

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ MT

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI MIỀN NAM

LÊ THỊ MỸ DIỆP

**NGHIÊN CỨU XÂM NHẬP MẶN SÔNG VỆ - QUẢNG NGÃI
TRONG BỐI CẢNH HIỆN TẠI VÀ TƯƠNG LAI (BIẾN ĐỔI
KHÍ HẬU)**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH - NĂM 2025

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ MT

VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI VIỆT NAM
VIỆN KHOA HỌC THỦY LỢI MIỀN NAM

NGHIÊN CỨU CỨU XÂM NHẬP MẶN SÔNG VỆ - QUẢNG NGÃI
TRONG BỐI CẢNH HIỆN TẠI VÀ TƯƠNG LAI (BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU)

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT
NGÀNH: MÔI TRƯỜNG ĐẤT VÀ NƯỚC
MÃ NGÀNH: 9440303

Nghiên cứu sinh:	LÊ THỊ MỸ DIỆP
Cán bộ hướng dẫn:	PGS.TS. Lương Văn Thanh PGS.TSKH Bùi Tá Long

Thành phố Hồ Chí Minh - Năm 2025

LỜI CAM ĐOAN

Tác giả xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của bản thân tác giả. Các kết quả nghiên cứu và các kết luận trong luận án này là trung thực, và không sao chép từ bất kỳ một nguồn nào và dưới bất kỳ hình thức nào. Việc tham khảo các nguồn tài liệu (nếu có) đã được thực hiện trích dẫn và ghi nguồn tài liệu tham khảo đúng quy định.

Tác giả luận án



Lê Thị Mỹ Diệp

LỜI CẢM ƠN

Để hoàn thành luận án “ Nghiên cứu xâm nhập mặn sông Vệ - Quảng Ngãi trong bối cảnh hiện tại và tương lai (biến đổi khí hậu)”, tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành đến giáo viên hướng dẫn đã nhiệt tình chỉ dạy, truyền đạt những kiến thức quý báu trong suốt thời gian nghiên cứu sinh thực hiện luận án.

Quý Thầy Cô và các cán bộ, công nhân viên Viện Khoa học Thủy lợi Miền nam đã tạo điều kiện thuận lợi cho NCS học tập và làm việc.

Công ty TNHH Thương Mại và Công nghệ Môi Trường MD đã hỗ trợ, tạo điều kiện và động viên tinh thần NCS trong suốt thời gian học tập và nghiên cứu.

Các thành viên thuộc nhóm ENVIM, Trường Đại học Bách khoa Tp.HCM và rất nhiều các anh chị em đồng nghiệp khác đã hỗ trợ NCS trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tập thể cô chú, anh chị tại các thôn An Chuẩn, An Mô, xã Đức Lợi, huyện Mộ Đức; thôn Đại Bình, Thế Bình, Đồng Viên, Đông Mỹ, xã Nghĩa Hiệp, huyện Tư Nghĩa, tỉnh Quảng Ngãi đã giúp đỡ và cung cấp số liệu quý giá cho NCS thực hiện tốt luận án của mình.

Lời cuối cùng, con xin cảm ơn Ba Mẹ đã sinh thành, dưỡng dục và bên con trong suốt thời gian qua. Xin chân thành cảm ơn các thành viên trong gia đình và bạn bè đã động viên trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Một lần nữa tôi xin chân thành cảm ơn!

Nghiên cứu sinh



Lê Thị Mỹ Diệp

TÓM TẮT

Biến đổi khí hậu là một trong những thách thức lớn nhất đối với nhân loại, tác động nghiêm trọng đến sản xuất, đời sống và môi trường trên phạm vi toàn thế giới. Lượng mưa giảm, mực nước biển dâng dẫn tới xâm nhập mặn, tác động trực tiếp tới nguồn nước, ảnh hưởng đến nông nghiệp, gây rủi ro lớn đối kinh tế - xã hội trong tương lai. Các nghiên cứu và đánh giá xâm nhập mặn chủ yếu diễn ra tại các tỉnh thành phía Bắc và Đồng bằng sông Cửu Long, trong khi nghiên cứu điển hình tại vùng duyên hải miền Trung còn rất khiêm tốn về số lượng lẫn kết quả.

Luận án có mục tiêu đánh giá ảnh hưởng của xâm nhập mặn tới vùng duyên hải tỉnh Quảng Ngãi trong bối cảnh hiện tại và tương lai của biến đổi khí hậu. Khu vực nghiên cứu được lựa chọn là cửa sông Vệ, tỉnh Quảng Ngãi. Đã làm rõ cơ chế cơ chế truyền mặn, sự phát triển của nêm mặn tại vùng cửa sông Vệ và làm rõ sự phụ thuộc xâm nhập mặn vào các yếu tố khí tượng thủy văn, địa hình. Luận án cũng đã đưa ra dự báo xâm nhập mặn cho kịch bản BĐKH, trên cơ sở đó đánh giá tác động của BĐKH tới xâm nhập mặn. Trên cơ sở các kết quả đạt được đã đưa ra đề xuất những giải pháp khai thác trong điều kiện hiện nay cũng như BĐKH

Kết quả của luận án có thể sử dụng phục vụ cho đề xuất giải pháp khai thác nước vùng cửa sông chịu sự tác động của xâm nhập mặn.

Từ khóa : Biến đổi khí hậu, Xâm nhập mặn, Nêm mặn, Cửa sông phân tầng, Sông Vệ (Quảng Ngãi).

ABSTRACT

Climate change is one of humanity's biggest challenges, affecting production, life and the environment worldwide. Reduced rainfall and rising sea levels lead to saltwater intrusion, directly affecting water sources and agriculture and causing significant socio-economic risks in the future. Research and assessment of salinity intrusion mainly occur in the Northern provinces and the Mekong Delta, while typical studies in the Central Coast region still need to be more modest in quantity and results.

The thesis aims to evaluate the impact of salinity intrusion on the coastal area of Quang Ngai province in the current and future context of climate change. The research area chosen is Ve River estuary, Quang Ngai province. The salinity transmission mechanism and the development of the salinity wedge in the Ve River estuary have been clarified, and the dependence of saline intrusion on hydrometeorological and topographic factors has been clarified. The thesis also made a forecast of saltwater intrusion for climate change scenarios, on that basis to evaluate the impact of climate change on saltwater intrusion. Based on the results, solutions for exploitation in current conditions and climate change have been proposed.

The thesis results can be used to propose solutions for exploiting water in estuary areas affected by saline intrusion.

Keywords Climate change, Intrusion, Salty wedge, Stratified estuary, Ve river (Quang Ngai)

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
TÓM TẮT	iii
ABSTRACT	iv
MỤC LỤC	v
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT	viii
DANH MỤC BẢNG	ix
DANH MỤC HÌNH	xi
MỞ ĐẦU	1
1. Tính cấp thiết	1
2. Mục tiêu nghiên cứu	3
2.1. Mục tiêu chung	3
2.2. Mục tiêu cụ thể.....	3
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	4
3.1. Đối tượng nghiên cứu	4
3.2. Phạm vi nghiên cứu	4
4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu.....	5
4.1. Cách tiếp cận.....	5
4.2. Phương pháp nghiên cứu	6
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án	7
5.1. Ý nghĩa khoa học	7
5.2. Ý nghĩa thực tiễn.....	8
6. Những đóng góp mới của luận án	8
7. Cấu trúc của luận án	8
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN	10

1.1. Tổng quan về xâm nhập mặn	10
1.1.1 Định nghĩa xâm nhập mặn	10
1.1.2 Cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông.....	11
1.1.3 Hiện trạng nghiên cứu xâm nhập mặn tại Việt Nam.....	14
1.2. Quản lý và đánh giá xâm nhập mặn	16
1.2.1. Nhiệm vụ quản lý xâm nhập mặn.....	16
1.2.2. Phương pháp nghiên cứu xâm nhập mặn	19
1.2.3. Đánh giá xâm nhập mặn trong điều kiện cửa sông phân tầng.....	20
1.3. Tổng quan về sông Vệ.....	22
1.3.1. Hệ thống sông ngòi tỉnh Quảng Ngãi.....	22
1.3.2. Điều kiện tự nhiên khu vực nghiên cứu	24
1.3.3. Đánh giá hiện trạng xâm nhập mặn cửa sông Vệ.....	27
1.3.4. Mạng lưới trạm quan trắc khí tượng thủy văn.....	28
CHƯƠNG 2: PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	32
2.1 Sơ đồ nghiên cứu và phương pháp tiếp cận	32
2.2 Các mô hình toán được sử dụng.....	34
2.2.1. Thiết lập mô hình tính toán.....	39
2.2.2. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình thủy lực.....	41
2.2.3. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình truyền mặn.....	42
2.2.4. Các bước ứng dụng mô hình toán	44
2.3 Xây dựng bộ thông số lưu ý tới BĐKH.....	46
2.4 Lựa chọn phương án phân tích	50
2.4.1. Lựa chọn thời kỳ phân tích phân tầng và nêm mặn	50
2.4.2. Lựa chọn thời kỳ phân tích phân tầng cho kịch bản BĐKH.....	54
2.5 Lựa chọn tuyến phân tích kết quả xâm nhập mặn	55
2.5.1. Tuyến trích xuất kết quả bản đồ theo phương đứng	55
2.5.2. Tuyến trích xuất kết quả theo mặt cắt ngang sông.....	59
2.5.3. Tuyến trích xuất kết quả cho tính hồi quy tuyến tính	60
2.6 Mô hình tính toán hệ số phân tầng.....	61
CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN	64
3.1 Kết quả tính toán tham số phân tầng	64

3.2 Kết quả phân tích sự phân tầng mặn vùng cửa sông Vệ	69
3.2.1. Phân tích nêm mặn theo mùa năm 2018	69
3.2.2. Phân tích mặn theo thời kỳ dọc theo tuyến sông	72
3.2.3. Phân tích truyền mặn theo mặt cắt ngang trong từng thời kỳ	77
3.2.4. Phân bố mặn theo mặt bằng trong từng thời kỳ	79
3.3 Kết quả phân tích sự phân tầng mặn cho kịch bản BĐKH.....	84
3.4. Đánh giá sự khác biệt kịch bản hiện trạng và BĐKH.....	92
3.4.1. Hình dáng và độ dày nêm mặn.....	92
3.4.2. Phạm vi xâm nhập mặn	92
3.4.3. Mức độ phân tầng mặn.....	92
3.4.4. Mùa khô	95
3.4.5. Phân tầng vào mùa mưa.....	96
3.4.6. Thảo luận	97
3.4.7. Yếu tố khí tượng	99
3.4.8. Yếu tố thủy văn.....	101
3.4.9. Yếu tố địa hình.....	103
3.5 Đề xuất giải pháp khai thác nước tại vùng cửa sông Vệ.....	104
3.5.1. Lựa chọn khả năng sử dụng nước theo không gian và thời gian	104
3.5.2. Lựa chọn vị trí xây công trình cấp nước	104
3.5.3. Lựa chọn vị trí hệ thống giám sát mặn tự động	105
3.5.4. Ứng dụng thiết kế trạm bơm.....	105
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	108
DANH MỤC CÁC CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ.....	111
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	112
PHỤ LỤC	xiii
Phụ lục 1. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng.....	xiii
Phụ lục 2. Các thiết bị và hình ảnh đo đạc.....	xxviii

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

BĐKH	Biến đổi khí hậu
Bộ TNMT	Bộ Tài nguyên và Môi trường
DHI	Danish Hydraulic Institute - Viện Thủy lợi Đan Mạch
GIS	Geographic Information System - Hệ thống thông tin địa lý
HD	Hydrodynamic Module - Mô đun thủy lực
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi khí hậu
KTTV	Khí tượng thủy văn
MIKE	Magellan Inamori Kyocera Echelle - Mô hình thủy lực
NAM	Nedbor Afstromnings Model - Mô hình mưa rào dòng chảy
NSE	Nash-Sutcliffe - Hệ số hiệu quả
R^2	R square - R^2 hiệu chỉnh
RCP	Representative Concentration Pathway - Kịch bản phát thải khí nhà kính
SWAT	Soil and water Assessment Tool - Công cụ đánh giá đất và nước
Tp.HCM	Thành phố Hồ Chí Minh
XNM	Xâm nhập mặn

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1-1: Đặc trưng thủy văn của các sông chính tỉnh Quảng Ngãi.....	22
Bảng 1-2. Lưu lượng đỉnh lũ tại các trạm	26
Bảng 1-3. Mức nước lũ cao nhất theo tần suất tại các trạm.....	26
Bảng 1-4. Thống kê các trạm đo khí tượng, mưa	29
Bảng 1-5. Thống kê các trạm đo thủy văn	30
Bảng 2-1. Các thông số hiệu chỉnh của mô hình NAM	35
Bảng 2-2. Kết quả tính toán các chỉ số ở bước hiệu chỉnh mô hình.....	43
Bảng 2-3. Các thời điểm trích xuất kết quả trong mùa kiệt.....	52
Bảng 2-4. Các thời điểm trích xuất kết quả mùa mưa - lũ	53
Bảng 2-5. Các thời điểm trích xuất kết quả mùa kiệt, 2035	55
Bảng 2-6. Toạ độ và cao trình các điểm trích xuất kết quả.....	56
Bảng 2-7. Độ sâu theo tầng tại 2 vị trí mặt cắt MC0 và MC3	57
Bảng 2-8. Toạ độ và độ sâu các điểm trích xuất kết quả	60
Bảng 3-1. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC0	65
Bảng 3-2. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC3	66
Bảng 3-3. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC4	67
Bảng 3-4. Phân bố mặn trung bình mùa khô 2018.....	71
Bảng 3-5. Phân bố mặn trung bình mùa mưa 2018	72
Bảng 3-6. Xu thế truyền mặn lúc chân triều và đỉnh triều	76
Bảng 3-7. Xu thế truyền mặn theo mặt cắt ngang lúc triều thấp và triều cao.....	79
Bảng 3-8. Phân bố mặn theo mặt bằng trong từng thời kỳ triều	84
Bảng 3-9. So sánh phân tầng mặn theo kịch bản hiện trạng và BĐKH	94
Bảng PL 1. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC0.....	xiii
Bảng PL 2. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC3.....	xviii

