn định nhiều năm.	Cây gỗ/cây bụi cao ổn định; nền cát chặt; ít dấu hiệu ngập/xói hiện tại.
	8	Ranh giới ổn định sinh học trên sườn đụn	Ranh giới trên sườn đụn nơi thực vật phủ ổn định; thể hiện quá trình “khóa” hình thái đụn trong điều kiện động lực hiện tại.	Đường cong mềm, liên tục; tương phản màu/kết cấu bề mặt giữa sườn phủ xanh và cát trống; biến động nhỏ.	Thảm thực vật phủ đều; cát ít thổi; không có rãnh xói hoặc trượt nhỏ.
Bờ cát cao – Dấu hiệu xói lở đụn cát do bão (kiểm chứng)	9	Vách xói đụn cát do bão	Vách xói đứng hình thành do sóng bão và nước dâng; phản ánh xói lở mạnh, đột ngột; chỉ dùng kiểm chứng, không đại diện đường bờ ổn định.	Đường gãy rất sắc; bóng đổ rõ; bề mặt cát sáng mới lộ; xuất hiện rõ sau bão.	Vách cát đứng; cát sạt mới; dấu vết sóng đánh ở chân vách.
	10	Mép xói lở đột biến sau bão	Ranh giới lùi nhanh của mép đụn sau bão so với trạng thái trước;	Dịch chuyển rõ trên ảnh trước–sau; biên mới sắc, khác màu/kết cấu	Mép xói mới, chưa phong hóa; cát to; có khối cát sạt rải rác.

			phản ánh mức độ tổn thương tức thời của bờ cát cao.	bề mặt so với bề mặt ổn định.	
	11	Dải tràn bão trên sườn đụn	Vùng sóng/nước dâng vượt qua mép trước đụn để lại dấu vết trầm tích và xáo trộn; chỉ dùng kiểm chứng cường độ tác động bão.	Dải sáng/âm kéo dài vào thân đụn; kết cấu bề mặt hỗn loạn; dải trầm tích mỏng phủ nền cát cũ.	Lớp cát mới phủ; bề mặt bị san phẳng/xáo trộn; có thể lẫn vỏ sò, rác biển.
Bờ cát thấp – Ranh giới sinh học ổn định ven biển	12	Ranh giới thảm thực vật ổn định phía biển	Ranh giới ngoài cùng của thảm thực vật ổn định; phản ánh giới hạn tác động lặp lại của sóng–triều–mặn; là chỉ thị tin cậy nhất cho đường bờ trong ở bờ cát thấp/cửa sông.	NDVI tăng đột ngột; biên xanh–cát rõ; ổn định đa thời gian.	Bắt đầu thảm cỏ/cây bụi liên tục; rễ bám; nền tương đối ổn định.
	13	Ranh giới thực vật đụn cát thấp	Ranh giới giữa cát di động và đụn cát thấp đã cố định sinh học; biểu hiện ổn định trung–dài hạn trong bối cảnh địa hình thấp.	Kết cấu bề mặt chuyển cát trống → phủ xanh thấp; NDVI trung bình–cao; ranh giới tương đối liên tục dọc bờ.	Thảm cỏ thấp/cây bụi thưa; cát ít di chuyển; không có xói mới.
	14	Ranh giới rừng phòng hộ ven biển	Ranh giới ngoài cùng dải rừng phòng hộ; phản ánh ổn định cao và giới hạn tác động trực tiếp của biển trong dài hạn.	Dải xanh đậm, tán rõ; ổn định nhiều năm trên ảnh.	Cây gỗ/cây bụi cao; nền đất/cát chặt; ít dấu ngập mặn/xói hiện tại.
Bờ cát thấp – Dấu hiệu suy giảm và phục hồi	15	Ranh giới rửa trôi thực vật	Ranh giới khu vực thực vật bị phá hủy/suy giảm mạnh do bão, nước dâng hoặc dòng chảy lũ; dùng nhận diện phạm vi tác động cục đoạn.	NDVI giảm mạnh; dải trống/loang màu dọc bờ; rõ trong so sánh trước–sau bão.	Cây gãy/bật gốc; nền trơ; dấu dòng chảy mạnh hoặc vật liệu bồi lấp hỗn độn.