Bảng PL 3. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC4..... xxiii

DANH MỤC HÌNH

Hình 1-1. Cấu trúc “nêm mặn” (“sall wedge”)	12
Hình 1-2. Cơ chế xâm nhập mặn lưu thông tại cửa sông.....	13
Hình 1-3. Cơ chế xâm nhập mặn do thủy triều.....	14
Hình 1-4. Các con sông lớn của Quảng Ngãi	23
Hình 1-5. Lưu vực sông Vệ	25
Hình 1-6. Các vị trí quan trắc liên quan.....	29
Hình 2-1. Sơ đồ nghiên cứu	32
Hình 2-2. Phạm vi và lưới tính toán tam giác cho vùng nghiên cứu	40
Hình 2-3. Sơ đồ họa các biên tính toán trong mô hình tính.....	40
Hình 2-4. Kết quả kiểm định (validation) mực nước tại các mặt cắt.....	42
Hình 2-5. Kết quả kiểm định mặn theo 3 tầng (tầng mặt, tầng giữa, tầng đáy).....	44
Hình 2-6. Khung nghiên cứu với các mô hình toán được sử dụng.	45
Hình 2-7. Các nội dung và các bước xây dựng bộ dữ liệu lưu ý tới biến đổi khí hậu	47
Hình 2-8. Biểu đồ lượng mưa trung bình ngày của trạm Ba Tơ	48
Hình 2-9. Lượng bốc hơi trung bình tháng của trạm Ba Tơ thực đo [8] [10].....	49
Hình 2-10. Kết quả chạy NAM xuất ra lưu lượng biên các kịch bản xem xét.	50
Hình 2-11. Lưu lượng thượng nguồn tháng 7/2018 [10]	51
Hình 2-12. Biểu đồ lưu lượng, mực nước ngày 20/7/2018 [8][10].....	51
Hình 2-13 Biểu đồ lưu lượng và mực nước ngày 09/12/2018	53
Hình 2-14 Lưu lượng thượng nguồn cho kịch bản BĐKH năm 2035, đơn vị: m ³ /s.....	54
Hình 2-15 Mực nước cho kịch bản BĐKH năm 2035, đơn vị: m.....	55
Hình 2-16. Sơ họa tuyến trích kết quả dọc nhánh sông Vệ	58
Hình 2-17 Sơ đồ họa tuyến cắt ngang.....	59
Hình 2-18 Sơ họa tuyến trích xuất kết quả dọc nhánh sông Vệ.....	61
Hình 3-1. Sơ đồ bố trí các điểm khảo sát dọc sông Vệ.....	64
Hình 3-2. Quan hệ n và L thời điểm chân - đỉnh triều thời kỳ triều cao - thấp, ngày 07/10/2018	68
Hình 3-3. Quan hệ n và L thời điểm chân - đỉnh triều thời kỳ triều cao - thấp, ngày 08/10/2018	68
Hình 3-4. Bản đồ truyền mặn theo mùa năm 2018 theo mặt cắt dọc sông	70
Hình 3-5. Biểu đồ độ mặn trung bình mùa khô 2018	71
Hình 3-6. Biểu đồ độ mặn trung bình mùa mưa 2018	72
Hình 3-7. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều thấp thời điểm theo tuyến.	74

Hình 3-8. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều cao thời điểm chân triều theo tuyến.....	76
Hình 3-9. Cơ chế truyền mặn theo mặt cắt ngang tại MC0	77
Hình 3-10. Cơ chế truyền mặn tại mặt cắt ngang MC3	78
Hình 3-11. Phạm vi truyền mặn thời điểm đỉnh triều thời kỳ triều cao.....	80
Hình 3-12. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều thấp theo tuyến.	82
Hình 3-13. Bản đồ truyền mặn thời kỳ triều cao theo mặt cắt dọc sông.....	83
Hình 3-14. Bản đồ truyền mặn theo mùa năm 2035 theo mặt cắt dọc sông	85
Hình 3-15. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều thấp theo tuyến.	87
Hình 3-16. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều cao theo tuyến.....	89
Hình 3-17. Cơ chế truyền mặn theo mặt cắt ngang tại MC0	90
Hình 3-18. Cơ chế truyền mặn tại mặt cắt ngang MC3	91
Hình 3-19. So sánh cơ chế truyền mặn mùa khô giữa kịch bản hiện trạng và kịch bản BĐKH 2035: a/ Bờ trái; b/ Tim sông; c/ Bờ phải.....	93
Hình 3-20. So sánh cơ chế truyền mặn mùa mưa giữa kịch bản hiện trạng và kịch bản BĐKH 2035: a/ Bờ trái; b/ Tim sông; c/ Bờ phải.....	96
Hình 3-21. Biểu đồ lượng mưa, bốc hơi 2015-2019, 2035.....	97
Hình 3-22. Biểu đồ lưu lượng 2015-2019 và năm 2035 theo kịch bản BĐKH	98
Hình 3-23. Tương quan giữa độ mặn và lượng mưa mùa kiệt giai đoạn 2015-2019.....	100
Hình 3-24. Tương quan giữa độ mặn và bốc hơi mùa kiệt, 2015- 2019.....	101
Hình 3-25. Tương quan giữa độ mặn và lưu lượng mùa kiệt giai đoạn 2014-2019.	102
Hình 3-26. Tương quan giữa độ mặn và mực nước vào mùa kiệt, 2015-2019.....	102
Hình 3-27. Tương quan giữa độ mặn và độ sâu vào năm 2015 – 2019	103
Hình PL1. Hình ảnh đo thủy trực và độ mặn	xxviii
Hình PL2. Hình khảo sát tại Đức Lợi, Tp Quảng Ngãi lúc 11:30 ngày 09/10/2018	xxix

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết

Biến đổi khí hậu (BĐKH) cùng suy giảm tài nguyên thiên nhiên, ô nhiễm môi trường là những chủ đề được đặc biệt quan tâm tại Việt Nam hiện nay, làm gia tăng những hiểm họa từ khí hậu như thiên tai, làm suy giảm năng suất, và ảnh hưởng tiêu cực đến các thành tựu phát triển kinh tế - xã hội của đất nước [3].

Các vùng biển nước nông nằm trong số các vùng phát triển kinh tế thuận lợi. Ủy ban Liên Chính phủ về Biến đổi Khí hậu (IPCC) trong báo cáo đánh giá gần đây đã trình bày kết quả khảo sát, nghiên cứu về biến đổi khí hậu ở các vùng ven biển, đã đưa ra chuỗi số liệu gồm nhiệt độ đại dương tăng, lượng mưa thay đổi, lưu lượng sông ở thượng nguồn biến động và mực nước biển dâng. Điều này sẽ dẫn đến sự gia tăng xâm nhập mặn.

Khí hậu tại Việt Nam đã có những thay đổi rõ nét trong những thập kỷ gần đây, theo đó nhiệt độ trung bình năm thời kỳ 1958-2018 đã gia tăng khoảng 0,89°C (Báo cáo Đánh giá khí hậu quốc gia, 2022). Cùng với sự gia tăng của nhiệt độ, các hiện tượng thời tiết cực đoan khác cũng đã gia tăng về tần suất và cường độ. Hạn hán đã xuất hiện thường xuyên hơn trong mùa khô; số lượng bão mạnh đã gia tăng; số ngày rét đậm, rét hại mặc dù có xu thế giảm nhưng xuất hiện những đợt rét dị thường. Theo các kịch bản đã được Bộ Tài nguyên và Môi trường công bố, những thay đổi này được dự kiến sẽ ngày càng trở nên khốc liệt hơn. Bên cạnh những thách thức do BĐKH, Việt Nam còn phải đối mặt với những thách thức về tài nguyên, môi trường, bởi hiện trạng khai thác tài nguyên một cách triệt để [3].

Đứng trước những thách thức về BĐKH cũng như quản lý tài nguyên và môi trường, Việt Nam đã sớm có những hoạt động cụ thể nhằm ứng phó với BĐKH, quản lý hiệu quả tài nguyên thiên nhiên và bảo vệ môi trường. Hoạt động cụ thể nhất là hai chương trình khoa học công nghệ cấp quốc gia phục vụ ứng phó với BĐKH, quản lý tài nguyên và môi trường. Hai chương trình đã đạt được nhiều thành tựu trong giai đoạn 2011-2020, cung cấp cơ sở khoa học và thông tin phục vụ việc hoạch định chính sách

cũng như thực hiện các hành động cụ thể ứng phó với BĐKH, quản lý tài nguyên và bảo vệ môi trường. Tuy nhiên, việc nghiên cứu cho những lĩnh vực điển hình như xâm nhập mặn chịu tác động của BĐKH tại các con sông của miền Trung còn hạn chế.

Việt Nam hiện có 28 tỉnh, thành với 125 huyện ven biển, trải dọc theo bờ biển dài hơn 3260 km, từ Quảng Ninh đến Kiên Giang do vậy xâm nhập mặn là đối tượng nghiên cứu của nhiều các tác giả [3] – [7], [9], [11] – [25] trong đó có lưu ý tới biến đổi khí hậu được thực hiện tại một số tỉnh thành như Bến Tre [23], Thái Bình [3], Nam Định [5], Đồng Nai [19], Vĩnh Long [22]. Đặc biệt, xâm nhập mặn tại Đồng Bằng Sông Cửu Long là đối tượng nghiên cứu của nhiều tác giả [11], [11], [20], [23], [24]. Với khu vực này dự báo xâm nhập mặn chính xác có vai trò rất lớn đối với việc chủ động nông nghiệp – ngư nghiệp và quy hoạch sử dụng đất vùng kinh tế ven biển, đặc biệt là trong điều kiện biến đổi khí hậu hiện nay.

Luận án lựa chọn lưu vực hạ lưu sông Vệ làm khu vực nghiên cứu, là vùng đất điển hình thuộc vùng duyên hải tỉnh Quảng Ngãi. Nhờ có thiên nhiên ưu đãi cùng với vị trí địa lý thuận lợi mà các huyện duyên hải có tốc độ tăng trưởng kinh tế khá nhanh, đặc biệt là các ngành nông, lâm, ngư nghiệp luôn chiếm tỷ trọng khá cao và đóng góp không nhỏ cho sự phát triển của toàn tỉnh. Trong những năm gần đây, ảnh hưởng của BĐKH dẫn tới tình trạng xâm nhập mặn tại khu vực này diễn biến phức tạp. Điều này đặt ra thách thức và yêu cầu cần phải phân tích xu thế, cơ chế xâm nhập mặn của khu vực và dự đoán được diễn biến xâm nhập mặn trong tương lai để từ đó đưa ra được những giải pháp giảm thiểu tác động trong điều kiện thời tiết cực đoan.

Như vậy, biến đổi khí hậu đang ảnh hưởng đến phát triển kinh tế-xã hội Việt Nam. Mực nước biển dâng, nhiệt độ tăng, lượng mưa thay đổi làm gia tăng xâm nhập mặn ở vùng ven biển, đặc biệt nghiêm trọng tại ĐBSCL. Trong khi khu vực này đã được nghiên cứu nhiều, miền Trung trên một lưu vực cụ thể như sông Vệ tại Quảng Ngãi chưa được nghiên cứu, dù có vai trò quan trọng trong nông-ngư nghiệp. Luận án tập trung nghiên cứu khu vực điển hình này nhằm phân tích cơ chế xâm nhập mặn và dự báo diễn biến tương lai để đề xuất giải pháp giảm thiểu.

Sự cần thiết về mặt khoa học của luận án nằm ở việc bổ sung khoảng trống nghiên cứu về xâm nhập mặn tại các lưu vực ven biển miền Trung, đặc biệt là sông Vệ (Quảng

Ngãi)—khu vực chưa được khảo sát đầy đủ dù có vai trò quan trọng trong phát triển nông–ngư nghiệp. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu làm gia tăng mực nước biển, thay đổi dòng chảy và nhiệt độ, việc phân tích cơ chế truyền mặn, đánh giá tác động của các yếu tố khí tượng–thủy văn–hải văn, và ứng dụng mô hình hóa để dự tính diễn biến tương lai là cần thiết để cung cấp cơ sở khoa học cho quy hoạch và thích ứng hiệu quả.

Từ thực tiễn trên, các câu hỏi nghiên cứu được đặt ra như sau:

- Truyền mặn tại cửa sông Vệ được diễn ra theo cơ chế nào? Có hay không sự xuất hiện nêm mặn? Sự phụ thuộc phạm vi, mức độ xâm nhập mặn vào yếu tố mùa (mưa, khô, kiệt, lũ), địa hình, khí tượng, thủy văn, hải văn diễn ra như thế nào?
- Yếu tố BĐKH tác động như thế nào tới xâm nhập mặn? phương pháp tính toán nào dựa trên phương pháp mô hình hóa được áp dụng.
- Các giải pháp thích ứng với xâm nhập mặn do BĐKH tại một lưu vực điển hình như sông Vệ được thực hiện thế nào? Việc lấy nước ngọt phục vụ cho đời sống và sinh hoạt có thể thực hiện theo giờ và ở những vị trí nào?

2. Mục tiêu nghiên cứu

2.1. Mục tiêu chung

Đánh giá cơ chế, diễn biến và tác động của xâm nhập mặn tại vùng cửa sông Vệ thuộc tỉnh Quảng Ngãi trong bối cảnh biến đổi khí hậu, từ đó đề xuất các giải pháp thích ứng hiệu quả với điều kiện thời tiết cực đoan và quản lý tài nguyên nước vùng duyên hải.

2.2. Mục tiêu cụ thể

- Làm rõ cơ chế cơ chế truyền mặn, cũng như sự hình thành các nêm mặn, sự phát triển của nêm mặn tại vùng cửa sông Vệ.
- Dự tính xâm nhập mặn cho kịch bản BĐKH, trên cơ sở đó đánh giá tác động của BĐKH tới xâm nhập mặn.
- Làm rõ sự phụ thuộc xâm nhập mặn vào các yếu tố khí tượng thủy văn, địa hình

- Đề xuất những giải pháp khai thác trong điều kiện hiện nay cũng như BĐKH , sử dụng nước cho khu vực chịu ảnh hưởng.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là hiện tượng xâm nhập mặn tại vùng cửa sông Vệ dưới tác động của biến đổi khí hậu. Nghiên cứu đánh giá cả kịch bản hiện trạng (dựa trên chuỗi số liệu khí tượng thủy văn giai đoạn 2015–2019) và kịch bản BĐKH có xét đến ảnh hưởng của nước biển dâng, biến động lượng mưa và bốc hơi. Xâm nhập mặn được phân tích theo phạm vi lan sâu vào đất liền, mức độ mặn theo chiều dọc sông, mặt cắt ngang, theo chiều sâu, đồng thời làm rõ cơ chế truyền mặn và sự hình thành, tồn tại của nêm mặn tại khu vực nghiên cứu.

3.2. Phạm vi nghiên cứu

Không gian nghiên cứu được xác định là lưu vực sông Vệ, sông lớn thứ hai trong bốn hệ thống sông chính của tỉnh Quảng Ngãi, có diện tích khoảng 1.263 km², chiếm 24,51% tổng diện tích tự nhiên toàn tỉnh. Chuỗi dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu gồm:

- Nhiệt độ giai đoạn 2010–2019, thu thập từ trạm khí tượng Ba Tơ và Quảng Ngãi.
- Lượng mưa giai đoạn 1986–2019, từ cùng hai trạm nói trên.
- Dữ liệu thực địa về độ mặn được đo liên tục trong 48 giờ vào các ngày 7–8/10/2018.
- Dữ liệu thực đo mặn giai đoạn 1998–2010 (không liên tục) được kế thừa phục vụ phân tích bổ sung.

Về cấu trúc địa hình: Địa hình và lòng dẫn được giả định là ổn định trong suốt thời gian nghiên cứu, ít biến động do quá trình bồi lắng hay xói lở, đây cũng là một giới hạn cần lưu ý khi phân tích hiện tượng xâm nhập mặn.

4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

4.1. Cách tiếp cận

a) Tiếp cận thực tiễn, hệ thống và tổng hợp

Xâm nhập mặn là một trong loại hình được quy định trong Luật phòng, chống thiên tai, cũng như trong Quyết định 18/2021/QĐ-TTg. Đối tượng nghiên cứu là xâm nhập mặn vùng cửa sông gồm những vấn đề về khí tượng – thủy văn – hải văn, vùng giao tiếp sông – biển. Khu vực nghiên cứu gồm các yếu tố ràng buộc như địa hình, khí hậu, điều kiện tự nhiên, kinh tế - xã hội. Để đạt được mục tiêu của luận án cần cách tiếp cận hệ thống, tổng hợp. Trong quá trình thực hiện, cần bám sát các văn bản pháp lý để đảm bảo phù hợp với thực tiễn của địa phương, thuộc miền Trung của Việt Nam. Cách tiếp cận thực tế đòi hỏi phải điều tra, khảo sát thực địa để chính xác hơn khi lưu ý tới các yếu tố phụ thuộc của hiện tượng xâm nhập mặn.

b) Tiếp cận kế thừa tri thức, kinh nghiệm và cơ sở dữ liệu đã có một cách chọn lọc

Nghiên cứu xâm nhập mặn đã thực hiện từ những năm 60 của thế kỷ trước bởi nhiều nhà khoa học đi trước, do vậy việc kế thừa tri thức, kinh nghiệm là rất quan trọng. Trong luận án thực hiện tổng quan, phân tích các công trình được thực hiện trong nước để tìm ra điểm mạnh cũng như hạn chế cần khắc phục. Đặc biệt trong nghiên cứu đã ứng dụng các mô hình 2 và 3 chiều phân tích sự truyền mặn, sự hình thành nêm mặn vào các thời điểm khác nhau. Luận án cũng đã kế thừa dữ liệu từ các đề tài, công bố khoa học trong các tạp chí khoa học trong ngoài nước, số liệu đo đạc khí tượng – thủy văn – hải văn. Các nghiên cứu đi trước là sản phẩm vô cùng quý giá, là kết quả của bao thế hệ đã dày công nghiên cứu, đầu tư về sức lực, trí tuệ và vật chất rất đáng trân trọng.

c) Tiếp cận phương pháp công nghệ tiên tiến

Luận án đã áp dụng các công nghệ tiên tiến đang được áp dụng như viễn thám kết hợp với phép đo để làm rõ xu thế biến đổi khí hậu trên khu vực nghiên cứu. Luận án cũng đã thực hiện phép đo mặn liên tục trong vòng 48 giờ tại các vị trí cũng như độ sâu khác nhau. Các số liệu thực đo này được sử dụng cho bước kiểm định mô hình truyền mặn 2, 3 chiều. Cùng với đó công nghệ ứng dụng kết hợp nhiều loại mô hình: thủy văn, thủy lực, truyền mặn được áp dụng. Việc xử lý kết quả chạy mô hình được tiến hành

trên nền tảng công nghệ GIS giúp cho trực quan hóa kết quả. Đây có thể xem như đóng góp của luận án này.

4.2. Phương pháp nghiên cứu

Để thực hiện các nội dung của đề tài nhằm đạt được mục tiêu nghiên cứu đã đặt ra, các phương pháp sau sẽ được sử dụng sau đây:

(1) Phương pháp thu thập, kế thừa và tổng hợp tài liệu:

- Thu thập/ kế thừa các tài liệu điều kiện tự nhiên, kinh tế xã hội, đặc biệt số liệu, tài liệu chuyên môn về khí tượng, thủy văn, hải văn từ các nghiên cứu đã có và từ các cơ quan quản lý liên quan;
- Thu thập, tổng hợp tài liệu về các nghiên cứu trong, ngoài nước, tổng kết kinh nghiệm, chọn lọc và tiếp thu kết quả, đặc biệt là các nghiên cứu, tổng quan về xâm nhập mặn, và tác động của BĐKH đến xâm nhập mặn. Tham khảo các báo cáo, số liệu, kịch bản liên quan đến BĐKH của các tổ chức quốc tế, Bộ, Ban ngành, địa phương.

(2) Phương pháp điều tra khảo sát thực địa

Công tác khảo sát thực địa là cần thiết để bổ sung các thông tin và kiểm chứng tài liệu nhằm đảm bảo độ tin cậy về thông tin, số liệu phục vụ nghiên cứu:

- Làm việc với các cơ quan, chính quyền địa phương các tỉnh Quảng Ngãi để thu thập thông tin liên quan đến xâm nhập mặn trên lưu vực sông Vệ;
- Khảo sát sông Vệ, các trạm quan trắc khí tượng thủy văn liên quan;
- Thực hiện đo liên tục trong 48 tiếng các thông số: dòng chảy, mặn tại 3 tầng: mặt, giữa và đáy cửa sông Vệ.

(3) Phương pháp thực nghiệm và phân tích thống kê

Phương pháp này dùng để chỉnh lý và xử lý dữ liệu:

- Số liệu khí tượng, thủy văn được thống kê, phân tích nhằm đánh giá biến động của chúng dưới tác động của BĐKH;
- Sử dụng phương pháp tương quan để tìm mối liên hệ giữa số liệu thực đo và kết quả viễn thám cho lưu vực sông Vệ với 2 thông số lượng mưa và nhiệt độ; sử dụng công cụ excel thể hiện các biểu đồ từ đó nhận xét sự thay đổi khí tượng năm 2010-2019 của trạm.

- Phân tích, biện luận kết quả mô hình hóa xâm nhập mặn cho kịch bản nền 2018, so sánh với kịch bản BĐKH 2035 để từ đó rút ra các kết luận cần thiết.

(4) Phương pháp mô hình hóa

Trong luận án này, mô hình hóa là phương pháp đóng vai trò đặc biệt quan trọng để giải quyết mục tiêu nghiên cứu, cụ thể:

- Mô hình giải tích tính toán hệ số phân tầng,
- Mô hình SWAT giúp phân vùng theo các đơn vị thủy văn,
- Mô hình thủy văn NAM: giúp tạo biên lưu lượng cho mô hình thủy lực,
- MIKE 21 mô phỏng truyền mặn theo mặt cắt ngang dọc theo sông,
- MIKE 3 làm rõ cơ chế phân tầng theo các tuyến dọc theo sông, theo các độ sâu khác nhau.

(5) Phương pháp viễn thám và GIS

- Phương pháp ứng dụng công nghệ GIS: xử lý ảnh viễn thám nhiệt độ và lượng mưa toàn cầu; phân tích sự thay đổi nhiệt độ và lượng mưa theo không gian và thời gian.
- Sử dụng GIS để diễn giải số liệu dưới dạng bản đồ.

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

5.1. Ý nghĩa khoa học

Về mặt khoa học, luận án đã ứng dụng tổng hợp các nhóm mô hình toán học gồm mô hình thủy văn (SWAT, NAM), mô hình thủy lực (MIKE 21, MIKE 3 HD) và mô hình truyền mặn (MIKE 21, MIKE 3 AD), qua đó phân tích cơ chế truyền mặn và sự hình thành các nê-m mặn trong vùng cửa sông Vẹ. Nghiên cứu đã thực hiện đánh giá cụ thể vào hai thời điểm đặc trưng của chu kỳ triều: chân triều và đỉnh triều, nhằm làm rõ quá trình hình thành và phát triển của nê-m mặn. Ngoài ra, luận án cũng đã tiến hành phân tích mối tương quan giữa hiện tượng xâm nhập mặn với các yếu tố khí tượng, thủy văn và đặc điểm địa hình. Những kết quả thu được không chỉ mang ý nghĩa về mặt lý luận mà còn là cơ sở thực tiễn để các nhà nghiên cứu lựa chọn phương pháp và hướng tiếp cận phù hợp trong việc đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đến xâm nhập mặn tại các vùng cửa sông ven biển.

5.2. Ý nghĩa thực tiễn

Về mặt thực tiễn, luận án được triển khai tại lưu vực sông Vệ — một con sông tiêu biểu của khu vực miền Trung và tỉnh Quảng Ngãi. Thông qua việc xây dựng các kịch bản biến đổi khí hậu và dự tính diễn biến xâm nhập mặn, luận án đã cung cấp cơ sở dữ liệu khoa học phục vụ cho công tác quản lý tài nguyên nước và môi trường tại địa phương. Những kết quả nghiên cứu là nguồn tài liệu tham khảo có giá trị, hỗ trợ cập nhật kịch bản BĐKH cho lưu vực sông Vệ, đồng thời góp phần định hướng các giải pháp phát triển bền vững, thích ứng với tác động tiêu cực của BĐKH tới môi trường sống. Chính vì vậy, luận án thể hiện rõ tính ứng dụng thực tiễn phù hợp với cấp độ nghiên cứu sinh.

6. Những đóng góp mới của luận án

Luận án đã đề xuất một cách tiếp cận tích hợp nhằm đánh giá ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đến hiện tượng xâm nhập mặn tại vùng cửa sông Vệ. Các kết quả tính toán được thực hiện thông qua hệ thống mô hình gồm mô hình thủy văn, thủy lực và truyền mặn, được hiệu chỉnh phù hợp với đặc điểm khu vực nghiên cứu và dữ liệu quan trắc nhiều năm. Kịch bản hiện trạng giai đoạn 2015–2019 được lựa chọn đủ dài để nhận diện quy luật truyền mặn, làm cơ sở đối chiếu với kịch bản biến đổi khí hậu năm 2035. Bộ thông số khí hậu cho kịch bản BĐKH được xây dựng bằng phương pháp tích hợp giữa mô hình thống kê, công nghệ viễn thám, GIS và tài liệu chuyên ngành do Bộ Tài nguyên và Môi trường cung cấp. Luận án đã tiến hành so sánh và đánh giá sự khác biệt giữa hai kịch bản nêu trên, đồng thời phân tích nguyên nhân gây ra sự khác biệt. Trên nền tảng các kết quả nghiên cứu, luận án đề xuất nhóm giải pháp ứng phó và thích ứng hiệu quả với xâm nhập mặn trong điều kiện khí hậu cực đoan tại vùng cửa sông Vệ.