sinh học do bão (kiểm chứng)	16	Ranh giới phục hồi thực vật sau bão	Ranh giới tái sinh của thảm thực vật sau bão; phản ánh khả năng phục hồi sinh thái của bờ cát thấp.	Dải “xanh hóa” theo thời gian; NDVI tăng dần; vị trí thay đổi theo giai đoạn phục hồi.	Cây non/cỏ tái sinh; mật độ tăng; nền bất đầu ổn định trở lại.
	17	Dải tác động bão tổng hợp	Phạm vi tổng hợp chịu tác động sóng–ngập–xói; thể hiện chồng lấn dấu hiệu suy giảm sinh học và xáo trộn bề mặt.	Vùng ảnh hưởng liên tục; kết cấu bề mặt hỗn hợp; kết hợp giảm NDVI và biến đổi màu bề mặt.	Dấu ngập–xói–bồi chồng lấn; rác bão; trầm tích mới; sinh cảnh bị xáo trộn.
Bờ đá – Ranh giới hình thái ổn định bờ đá	18	Đỉnh vách đá	Ranh giới trên cùng vách đá; phản ánh giới hạn mài mòn sóng dài hạn; chỉ thị ổn định nhất cho đường bờ trong ở bờ đá.	Đường gãy địa hình rõ trên DEM/UAV; tương phản mạnh; bóng đổ lớn.	Chuyển tiếp rõ giữa mặt bằng ổn định và vách dốc; đá góc lộ.
	19	Chân vách đá ổn định có bãi tích tụ vật liệu sạt lở	Ranh giới dài hạn giữa vách đá và chân bờ có tích tụ đá vụn tương đối ổn định; phản ánh cân bằng động giữa mài mòn vách và tích tụ trọng lực.	Dải vật liệu thô loang lổ ở chân vách; ranh giới rõ giữa đá trơ và vùng tích tụ; ít biến động đa thời gian.	Bãi đá vụn/khối rơi đã phong hóa; tương đối ổn định; ít dấu chuyển động mới.
	20	Ranh giới xói lở cổ trên vách đá	Dấu tích xói lở/mài mòn hình thành trong giai đoạn động lực mạnh trước đây; là mốc lịch sử tham chiếu tiến hóa đường bờ trong.	Vết đổi màu/đường gãy mờ trên vách; có thể song song bờ; ổn định dài hạn.	Hốc sóng cổ/vết mài mòn cũ; bề mặt phong hóa; không còn chịu sóng trực tiếp.
Bờ đá – Ranh giới sinh học ổn định trên	21	Ranh giới thảm thực vật bám đá ổn định	Ranh giới ngoài cùng của thảm thực vật bám đá ổn định; phản ánh giới hạn tác động lặp lại của sóng, gió và muối biển.	Biên xanh–đá trơ rõ; NDVI cao phía trong; ổn định đa thời gian.	Thực vật bám rễ trong khe nứt; sinh trưởng ổn định; nền đá khô.

nền đá (bổ trợ)	22	Ranh giới thực vật chịu mặn – gió	Ranh giới phân bố của quần xã chịu mặn–gió; có giá trị tham chiếu hình thái–sinh học cho đường bờ trong.	Dải xanh xám, thưa; phân bố theo dải; biến động nhỏ theo mùa.	Cây bụi thấp, thân cong; dấu thích nghi gió muối; phân bố bền vững.
Bờ đá – Dấu hiệu sạt lở cục bộ (kiểm chứng)	23	Vết trượt lở mới trên vách đá	Dấu hiệu rơi đá/trượt lở mới; phản ánh mất ổn định cục bộ, không đại diện vị trí đường bờ dài hạn.	Vết sáng mới lộ; kết cấu bề mặt thô; hình dạng bất quy tắc; xuất hiện đột ngột sau mưa/bão.	Bề mặt đá mới lộ; mảnh vỡ góc cạnh; chưa phong hóa.
	24	Bãi tích tụ sạt lở chưa ổn định	Vùng tích tụ vật liệu rơi sạt mới ở chân vách; biến động nhanh trong ngắn hạn.	Dải vật liệu sáng, không liên tục; hình dạng thay đổi theo thời gian; rõ sau sự kiện mưa lớn.	Đá vụn rời, dễ dịch chuyển; ít/không có thực vật bám.
Bờ nhân tạo – Ranh giới công trình bảo vệ bờ	25	Mép kè biển	Ranh giới ngoài cùng của kè biển/tường chắn sóng; đại diện đường bờ trong ổn định tại khu đô thị và du lịch ven biển.	Biên thẳng, sắc; vật liệu bê tông/đá; bóng đổ rõ; ổn định đa thời gian.	Kè bê tông/kè đá liên tục; mặt kè cao hơn bãi; kết cấu ổn định.
	26	Chân công trình chắn sóng	Ranh giới tiếp xúc giữa công trình chắn sóng và bãi/đáy; đại diện giới hạn vật lý của kết cấu bảo vệ bờ (đặc biệt khu cảng).	Ranh giới rõ giữa kết cấu nhân tạo và bề mặt tự nhiên; hình học đều; ít nhiễu.	Khối bê tông/đá hộc/cấu kiện; thường có sóng phản xạ mạnh phía trước.
	27	Mép ngoài đê/kè đứng tại khu lấn biển	Ranh giới ngoài cùng của kè bao khu lấn biển; đại diện đường bờ trong mang tính kỹ thuật–pháp lý.	Đường thẳng/gãy khúc theo thiết kế; vật liệu đồng nhất; nhận dạng tốt trên ảnh HR/UAV.	Kè bao kiên cố; phía trong nền đất ổn định; không còn bồi tụ tự nhiên.
	28	Mép kè tại khu cảng biển và bến tàu	Ranh giới công trình cầu cảng tiếp giáp trực tiếp mặt nước; đường bờ trong hợp lệ tại khu vực cảng, không tồn tại bãi tự nhiên.	Biên hình học rất rõ; thường song song tuyến cầu cảng; phản xạ đồng nhất; ổn định tuyệt đối.	Tường cầu cảng/bến tàu; cao độ ổn định; chịu tác động sóng tàu và triều.