7. Cấu trúc của luận án

Luận án gồm tổng cộng 118 trang, cấu trúc gồm phần mở đầu, ba chương nội dung, phần kết luận và danh mục tài liệu tham khảo. Phần mở đầu trình bày tính cấp thiết, mục tiêu, nội dung, phạm vi, đối tượng nghiên cứu, ý nghĩa và tính mới của luận án, đồng thời luận chứng lý do chọn đề tài. Chương 1 (20 trang) tổng quan về hiện tượng xâm nhập mặn, các phương pháp quản lý và đánh giá, cũng như đặc điểm của lưu vực sông Vệ — vùng nghiên cứu chính. Chương 2 (34 trang) trình bày các nghiên cứu xâm

nhập mặn trong bối cảnh biến đổi khí hậu, lựa chọn phương pháp nghiên cứu và mô hình tính toán. Luận án đã thiết lập hệ thống mô hình thủy văn – thủy lực – truyền mặn (MIKE, SWAT, NAM) và thực hiện hiệu chỉnh, kiểm định theo bộ dữ liệu thực đo. Chương 3 (44 trang) trình bày các kết quả chính của luận án, bao gồm: tính toán thông số phân tầng, phân tích độ mặn theo mùa, tuyến dọc, mặt cắt ngang và chiều sâu, so sánh giữa kịch bản hiện trạng (2015–2019) và kịch bản BĐKH (2035), cũng như đánh giá ảnh hưởng của địa hình và các yếu tố khí tượng thủy văn. Phần cuối chương đề xuất nhóm giải pháp thích ứng với xâm nhập mặn tại sông Vệ. Phần kết luận và kiến nghị (3 trang) nêu bật các kết quả đạt được và định hướng nghiên cứu tiếp theo. Danh mục tài liệu tham khảo gồm 10 trang với tổng cộng 67 nguồn, trong đó có 26 tài liệu tiếng Việt và 41 tài liệu tiếng Anh, thể hiện sự tham chiếu rõ ràng và nền tảng học thuật vững chắc.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1. Tổng quan về xâm nhập mặn

1.1.1 Định nghĩa xâm nhập mặn

Xâm nhập mặn là quy luật tự nhiên ở các khu vực, lãnh thổ có vùng cửa sông giáp biển và là một trong 19 loại hình thiên tai được quy định cụ thể tại Luật phòng, chống thiên tai [1]. Căn cứ khoản 23 Điều 5 Quyết định 18/2021/QĐ-TTg có quy định như sau: xâm nhập mặn là hiện tượng nước mặn với nồng độ mặn 4‰ xâm nhập sâu vào nội đồng khi xảy ra triều cường, nước biển dâng hoặc cạn kiệt nguồn nước ngọt [2]. Với bờ biển trải dài hơn 3260 km, kéo dài từ Quảng Ninh tới Kiên Giang cùng nhiều hoạt động kinh tế - xã hội, xâm nhập mặn luôn là đối tượng nghiên cứu của nhiều nghiên cứu trong nước [3]–[14]. Xâm nhập mặn là quá trình gia tăng nồng độ muối trong các thành phần môi trường nước và đất do tác động tự nhiên hoặc nhân sinh, làm thay đổi tính chất ban đầu của hệ sinh thái. Quá trình này có thể xảy ra ở ba môi trường chính:

- Tầng chứa nước dưới đất: khi nước biển hoặc nước mặn thâm nhập vào các tầng chứa nước ngầm, làm suy giảm chất lượng nước cấp cho sinh hoạt và sản xuất [28].
- Nước mặt trong sông, suối vùng cửa sông ven biển: khi nước mặn từ biển lan truyền ngược vào sông, đặc biệt trong mùa khô hoặc khi lưu lượng nước ngọt giảm, gây ảnh hưởng đến thủy sinh và nông nghiệp [29].
- Tầng đất bề mặt (soil layer): khi muối tích tụ trong đất do tưới tiêu, bốc hơi hoặc xâm nhập từ nguồn nước mặn, làm giảm độ phì nhiêu và ảnh hưởng đến cây trồng [30].

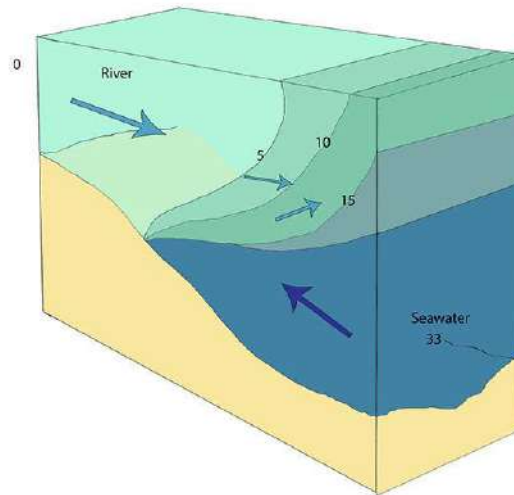
Đây là một hiện tượng thủy văn tự nhiên ở ven biển dẫn tới suy giảm cả chất lượng nước mặt, nước ngầm, làm cho nước không đáp ứng được mục tiêu sử dụng. Xâm nhập mặn làm gia tăng áp lực cho hệ thống cấp nước sinh hoạt ở các vùng dân cư ven biển nơi có khoảng 80% các thành phố lớn nhất trên thế giới, do vậy tác động sâu sắc đến sinh kế của dân cư và sự phát triển xung quanh [28]. Các nghiên cứu [31]–[33] cho thấy xâm nhập mặn cũng có thể làm thay đổi đa dạng sinh học và các quần xã thủy sinh do mất môi trường sống thích hợp cho chúng. Với một nước nông nghiệp như Việt Nam

với sản phẩm cây lúa rất quan trọng bởi độ mặn cho phép là 4‰, tuy nhiên lúa rất nhạy cảm, giảm khả năng chống chịu mặn và giai đoạn trở đến ngậm sữa. Khi độ mặn ở mức 0.1‰ năng suất lúa giảm còn 90%, ở mức 1‰ năng suất lúa còn 88%, ở mức 2‰ còn 60%, độ > 3‰ thì mạ, lúa đều chết [34].

1.1.2 Cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông

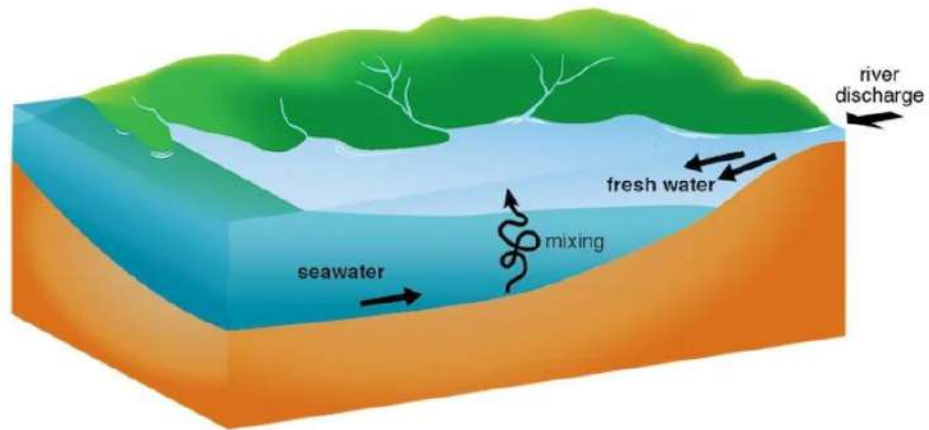
Nghiên cứu cơ chế truyền mặn và nêm mặn vùng cửa sông ven biển được thực hiện đồng loạt vào những năm 50 của thế kỷ trước trên thế giới [35]. Cửa sông được định nghĩa “ là một thủy vực nửa kín ven bờ thông với biển khơi, trong đó có sự hòa trộn nhất định giữa nước biển mặn và nước ngọt chảy ra từ lục địa”. Cửa sông được phân loại thành 4 kiểu: là các thung lũng ngập chìm; các vịnh hẹp; có đê cát chắn ngoài; các cửa sông hình thành do các quá trình kiến tạo tạo nên các vùng lún, sụt hạ ven bờ. Một sự phân loại khác dựa trên sự phân tầng theo 4 mức độ theo độ mặn [36] thuộc về: phân tầng mạnh, quá trình lòng sông bồi tụ mạnh; xáo trộn từng phần, nghiêng về bồi tụ; đồng nhất theo phương thẳng đứng trên mặt cắt ngang, dòng triều mạnh và không bồi tụ đáy; đồng nhất theo phương thẳng đứng do dòng triều thống trị và xâm thực mạnh theo luồng.

Hầu hết các hệ thống cửa sông ven biển vùng chịu tác động của thủy triều và dòng chảy thượng nguồn dẫn tới sự phân loại các cửa sông trên cơ sở yếu tố phân tầng dòng chảy và phân bố độ mặn [36]. Một cửa sông phân tầng mạnh (highly stratified) khi hình thành một nêm mặn rõ nét, nước ngọt có trọng lượng riêng nhẹ hơn sẽ chồng trên một lớp nước mặn có mật độ lớn. Nêm mặn sẽ tiến dọc theo phía dưới lớp nước ngọt cho đến khi bị dòng chảy nước ngọt đủ lớn để ngăn chặn sự đi sâu của dòng chảy mặn. (Hình 1 1). Lớp nước mặn (S) xâm nhập ở tầng đáy, dần dày lên về phía cửa biển. Lớp nước ngọt (F) chảy ra ngoài ở tầng mặt, tạo thành giao thoa phân tầng mạnh.



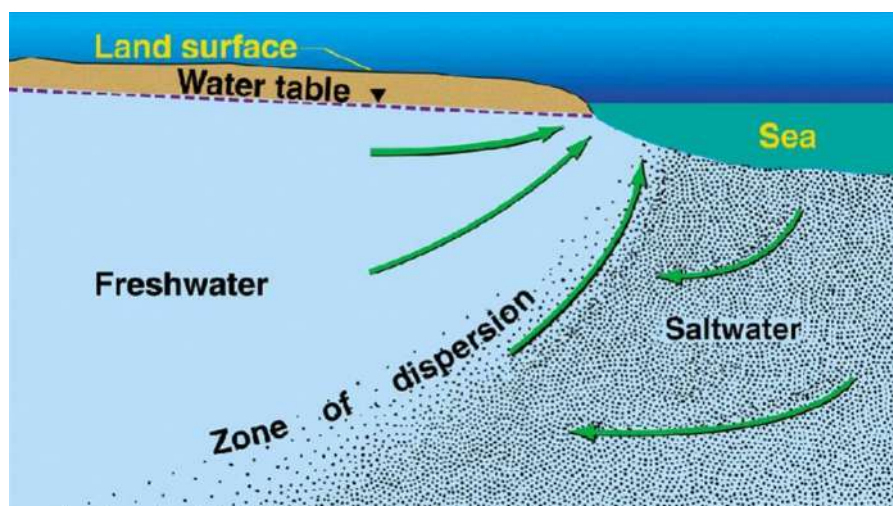
Hình 1-1. Cấu trúc “nêm mặn” (“sall wedge”)

Cửa sông hỗn hợp một phần (partially mixed) là cửa sông có năng lượng thủy triều bị tiêu tan bởi ma sát đáy do dòng chảy rối sinh ra. Khi nồng độ mặn của lớp nước bề mặt được tăng lên cùng với dòng chảy mặt tăng sẽ gây ra một dòng chảy hoàn lưu phía dưới. Tùy từng thời điểm của thủy triều mà cửa sông có cấu trúc phân tầng một phần, sự phân tầng một phần có thể thay đổi theo chiều dài dòng chảy. Tại các cửa sông dạng phân tầng một phần, động lực dòng chảy sông là nhỏ so với các dòng chảy thủy triều [35]. Cửa sông xáo trộn hoàn toàn (well-mixed) diễn ra khi dòng triều lớn hơn nhiều so với dòng chảy sông và ma sát đáy đủ lớn để pha trộn toàn bộ cột nước. Hình 1 2. Cấu trúc “Lưu thông cửa sông (Estuarine Circulation)” diễn ra theo cơ chế dòng nước biển nặng đặc chạy về phía thượng lưu ở tầng đáy. Dòng nước ngọt nhẹ xuôi về cửa biển ở tầng mặt. Dòng pha trộn nằm giữa (Mid-layer mixing) tạo trao đổi mặn giữa hai tầng.



Hình 1-2. Cơ chế xâm nhập mặn lưu thông tại cửa sông

Khi nước ngọt từ đất liền chảy vào cửa sông mạnh, trong khi dòng triều là yếu sẽ hình thành về độ mặn giữa lớp bề mặt và lớp dưới đáy. Sự khác nhau này xuất hiện vì năng lượng rối từ dòng triều không đủ để xáo trộn dòng chảy có nguồn từ sông [36]–[37]. (Hình 1 3). Cấu trúc “Salt intrusion due to tidal influence”: khi triều lên (flood): tăng sức xâm nhập mặn, nêm mặn dày hơn. Triều xuống (ebb): nước ngọt đẩy lùi mặn, nêm mặn mỏng lại. Trong thực tế, một phần ma sát tại mặt phân cách dòng mặn và dòng chảy từ sông làm dải phân cách nghiêng xuống dưới về hướng thượng lưu, trong khoa học giải thích là mặn xâm nhập theo dạng hình nêm. Người ta sử dụng phân bố vận tốc trung bình thủy triều trên mặt cắt ngang cửa sông để minh họa hình thành nêm mặn. Một đặc tính của hệ thống nêm mặn là chênh lệch (gradient) mật độ lớn tại mặt phân cách ngăn chặn rất mạnh sẽ làm giảm xáo trộn dải phân cách xuống một mức thấp nhất. Nếu vận tốc tương đối của lớp mặt nước so với lớp phía dưới đáy thấp một giới hạn nhất định tại mặt phân cách, sẽ tạo ra sự dịch chuyển hướng lên trên của muối từ nêm mặn.



Hình 1-3. Cơ chế xâm nhập mặn do thủy triều

Xâm nhập mặn tại vùng cửa sông có quan hệ mật thiết với chế độ thủy động lực học. Điều này đã được khẳng định bởi nghiên cứu của tác giả [11]. Các pha truyền mặn trong sông biểu thị quan hệ hai dòng chảy ngược chiều nhau, một bên là lượng nước ngọt đẩy mặn thoát ra cửa sông. Một bên là thủy triều đưa mặn vào cùng với sự khuếch tán của nước mặn từ nơi có nồng độ cao tới nơi có nồng độ thấp, tạo thành một đường quan hệ độ mặn dọc sông [11].

1.1.3 Hiện trạng nghiên cứu xâm nhập mặn tại Việt Nam

Nghiên cứu xâm nhập mặn (XNM) tại Việt Nam đã được thực hiện từ những năm 1960. Khởi đầu bằng việc quan trắc độ mặn ở hai vùng đồng bằng sông Hồng và ĐBSCL từ các dự án của Ủy hội sông Mê Kông (1973) [10]. Dự báo xâm nhập mặn chính xác có vai trò rất lớn đối với chủ động nông – ngư nghiệp và quy hoạch sử dụng đất vùng kinh tế ven biển [3]. Tại các tỉnh duyên hải phía Bắc, xâm nhập mặn được quan tâm bởi tầm quan trọng của các tỉnh này với an ninh lương thực. Tình trạng mực nước sông vùng hạ du sông Hồng – Thái Bình bị hạ thấp dẫn tới xâm nhập mặn sâu hơn, nhất là vào thời kỳ sử dụng nước gia tăng cho vụ Đông Xuân [7]. Với vai trò vựa lúa của phía Bắc, một số tỉnh như Thái Bình (sông Trà Lý), Nam Định đặt ra mục tiêu dự báo xâm nhập mặn trên sông chảy qua sông Ninh Cơ và sông Đáy.

Tại Bắc Trung bộ, theo nghiên cứu [15], những năm gần đây, hiện tượng xâm nhập mặn ở các khu vực cửa sông ven biển có xu hướng ngày càng trở nên trầm trọng, đặc biệt là các khu vực cửa sông ven biển, gây khó khăn cho hoạt động lấy nước phục vụ sản xuất nông nghiệp. Cùng với đó, các tỉnh thuộc Trung Trung Bộ trong những năm gần đây diễn biến xâm nhập mặn phức tạp, điển hình là phía hạ lưu lưu vực Vu Gia – Thu Bồn, ảnh hưởng lớn đến việc khai thác nguồn nước ngọt ở khu vực này. Đã lượng hóa được mức độ XNM, như độ mặn trung bình 1‰ ở khoảng cách 13,5km tính từ cửa sông; độ mặn trung bình 4‰ lần lượt ở khoảng cách 9–12 km [16]–[17]. Phía Nam Trung bộ, xâm nhập mặn cũng được quan trắc thấy tại vùng cửa sông Ba, Phú Yên [13].

Tại miền Đông Nam Bộ và Tp. HCM, xâm nhập mặn đang gây ra tình trạng thiếu nước ngọt cho các nhà máy cung cấp nước [18]–[19]. Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) chịu sự tác động của hai khối nước lớn là nước sông Mê Công và thủy triều

của biển; chế độ thủy văn của khu vực phức tạp, chịu ảnh hưởng đồng thời của dòng chảy thượng lưu sông Mê Công, thủy triều biển Đông và biển Tây. Nắm được xu thế thay đổi của các yếu tố ảnh hưởng đến xâm nhập mặn sẽ làm căn cứ đánh giá những ảnh hưởng có thể có của các yếu tố đến xâm nhập mặn ở ĐBSCL. Đánh giá này sẽ giúp các cơ quan quản lý đề ra các biện pháp giảm thiểu các tác động bất lợi [9]. Nghiên cứu [11] đã thực hiện phân tích đặc tính phân tầng dựa vào số liệu thực đo cùng với các công thức giải tích kinh nghiệm và bằng mô hình toán 3D, 2D. Kết quả, bước đầu đã xác định được đặc tính phân tầng mặn cửa sông Hậu qua các số liệu thực đo mặn theo chiều sâu dòng chảy. Kết quả nghiên cứu ban đầu cung cấp hiểu biết về cơ chế phân tầng mặn cho các cửa sông ven biển ĐBSCL. Các nghiên cứu này phục vụ nhu cầu lấy nước ngọt cho nông nghiệp hay nước sinh hoạt...hoặc lấy nước mặn lơ tầng đáy cho nuôi trồng thủy sản.

Xâm nhập mặn có quy luật biến đổi theo mùa. Trong mùa cạn, khi nước từ thượng nguồn về thấp, thủy triều xuất hiện mang nước mặn xâm nhập sâu vào nội đồng gây khó khăn cho sinh hoạt và sản xuất [9], [20]–[24]. Mực nước biển có thể dâng cao dẫn đến nguy cơ một phần lớn đồng bằng sẽ bị ngập lụt và nhiễm mặn [23]. Để quản lý XNM, hệ thống hỗ trợ nghiệp vụ dự báo, cảnh báo xâm nhập mặn hiệu quả cho vùng ĐBSCL đã xây dựng [20].

Trong những năm gần đây, vào mùa cạn, khi nước từ thượng nguồn về thấp, thủy triều xuất hiện mang nước mặn xâm nhập sâu vào nội đồng gây khó khăn cho sinh hoạt và sản xuất và đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu (BĐKH), mực nước biển có thể dâng cao dẫn đến nguy cơ một phần lớn đồng bằng sẽ bị ngập lụt và nhiễm mặn [3]. Các kịch bản tính toán cho tỉnh Đồng Nai, Vĩnh Long bao gồm: XMN ở điều kiện hiện tại, theo kịch bản thải khí nhà kính trung bình (B2) và cao (A1FI) cho năm 2020 và 2030. Kết quả tính toán cho thấy, trong tương lai, do ảnh hưởng của BĐKH, XNM ảnh hưởng đến các xã trên địa bàn trong tỉnh [19]. Nghiên cứu tương tự cho một tỉnh ven biển khác của Đồng bằng Sông Cửu long được thực hiện trong [11].

1.2. Quản lý và đánh giá xâm nhập mặn

1.2.1. Nhiệm vụ quản lý xâm nhập mặn

Mục tiêu của quản lý XNM là thực hiện các quá trình mang tính hệ thống, bao gồm hoạt động phòng ngừa, ứng phó và khắc phục hậu quả, đảm bảo tính bền vững tài nguyên nước (mặt, nước ngầm) vùng ven biển, từ đó cân bằng các lợi ích xã hội, kinh tế và môi trường [1], [22]. Nhiệm vụ của quản lý XNM bao gồm quản lý chất lượng nước vùng cửa sông, đảm bảo nguồn nước không nhiễm mặn cho hoạt động kinh tế - xã hội; đánh giá các tiềm ẩn của XNM với sức khỏe hệ sinh thái và con người; đánh giá được tác động của biến đổi khí hậu tới XNM, là điều không thể thiếu trong tương lai. Các yếu tố biến đổi khí hậu cần được lưu ý ở đây gồm: lượng mưa, thoát hơi và nước biển dâng [22]. Để quản lý tốt XNM không chỉ nghiên cứu tác động của BĐKH mà còn cần phải lưu ý tới sự tác động đồng thời của các yếu tố tự nhiên lẫn con người khác. Ví dụ ĐBSCL chịu sự tác động của hai khối nước lớn là nước sông Mê Công và thủy triều của biển. Chế độ thủy văn của khu vực phức tạp, chịu ảnh hưởng đồng thời của dòng chảy thượng lưu sông Mê Công, thủy triều biển Đông và biển Tây do vậy cần phải nghiên cứu tác động đồng thời của yếu tố tự nhiên lẫn con người.

Như vậy, để quản lý XNM cần làm rõ sự phụ thuộc truyền mặn vào các yếu tố như đặc tính thủy lực, hình thái đường bờ (độ dốc của bãi biển, độ dốc địa hình vùng cửa sông), đặc điểm thủy động lực học biển. Các nghiên cứu [38]–[40] chỉ ra rằng xâm nhập mặn cửa sông chịu ảnh hưởng lớn từ nước xả từ thượng nguồn và bởi thủy triều [41]–[42]. XNM cũng có thể bị ảnh hưởng bởi địa hình [43], mực nước biển [44], độ sâu [45], các luồng gió dọc theo sông sẽ tác động tới xâm nhập mặn [46]–[48] và sự hòa trộn theo chiều dọc [39]. Dữ liệu phân tích từ 80 cửa sông của Vương quốc Anh [43], giúp giải thích rõ ràng nhiều mối quan hệ có nguồn gốc lý thuyết. Đặc biệt, nghiên cứu đã chỉ ra rằng trong quá trình xác định phạm vi xâm nhập mặn cần xem xét kỹ lưỡng địa hình cửa sông, bởi địa hình cửa sông phản ánh ảnh hưởng của biên độ thủy triều và dòng chảy sông, cùng với một số yếu tố phù sa [49]. Nghiên cứu [50] cũng đã làm sáng tỏ vai trò của lưu lượng sông, thủy triều tới XNM ở cửa sông Trường Giang, Trung Quốc. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng, nhánh phía Bắc luôn bị ngập trong nước mặn cao do lưu lượng phía thượng nguồn sông thấp và biên độ thủy triều cao. Vào mùa khô, khi lưu lượng sông ít, nhánh Bắc luôn chịu tác động xâm nhập mặn cao khi có triều cường và

lưu lượng sông đổ về hạn chế [50]. Như vậy, phụ thuộc nhiều vào khu vực nghiên cứu, cơ chế xâm nhập mặn cùng phạm vi mức độ truyền mặn chịu sự ảnh hưởng từ lưu lượng dòng chảy trên thượng nguồn cũng cần được lưu ý trong bài toán quản lý truyền mặn [22].

Để quản lý XNM, cần thiết xác định phạm vi truyền mặn trong sự phụ thuộc vào các yếu tố khác nhau. Trong khi việc tăng lưu lượng nước sông ở thượng nguồn sẽ bổ sung nước ngọt, thì thủy triều đẩy nước biển vào cửa sông. Các nghiên cứu kinh điển của [30], [42], [51] chỉ ra rằng lưu lượng nước ngọt phía thượng nguồn, mực nước biển, thủy triều, gió, sóng, triều cường, hình dạng và địa hình cửa sông đều ảnh hưởng đến mức độ và sự biến đổi của xâm nhập mặn. Nghiên cứu [52] phát hiện ra rằng ở độ sâu nhất định, cơ chế xâm nhập mặn phụ thuộc vào loại cửa sông và sự cân bằng giữa xả nước ngọt và truyền nước mặn do thủy triều cũng như mực nước biển dâng. Ở các cửa sông hỗn hợp tốt (số Richardson $Ri < 0,08$), môi trường nước không có sự phân tầng rõ rệt. Nước mặn di chuyển qua lại theo thủy triều và dòng nước ngọt và có thể bị đẩy ra khỏi cửa sông do các hiện tượng dòng chảy cực mạnh [53]–[55]. Nghiên cứu [30] đã thực hiện nghiên cứu xâm nhập mặn vùng cửa sông Chester, vùng cửa biển Chesapeake Bay, Maryland, USA. Chuỗi số liệu mặn từ 2002–2011 được thu thập và phân tích để làm rõ mối quan hệ giữa xâm nhập mặn thay đổi theo nào theo mùa, theo thời gian trong ngày và trong năm. Kết quả, đã phát hiện ra rằng lưu lượng sông là yếu tố chính dẫn tới biến đổi xâm nhập mặn. Bên cạnh đó mực nước biển cũng đóng vai trò quan trọng, theo mùa, trong khi gió có ảnh hưởng quan trọng trong một số hiện tượng thời tiết. Nghiên cứu này cũng chỉ ra rằng, thủy triều trong trường hợp này có ảnh hưởng hạn chế do thời gian diễn ra ngắn và biên độ không cao.

Mực nước biển tăng do biến đổi khí hậu sẽ ảnh hưởng tới quá trình truyền mặn vào cửa sông [56]. Các cơ chế như vậy của dòng nước mặn cũng sẽ xác định chiều dài xâm nhập mặn, biến đổi khí hậu cũng có thể tác động tới lưu lượng sông, thủy triều và gió [38], [42], [55]. Nghiên cứu [57] cho thấy các tác động của biến đổi khí hậu sẽ làm gia tăng đáng kể mực nước biển trung bình và có thể sẽ có tác động tiêu cực nghiêm trọng đến quá trình xâm nhập mặn ở các tầng chứa nước ven biển.