Bờ nhân tạo – Dấu hiệu tương tác công trình – tự nhiên (kiểm chứng)	29	Vùng xói chân kè	Khu vực xói lở cục bộ phát triển ở chân kè do phản xạ sóng và dòng chảy tập trung; phản ánh tác động phụ của công trình đến động lực bờ.	Dải tối/loang màu sạt chân kè; hình dạng hẹp, kéo dài; biến đổi theo thời gian ngắn.	Hố xói, mất vật liệu nền; có thể lộ cấu kiện móng kè.
	30	Dải bồi tụ phía sau hoặc hai bên công trình	Khu vực bồi tụ trầm tích do thay đổi chế độ sóng–dòng chảy bởi công trình; phản ánh sự điều chỉnh cục bộ của hệ trầm tích.	Dải sáng hình lưỡi/tam giác; lệch về một phía công trình; biến động theo mùa.	Cát/bùn cát mới tích tụ; bề mặt toai; có thể xuất hiện thảm cỏ tiên phong.
	31	Biên phản xạ sóng trước công trình	Vùng chịu tác động mạnh của sóng phản xạ từ công trình cứng; biểu hiện năng lượng sóng tập trung, không đại diện ranh giới ổn định.	Dải bọt sóng trắng, nhiều cao; thường ngay trước mặt kè hoặc tường đứng.	Sóng dội mạnh; xáo trộn bề mặt bãi; không có thực vật bám.

Phụ lục 5: Thông tin các loại ảnh được sử dụng trong luận án

Khu vực	Ảnh	Thời gian thu nhận ảnh
Vịnh Đà Nẵng	Ảnh down từ Google Earth	21/4/2002; 30/10/2002; 10/5/2009; 23/7/2009; 10/5/2009; 3/2/2010; 24/7/2011; 21/9/2012; 30/5/2013; 28/3/2014; 30/3/2014; 28/6/2015; 6/4/2016; 18/9/2016; 14/6/2017; 8/5/2018; 9/5/2018; 15/2/2019; 13/5/2020; 16/5/2021; 28/6/2021; 24/5/2022; 7/5/2023
	Ảnh UAV	7/2022; 18/6/2023; 7/2025
	Ảnh Sentinel 2	01/06/2023, 21/06/2023; 06/07/2023; 11/07/2023
Cửa Đại	Ảnh down từ Google Earth	10/11/2004; 7/6/2011; 10/4/2012; 1/3/2014; 10/2/2015; 10/4/2017; 5/9/2018; 7/6/2019; 26/6/2019; 15/7/2019; 14/6/2021; 25/6/2021; 24/5/2022; 7/5/2023; 4/3/2024
	Ảnh UAV	7/2022; 19/6/2023; 7/2025
	Ảnh Sentinel 2	01/06/2023, 21/06/2023; 06/07/2023; 11/07/2023
Núi Thành	Ảnh down từ Google Earth	6/4/2002; 7/6/2011; 8/2/2011; 10/4/2012; 22/5/2013; 2/3/2014; 1/3/2014; 17/6/2016; 11/7/2016; 30/7/2016; 10/3/2017; 10/4/2017; 11/4/2018; 24/4/2018; 13/5/2018; 5/9/2018; 14/5/2019; 7/6/2019; 14/6/2021; 25/6/2021; 24/5/2022; 10/4/2022; 18/4/2022; 25/5/2023; 18/5/2023; 4/5/2023
	Ảnh UAV	7/2022; 21/6/2023; 7/2025
	Ảnh Sentinel 2	01/06/2023, 21/06/2023; 06/07/2023; 11/07/2023
Huế	Ảnh down từ Google Earth	22/5/2002; 7/5/2006; 29/1/2017; 4/3/2017; 1/5/2017; 9/5/2017; 23/6/2017

Bình Định	Ảnh down từ Google Earth	7/5/2020; 18/5/2010; 3/5/2013; 3/2/2014; 9/2/2014; 27/4/2019; 30/2/2019
Quảng Ngãi	Ảnh down từ Google Earth	4/11/2013; 3/2/2014; 3/2/2014; 18/2/2019; 24/4/2019; 14/5/2019