Việt Nam là quốc gia thuộc nhóm chịu nhiều tác động từ biến đổi khí hậu (BĐKH) nên đã có nhiều nghiên cứu tác động của BĐKH tới xâm nhập mặn vùng cửa sông được đề cập trong một loạt các tỉnh thành như Thái Bình [6], Nam Định [5], Thanh Hóa [15], Nghệ An [12], Phú Yên [13], Đồng Nai [19], Bến Tre [23], Vĩnh Long [22], và tại ĐBSCL [9], [15], [21], [24]–[25]. Các nghiên cứu này đã chỉ rõ dự báo xâm nhập mặn chính xác trong điều kiện biến đổi khí hậu có vai trò rất lớn đối với việc chủ động nông nghiệp – ngư nghiệp và quy hoạch sử dụng đất vùng kinh tế ven biển, đặc biệt là trong điều kiện biến đổi khí hậu hiện nay.

Trong những năm gần đây, do chịu ảnh hưởng của biến đổi khí hậu như nhiệt độ trung bình có xu hướng tăng lên, lượng mưa nhiều vùng giảm rõ rệt, mực nước biển dâng cao, nhiều năm xảy ra hạn hán nặng như các năm 2004, 2016, 2017 dẫn tới nhiều nghiên cứu đánh giá tác động của biến đổi khí hậu tới xâm nhập mặn [3], [6], [9], [12], [19]–[24]. Tại nhiều tỉnh phía bắc, việc lấy nước cho vụ Đông Xuân gặp khó khăn do nước từ thượng lưu giảm dần mặn truyền sâu hơn về phía đất liền. Với vai trò là vựa lúa phía Bắc, Thái Bình đặt ra mục tiêu dự báo xâm nhập mặn trên sông Trà Lý trong điều kiện biến đổi khí hậu với kịch bản nền là 2005. Kết quả tính toán cho thấy độ mặn 1‰ sẽ xâm nhập vào sâu 21km, 23km và 24km tương ứng với các thời kỳ 2020, 2030 và 2050. Độ mặn 4‰ sẽ xâm nhập vào sâu 16km, 17km và 18km tương ứng với thời kỳ 2020, 2030 và 2050. Đánh giá nguy cơ XNM các sông chính tỉnh Đồng Nai trong bối cảnh BĐKH được thực hiện trong [19]. Các kịch bản đánh giá được thiết lập bao gồm: kịch bản hiện trạng 2013 (KB1), kịch bản 2020 với mức phát thải khí nhà kính cao - A1FI (KB2) và kịch bản 2030 - A1FI (KB3). Tám vùng nước mặt được xác định tương ứng với các ranh mặn từ $<0,25\%$ đến $>18\%$. Kết quả tính toán cho thấy XNM ngày càng tăng cường và di chuyển sâu về phía thượng lưu. Các kịch bản lưu ý tới BĐKH cho tỉnh Vĩnh Long bao gồm: XNM ở điều kiện hiện tại, theo kịch bản thải khí nhà kính trung bình (B2) và cao (A1FI) cho năm 2020 và 2030. Kết quả tính toán cho thấy, ở điều kiện hiện tại năm 2014, độ mặn cao nhất trên sông Cổ Chiên là khoảng 5‰. Trong tương lai, do ảnh hưởng của BĐKH, XNM ở Vĩnh Long gia tăng. Độ mặn cao nhất vào năm 2030 trên sông Cổ Chiên có thể đến 8‰, ảnh hưởng đến các xã trên địa bàn huyện Vũng Liêm và Mang Thít [22]. Dưới tác động của BĐKH và nước biển dâng, mặn có xu thế ăn sâu hơn dọc các sông vào đất liền. Mặn 1‰ có khả năng ăn sâu vào ~55 km trên sông Cổ Chiên, ~65 km trên sông Hàm Luông, ~68 km trên sông Tiền Giang; mặn 5‰ có

khả năng ăn sâu vào ~42km trên sông Cổ Chiên, ~44 km trên sông Hàm Luông, 44~56 km trên sông Tiền Giang [23].

1.2.2. Phương pháp nghiên cứu xâm nhập mặn

Để đánh giá sự phụ thuộc phạm vi mức độ XNM vào các yếu tố liên quan, phương pháp mô hình hóa được sử dụng. Lợi ích từ ứng dụng các phương pháp mô hình hóa thể hiện trong các nghiên cứu điển hình. Mối quan hệ giữa xâm nhập mặn với sự phân tầng và pha trộn dọc ở các cửa sông được thể hiện trong [50]. Công thức tính chiều dài xâm nhập mặn với hệ số phân tầng được đưa ra trong [49]. Mối tương quan giữa tốc độ biến thiên theo phương đứng của vận tốc trung bình và độ mặn được đưa ra, đã làm rõ vai trò của mối tương quan này ở các cửa sông được thể hiện trong [58]. Phương pháp mô hình hóa cũng đã chỉ ra sự thay đổi của độ sâu nước sẽ có tác động đáng kể đến sự pha trộn theo phương đứng độ mặn tại cửa sông [58], hay sự thay đổi của độ sâu mực nước cũng sẽ ảnh hưởng đến sự hòa trộn theo phương ngang vùng cửa sông, từ đó đề xuất chiều dài của một nêm mặn, dựa trên độ sâu nước, vận tốc, sự khác biệt về mật độ giữa đáy và bề mặt [58].

Bộ công cụ MIKE 11, MIKE 21 được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu đánh giá XNM tại Việt Nam. Các nghiên cứu này đều thực hiện các bước hiệu chỉnh, kiểm định mô hình thủy lực HD trước khi chạy module truyền mặn AD. Chỉ số thống kê Nash được sử dụng để đánh giá độ chính xác giữa kết quả mô hình hóa và số liệu thực đo [12], [18]–[19], [21]. Ngoài các thông số thủy lực như độ nhám và độ nhớt, hệ số phân tán theo phương dọc cũng là một thông số được hiệu chỉnh. Cụ thể [15] thực hiện bước hiệu chỉnh, kiểm định hệ số nhám, theo đó các hệ số thay đổi theo khu vực thượng lưu từ 0,025–0,04 và hạ lưu từ 0,015–0,024. Thông số phân tán D được lựa chọn cụ thể: trong khoảng 100–550 m²/s, 400–1100 m²/s; 800–1200 m²/s, 1500–2500 m²/s phụ thuộc vào khoảng cách từ biển vào các đoạn sông.

Nghiên cứu [59] chỉ ra cơ chế hình thành nêm mặn là do sự hình thành mặt phân cách nằm ngang khi nước ngọt từ thượng nguồn chảy ra cửa sông – biển. Sự xuất hiện mặt cắt này là do năng lượng rối dòng triều không đủ mạnh để xáo trộn nước mặn và nước ngọt. Sự phân bố vận tốc trung bình của thủy triều giải thích cho sự hình thành

mặt phân cách, khi vận tốc trung bình của lớp mặt nước thấp hơn một giới hạn, nêm mặn được quan sát và tạo ra sự dịch chuyển sâu vào sông của nêm mặn.

Khi triều lên, cột nước mặn có tỷ trọng lớn đẩy xuống dưới nước ngọt, dòng chảy bù mang nước ngọt chảy phía trên dòng mặn xâm nhập. Khi bắt đầu triều xuống, nêm mặn, vẫn được giữ lại vào cuối lúc triều lên và xuất hiện mặt phân cách (front) khá rõ rệt với lớp nước phía trên của nó. Sự phân tầng này cho phép dòng chảy ngọt từ đất liền chảy trên lớp đậm dần tới phát sinh sự trượt rõ rệt qua mặt phân cách. Khi độ cao thủy triều hạ thấp tại biên phía biển, gradient mặt nước sẽ dốc và áp suất trở nên đủ mạnh để đẩy nêm mặn về phía biển [60]–[62].

1.2.3. Đánh giá xâm nhập mặn trong điều kiện cửa sông phân tầng

Để mô hình hóa xâm nhập mặn ở vùng cửa sông chịu ảnh hưởng của thủy triều cần sự hiểu biết về cơ chế dòng chảy. Sự phụ thuộc của độ mặn vào dòng chảy và thủy triều tại vùng cửa sông là quá trình vật lý chiếm một phần quan trọng trong nghiên cứu thủy động lực học cửa sông. Dòng chảy từ sông có xu hướng mang mặn ra khỏi cửa sông, do đó pha loãng cửa sông, trong khi đó, sự phân tán liên quan đến chuyển động thủy triều có xu hướng vận chuyển mặn ngược dòng vào sông [42], [61], [63]–[64]. Phương trình cân bằng mặn theo phương ngang, có lưu ý tới thủy triều được mô tả bằng phương trình vi phân đạo hàm riêng:

$$A(x) \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(QS) = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(x) A(x) \frac{\partial S}{\partial x} \right] \quad (1.1)$$

Trong đó, A là diện tích mặt cắt ngang, x là khoảng cách từ thượng nguồn ra phía cửa sông, S là độ mặn, Q là dòng chảy của sông và K_x là hệ số phân tán dọc [42]. Hệ số phân tán theo chiều dọc K_x được sử dụng để tham số hóa nhiều cơ chế vật lý, bao gồm các cơ chế phân tán thủy triều trong dòng thủy triều cùng với sự thay đổi độ mặn tương ứng [60]. Kết quả nghiên cứu [65] cho thấy:

$$K_x \propto \frac{(\beta g)^2 \left(\frac{dS}{dX} \right) H^8}{v_t^3} \quad (1.2)$$

Trong đó, Δ là sự thay đổi độ mặn, H là độ sâu cục bộ, Δ_t là hệ số khuếch tán động lượng. Giá trị Δ_t chọn phải phù hợp với dòng chảy trung bình theo thủy triều. Đối với dòng chảy thủy triều không phân tầng, Δ_t tỷ lệ với vận tốc thủy triều u_{rms} . Trường hợp dòng triều có sự phân tầng được xem xét trong các nghiên cứu [42], dựa trên số liệu quan trắc nhiều năm tại vịnh San Francisco để đưa ra cách xác định hệ số K_x [60].

Hai tham số hóa pha loãng mặn theo phương đứng được xem xét. Giả thiết rằng biên độ thủy triều thiết lập thang vận tốc cho các xoáy và độ sâu của nước như sau:

$$\kappa = a_o C_d U_T H \quad (1.3)$$

Trong đó, a_o là hằng số, C_d là hệ số cản bậc hai và U_T là biên độ dòng triều. Tham số hóa này giải thích cho sự phụ thuộc của sự pha trộn theo phương đứng được tạo ra từ ranh giới đáy vào biên độ thủy triều [42], [64]. Ralston và cộng sự. (2008) tham số hóa sự phụ thuộc phân tầng của trộn dọc bằng cách chia tỷ lệ độ nhớt xoáy và độ khuếch tán với độ dày của lớp ranh giới đáy h_{bl} thay vì độ sâu của cột nước H [66]:

$$\kappa = b_o C_d U_T h_{bl}, \quad (1.4)$$

Trong đó, b_o là một hằng số. Thang đo độ dày của lớp ranh giới nhận được dựa trên giả định việc tạo ra phân tầng do biến dạng của dS/dx được cân bằng thông qua hòa trộn ở trên lớp ranh giới:

$$h_{bl} = H \left(\frac{R_{fc}}{Ri_x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.5)$$

Trong đó, R_{fc} là thông lượng hằng số Richardson và Ri_x số Richardson theo phương ngang; $Ri_x = -g\beta H^2 (dS/dx) / (C_d U_T)^2$. Trong công thức này phạm vi khuếch tán theo phương đứng có tỷ lệ với U_T^2 và với $(dS/dx)^{-1/2}$.

Để đánh giá được xâm nhập mặn trong điều kiện cửa sông phân tầng do tác động của quá trình động lực biên và dòng chảy phía thượng lưu, trong luận án sử dụng bộ công cụ MIKE 3. Các quá trình cơ bản được mô tả với hệ các phương trình vi phân đạo hàm riêng sẽ được trình bày trong chương tiếp theo.

1.3. Tổng quan về sông Vệ

1.3.1. Hệ thống sông ngòi tỉnh Quảng Ngãi

Trên toàn tỉnh Quảng Ngãi có 04 con sông lớn là Trà Bồng, Trà Khúc, sông Vệ và sông Trà Câu. Các con sông này có đặc trưng chung là đều có hướng chảy từ Tây sang Đông, phân bố khá đều trên vùng đồng bằng Quảng Ngãi. Ngoài 4 con sông chính trên, Quảng Ngãi còn có các sông nhỏ như Trà Ích, sông Cái, sông Phước Giang,...

Sông ngòi tỉnh Quảng Ngãi đều xuất phát từ Đông Trường Sơn và chảy ra biển Đông. Dòng sông ngắn, độ dốc cao (từ 10,5 độ đến 33 độ), lòng sông cạn và hẹp nên vào mùa mưa (lượng mưa rất nhiều) làm dòng chảy cường độ mạnh thường gây ra lũ lụt lớn, gây tác hại cho sản xuất và đời sống, mặt khác cũng mang về cho đồng bằng một lượng phù sa đáng kể. Với mạng lưới sông suối dày đặc, các phụ lưu của hệ thống sông Trà Bồng, Trà Khúc, sông Vệ và Trà Câu đều bắt nguồn từ những vùng núi cao có độ dốc lớn với lượng nước nhiều là những nguồn thủy năng có giá trị, nên được tận dụng để làm đập thủy điện. Hình 1-4, Bảng 1 – 1.

Bảng 1-1: Đặc trưng thủy văn của các sông chính tỉnh Quảng Ngãi

Tên sông	Chiều dài sông (km)	Chiều dài lưu vực (km)	Chiều rộng lưu vực (km)	Diện tích lưu vực (km ²)
Trà Bồng	45	56	12,4	697
Trà Khúc	135	123	26,3	3240
Sông Vệ	90	70	18,0	1260
Trà Câu	32	19	14,0	442

Hình 1-4. Các con sông lớn của Quảng Ngãi

Sông Trà Khúc là con sông lớn nhất tỉnh Quảng Ngãi, sông chảy theo hướng Đông qua ranh giới các huyện Sơn Hà, Sơn Tịnh, Tư Nghĩa, thành phố Quảng Ngãi và đổ ra cửa Đại Cỗ Lũy. Sông Trà Khúc có độ dài khoảng 135 km, trong đó có khoảng 1/3 chiều dài sông chảy qua vùng núi và rừng rậm, có độ cao 200- 1.000m, phần còn lại chảy qua vùng đồng bằng [26]). Đây là con sông có độ dốc lớn. Đầu nguồn của sông có công trình thủy lợi Thạch Nham nên khi chảy về hạ lưu ở địa bàn thành phố Quảng Ngãi, huyện Tư Nghĩa và huyện Sơn Tịnh nguồn nước trở nên cạn kiệt. Mùa mưa, sông thường gây lũ lớn.

Sông Trà Bồng là con sông lớn thứ 3 tỉnh Quảng Ngãi, sông nằm phía Bắc tỉnh Quảng Ngãi và bắt nguồn từ vùng núi phía Tây. Sông chảy qua địa phận hai huyện Trà Bồng và Bình Sơn rồi đổ ra vịnh Dung Quất (Hình 1-4 [26]).

Địa hình đồng bằng ven biển chiếm khoảng 24,4% diện tích tự nhiên toàn tỉnh, gồm chủ yếu diện tích của thành phố Quảng Ngãi, huyện Bình Sơn, Sơn Tịnh, Tư Nghĩa, Mộ Đức, Đức Phổ và huyện đảo Lý Sơn. Trên khu vực địa hình này tập trung đông dân cư (77,43% dân số của tỉnh), riêng 28 xã ven biển và 03 xã đảo chiếm 25% dân số cả tỉnh. Đây cũng là nơi tập trung các khu kinh tế, khu công nghiệp, khu du lịch quan trọng nhất của tỉnh (Hình 1-4 [26]).

Sông Vệ là sông lớn thứ hai nằm trong bốn hệ thống sông lớn nhất thuộc tỉnh Quảng Ngãi (sông Trà Khúc, sông Vệ, sông Trà Bồng và sông Trà Câu). Sông Vệ có diện tích 1263 km², chiếm 24,51% diện tích tự nhiên của tỉnh Quảng Ngãi. Lưu vực sông Vệ bao gồm: Toàn bộ huyện Mộ Đức; Một phần lớn huyện Ba Tơ, huyện Nghĩa Hành; một phần nhỏ huyện Đức Phổ và huyện Tư Nghĩa của tỉnh Quảng Ngãi. Phía Bắc giáp lưu vực sông Trà Khúc tỉnh Quảng Ngãi; Phía Nam giáp lưu vực sông Trà Câu tỉnh Quảng Ngãi; Phía Tây giáp lưu vực sông Trà Khúc, Sê San; Phía Đông giáp với biển Đông (Hình 1-4 [26]).

1.3.2. Điều kiện tự nhiên khu vực nghiên cứu

a) Vị trí địa lý

Sông Vệ là sông lớn thứ hai nằm trong bốn hệ thống sông lớn nhất thuộc tỉnh Quảng Ngãi (sông Trà Khúc, sông Vệ, sông Trà Bồng và sông Trà Câu). Sông Vệ có diện tích 1.263 km², chiếm 24,51% diện tích tự nhiên của tỉnh Quảng Ngãi [10] (Hình 1-5).

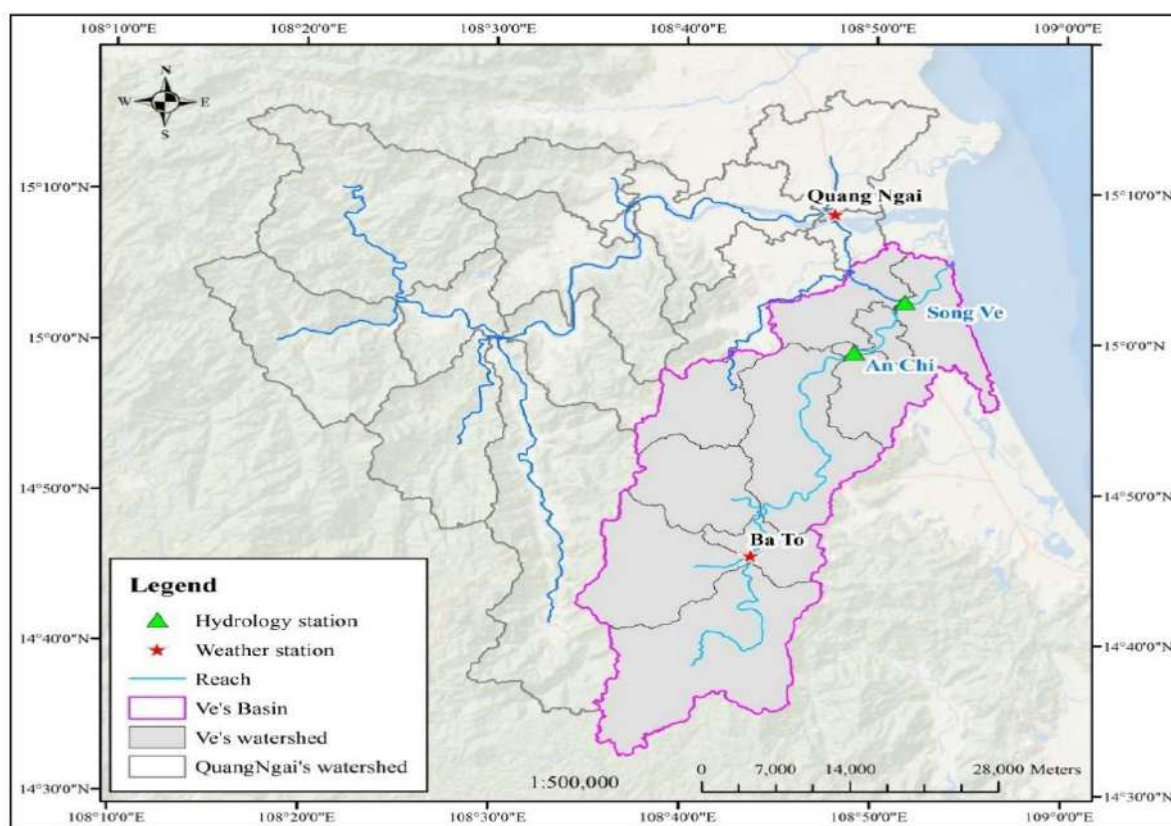
Lưu vực sông Vệ bao gồm: Toàn bộ huyện Mộ Đức; Một phần lớn huyện Ba Tơ, huyện Nghĩa Hành; một phần nhỏ huyện Đức Phổ và huyện Tư Nghĩa của tỉnh Quảng Ngãi.

Ranh giới lưu vực sông Vệ được thể hiện trong [26]. Phía Bắc giáp lưu vực sông Trà Khúc tỉnh Quảng Ngãi; Phía Nam giáp lưu vực sông Trà Câu tỉnh Quảng Ngãi; Phía Tây giáp lưu vực sông Trà Khúc, Sê San; Phía Đông giáp với biển Đông.

b) Địa chất, thổ nhưỡng

Theo phân loại của FAO-UNESCO lưu vực sông Vệ có 9 nhóm đất, phổ biến ở một số nhóm đất chính sau:

- Nhóm đất cát ven biển: Phân bố tại huyện đồng bằng Mộ Đức, Đức Phổ, Tư Nghĩa loại đất này thường được trồng hoa màu, nếu chủ động nguồn nước có thể trồng ngô mùa và nuôi trồng thủy sản.



Hình 1-5. Lưu vực sông Vệ

- Nhóm đất mặn: Phân bố ở huyện ven biển do phù sa sông lắng đọng trong môi trường nước lợ hoặc bị nhiễm mặn. Loại đất này sử dụng hiệu quả nhất là nuôi trồng thủy sản và làm muối.

- Nhóm đất phù sa: Phân bố ở huyện vùng đồng bằng và ven sông, suối của các huyện miền núi. Đặc điểm chung loại đất này thích hợp với nhiều loại cây trồng nông nghiệp khác nhau, đặc biệt là sản xuất lúa nước.

- Nhóm đất Glây: Phân bố ở huyện đồng bằng Mộ Đức, Đức Phổ. Đặc điểm loại đất này là chua và ít chua, thích nghi trồng lúa nước nhưng cần chú ý luân canh để cải thiện tính khử của đất.

- Nhóm đất xám: Phân bố các huyện vùng đồng bằng đến vùng núi cao ở các huyện Nghĩa Hành, Minh Long, Ba Tơ. Đặc điểm loại đất này thành phần dinh dưỡng nghèo đến trung bình. Có khả năng khai thác cho sản xuất nông nghiệp nhưng hạn chế.

- Đất dốc mòn trơ sỏi đá: Phân bố hầu hết ở các huyện trong lưu vực. Loại đất này nghèo dinh dưỡng, tầng đất mỏng phù hợp với các loại cây lâm nghiệp.

c) Địa hình

Vùng lưu vực sông Vệ nằm ở sườn Đông Trường Sơn, có dạng địa hình cao dần từ Bắc sang Nam với địa hình phức tạp bao gồm cả vùng núi cao, trung du và đồng bằng. Địa hình lưu vực sông Vệ có độ cao trung bình từ 0-1.119 m. Vùng thượng du của lưu vực là vùng núi có độ cao từ 800-1.000 m, còn ở hạ du là đồng bằng chỉ có độ cao dao động từ 48-100 m và vùng cát ven biển có độ cao từ 48 m trở xuống.

d) Đặc điểm mạng lưới lưu vực sông Vệ

Lưu vực Sông Vệ có tổng diện tích lưu vực 1.260 km², bao gồm các huyện Ba Tơ, Minh Long, Mộ Đức, Nghĩa Hành, Tư Nghĩa và bắt nguồn từ rừng núi phía Tây của huyện Ba Tơ. Sông chảy theo hướng Tây Nam-Đông Bắc, qua các huyện Nghĩa Hành, Tư Nghĩa, Mộ Đức và đổ ra biển Đông tại cửa Cổ Luỹ và cửa Đức Lợi, đoạn giáp biển một phần được nối tiếp đổ ra tại cửa Đại (sông Trà Khúc). Sông dài khoảng 90km, trong đó 2/3 chiều dài chảy trong vùng núi có độ cao 100-1.000 m. Sông có 5 phụ lưu cấp I, và 2 phụ lưu cấp II (Bảng 1-2).

Bảng 1-2. Lưu lượng đỉnh lũ tại các trạm

TT	Vị trí	Q _{max} (m ³ /s)			
		1%	2%	3%	4%
1	An Chi	5001,6	4307,6	3313,5	2476,3
2	Sông Vệ	5399,7	4650,4	3577,2	2673,4

Mực nước lũ: Kết quả tính toán thống kê mực nước lũ tại trạm An Chi và trạm Sông Vệ (Bảng 1-3).

Bảng 1-3. Mực nước lũ cao nhất theo tần suất tại các trạm

Đơn vị: cm

Trạm	P%				Trận lũ lớn nhất		
	1%	2%	5%	10%	H _{max}	Năm	%
An Chi	1107	1051	1025	999	1043	2013	1,68
Sông Vệ	624,2	614,6	598,9	583,9	603	2013	4,5

e) Khí hậu

Nhìn chung trong khu vực tỉnh Quảng Ngãi, lượng mưa có xu hướng giảm dần từ Bắc vào Nam và từ Tây sang Đông. Vùng mưa lớn chủ yếu ở vùng núi cao Ba Tơ, Giá Vực từ 3.200-4.000 mm và vùng trung du, đồng bằng ven biển lượng mưa chỉ còn 1.700-2.200 mm.

f) Thủy văn

Dòng chảy năm: Lưu lượng dòng chảy trung bình nhiều năm theo thống kê tại trạm An Chỉ là: $Q_{81-10}=63,8 \text{ m}^3/\text{s}$; $M_0=81,9 \text{ l/s-km}^2$. Dòng chảy lũ: Lưu lượng dòng chảy lũ trung bình theo thống kê tại trạm An Chỉ là: $Q_{81-16}=1999,8 \text{ m}^3/\text{s}$; $C_v=0,47$; $C_s=2C_v=0,94$.

g) Chế độ triều

Tại các cửa sông Cổ Lũy, cửa Đức Lợi số ngày nhật triều tăng dần và nhiều hơn số ngày bán nhật triều trong tháng.m. Chế độ thủy triều được xác định như sau: Điểm Đức Lợi trên sông Vệ cách cửa Cổ Lũy 3,5km và cách cửa Đức Lợi 0,5km. Sông Vệ ở vùng nghiên cứu đa số có độ dài ngắn, độ dốc lòng sông lớn. Ranh giới ảnh hưởng triều của các sông chỉ khoảng 10km tính từ cửa sông. Chu kỳ một con triều tại các cửa sông khoảng 24÷25 giờ. Những ngày nhật triều, thời gian triều lên trung bình từ 14÷15 giờ, dài nhất lên đến 18 giờ, ngắn nhất là 12 giờ. Thời gian triều xuống 9÷10 giờ, dài nhất 15 giờ, ngắn nhất 9 giờ. Những ngày bán nhật triều, thời gian triều lên mỗi lần thường 6÷7 giờ. Thời gian triều xuống lần thứ nhất 3÷4 giờ, lần thứ hai 6÷7 giờ. Thời gian triều xuống ngắn nhất là 2 giờ, dài nhất là 9 giờ. Hướng dòng triều chủ đạo vào mùa Đông là hướng Tây Bắc, sau đến hướng Bắc với tốc độ trung bình 30cm/s, tốc độ lớn nhất là 70cm/s. Trong mùa hè, hướng chủ đạo là Đông Nam, sau đến hướng Nam và Tây Bắc, tốc độ trung bình 30cm/s, lớn nhất 65cm/s [26].

1.3.3. Đánh giá hiện trạng xâm nhập mặn cửa sông Vệ

Xâm nhập mặn tại sông Vệ (Quảng Ngãi) đang là vấn đề môi trường đáng chú ý trong bối cảnh biến đổi khí hậu và suy giảm nguồn nước ngọt. Hiện tượng này đang ngày càng nghiêm trọng, đặc biệt vào mùa khô, do việc khai thác nước từ hệ thống thủy lợi Thạch Nham làm suy giảm dòng chảy hạ lưu [14]. Nghiên cứu sử dụng mô hình

MIKE 11 để mô phỏng và dự báo xâm nhập mặn, với kết quả kiểm định phù hợp với số liệu thực tế. Khi đập Thạch Nham lấy nước, độ mặn tăng mạnh và xâm nhập sâu hơn; ngược lại, khi trả nước về dòng chính, độ mặn giảm rõ rệt. Nghiên cứu của nhóm tác giả [3], cho thấy độ mặn phụ thuộc mạnh vào thủy triều và lưu lượng dòng chảy, với độ chính xác mô hình cao. Báo cáo của Sở Tài nguyên và Môi trường Quảng Ngãi cũng ghi nhận độ mặn vượt ngưỡng 1‰ vào mùa khô, ảnh hưởng trực tiếp đến sản xuất và sinh hoạt. Bên cạnh đó, đề tài cấp tỉnh do Trung tâm Quy hoạch và Điều tra tài nguyên nước miền Trung thực hiện đã chỉ ra rằng nguyên nhân chủ yếu là do giảm lưu lượng nước từ thượng nguồn và tác động của các công trình thủy lợi. Đề tài cấp tỉnh do Trung tâm Quy hoạch và Điều tra tài nguyên nước miền Trung (2022) [27] thực hiện đã mở rộng phân tích về nguy cơ xâm nhập mặn lan sâu vào vùng trồng lúa ven sông, đồng thời đề xuất các giải pháp công trình như xây dựng đập ngăn mặn kết hợp hồ trữ nước nhằm đảm bảo an ninh nguồn nước. Theo dự báo đến năm 2030, khoảng cách xâm nhập mặn có thể đạt tới 9,6 km từ cửa sông, với độ mặn trung bình tăng thêm khoảng 2,3–2,4‰. Tình trạng này đã gây thiệt hại trực tiếp đến sản xuất nông nghiệp, như tại cánh đồng Dũng Dinh – Võ Hội (nơi sông Vệ giao với Tư Nghĩa), nơi hơn 30 ha lúa và hoa màu bị ảnh hưởng [14].

1.3.4. Mạng lưới trạm quan trắc khí tượng thủy văn

a) Trạm khí tượng và đo mưa

Trong và lân cận vùng nghiên cứu có trạm đo khí tượng Ba Tơ, trạm khí tượng Quảng Ngãi, 3 trạm đo mưa độc lập và trạm thủy văn An Chỉ, trạm đo mực nước Sông Vệ có đo mưa. Trạm khí tượng Ba Tơ, Quảng Ngãi được đo đầy đủ các yếu tố khí tượng (Nhiệt độ, tốc độ gió, độ ẩm, tổng lượng bốc hơi, số giờ nắng) [8] (Hình 1-6).



Hình 1-6. Các vị trí quan trắc liên quan

Bảng 1-4. Thống kê các trạm đo khí tượng, mưa

TT	Tên Trạm	Loại trạm	Liệt tài liệu	Toạ độ		Cao độ trạm (m)
				Kinh độ	Vĩ Độ	
1	An Chỉ	TV	1976-nay	108°48'	14° 58'	
2	Ba Tơ	KT	1976- nay	108°43'	14° 46'	550
3	Giá Vực	X	1977- nay	108° 33'	14° 42'	
4	Mình Long	X	1987- nay	108° 42'	14° 55'	
5	Mộ Đức	X	1976- nay	108°53'	14° 58'	
6	Sông Vẹ	H	1978- nay	108° 50'	15° 2'	
7	Quảng Ngãi	KT	1977- nay	108°47'	15°08'	8

Ghi chú: X: Mưa; KT: trạm Khí tượng (đo các yếu tố: Nhiệt độ; Độ ẩm; Bốc hơi; Gió; Số giờ nắng); TV: trạm Thủy văn (đo các yếu tố mưa; mực nước; Lưu lượng; Độ đục); H: Mực nước.

Vì trạm khí tượng Ba Tơ đặt tại thượng lưu chỉ đại diện cho vùng núi cao, vùng hạ du và ven biển chọn trạm khí tượng Quảng Ngãi làm đại diện để tính toán.

h) Trạm thủy văn

Lưu vực sông Vệ có 01 trạm thủy văn (đo lưu tốc và mực nước) là trạm An Chi và 01 trạm đo mực nước trong mùa lũ là trạm thủy văn Sông Vệ.

Bảng 1-5. Thống kê các trạm đo thủy văn

TT	Tên Trạm	Loại trạm	Liệt tài liệu	Toạ độ	
				Kinh độ	Vĩ Độ
1	An Chi	TV	1976- nay	108,48°	14,58°
2	Sông Vệ	H	1977- nay		

Ghi chú: H: Mực nước; TV: trạm Thủy văn (Đo các yếu tố mực nước; Lưu lượng; Độ đục). Trạm An Chi trên sông Vệ: là trạm có đo lưu lượng dòng chảy, cũng giống như trạm Sơn Giang, ở đây có đo đặc mực nước, lưu lượng dòng chảy, lượng mưa, nhiệt độ nước và nồng độ phù sa. Trạm sông Vệ đặt tại vị trí cầu Sông Vệ trên sông Vệ. Trạm này chỉ ghi mực nước vào mùa mưa, nằm ngay phía dưới cầu quốc lộ về phía hạ lưu bên bờ Bắc sông Vệ.

Kết luận chương

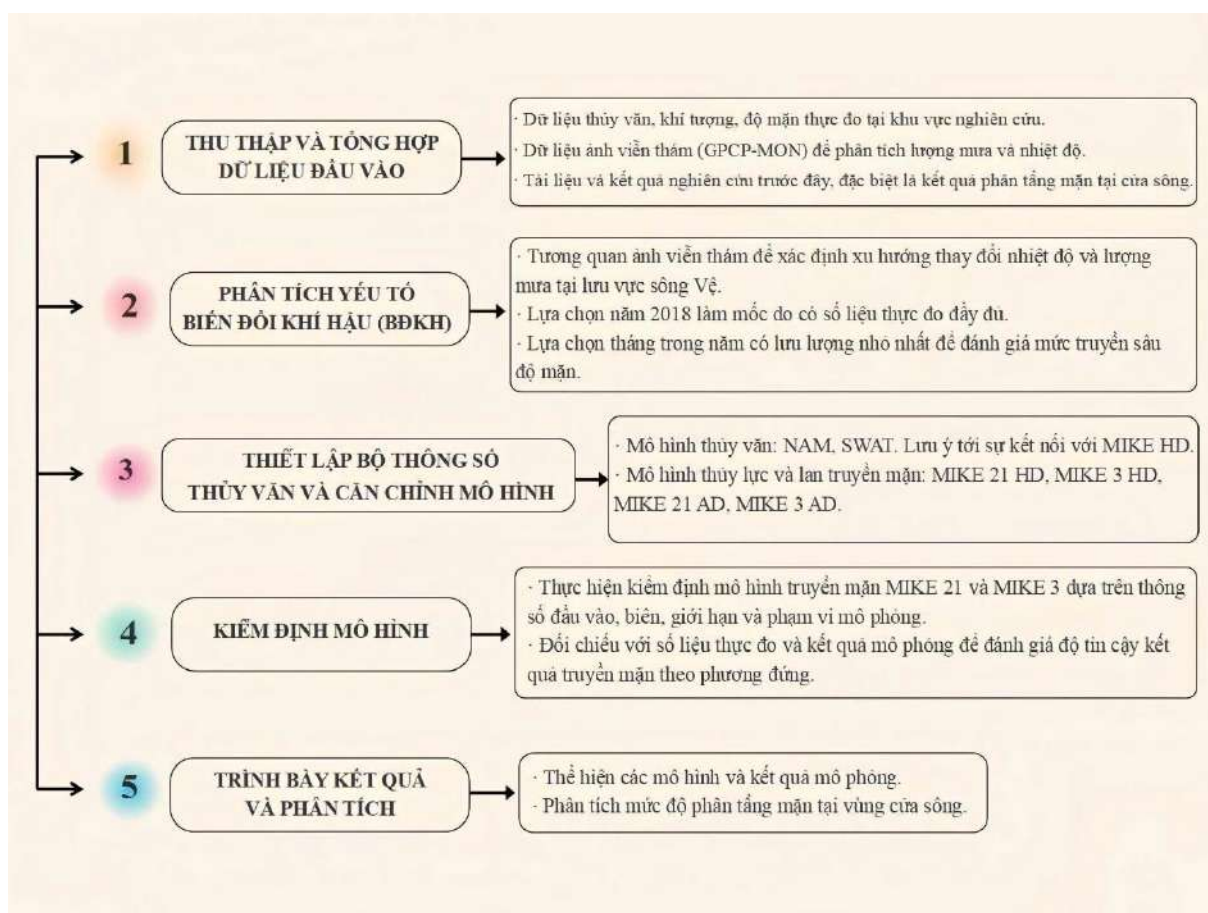
Để thực hiện mục tiêu và các nhiệm vụ nghiên cứu, chương 1 thực hiện tổng quan tài liệu liên quan, gồm tổng quan xâm nhập mặn, quản lý và đánh giá xâm nhập mặn, truyền mặn trong điều kiện phân tầng, tổng quan về sông Vệ. Tổng quan cho thấy xâm nhập mặn trên thế giới cũng như tại Việt Nam đã thực hiện từ rất sớm. Riêng tại Việt Nam, xâm nhập mặn đã được thể chế hóa từ 2013. Chương 1 làm rõ mục tiêu quản lý và đánh giá xâm nhập mặn, thông qua đó làm rõ các phương pháp đánh giá xâm nhập mặn. Chương 1 cũng trình bày về khu vực nghiên cứu – lưu vực sông Vệ, làm rõ các yếu tố tự nhiên, các vị trí đo đạc giúp thực hiện các nội dung của chương 2, 3. Tổng quan cho phép khẳng định sự quan tâm sâu sắc của các nhà khoa học cũng như quản lý về hiện tượng xâm nhập mặn trên chiều dài hơn 3260 km bờ biển. Chương cũng đã thực hiện tổng quan các nghiên cứu xâm nhập mặn điển hình tại Việt Nam, qua đó cho thấy các phương pháp đan xen với nhau, đặc biệt là phương pháp mô hình toán được sử dụng. Phần tổng quan cũng cho thấy hạn chế của các nghiên cứu trước mô hình hóa truyền mặn: hầu hết chỉ sử dụng mô hình một chiều, cụ thể là Mike 11, trong khi xâm nhập mặn vùng cửa sông có liên hệ chặt chẽ tới chế độ thủy động lực phức tạp dẫn tới phải sử dụng các mô hình 2, 3 chiều. Với mô hình 2, 3 chiều, cơ chế truyền mặn theo phương

đứng được làm sáng tỏ, cũng như thời điểm xuất hiện nê-mạn trong chu kỳ triền. Phần tổng quan cũng cho thấy sự phụ thuộc phân tầng, nê-mạn vào lưu lượng và chế độ triền chưa được lưu ý, đặc biệt là với con sông của miền Trung. Tóm lại phần tổng quan giúp làm rõ các nội dung được trình bày trong Chương 2 tiếp theo.

CHƯƠNG 2: PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để đánh giá được mức độ tác động của các kịch bản được thiết lập lên xâm nhập mặn tại lưu vực sông Vệ, phương pháp mô hình hóa đóng vai trò quan trọng trong luận án này, cho phép mô phỏng và định lượng được vấn đề xâm nhập mặn vốn rất phức tạp.

2.1 Sơ đồ nghiên cứu và phương pháp tiếp cận



Hình 0-1. Sơ đồ nghiên cứu

Sơ đồ nghiên cứu trong luận án gồm 5 bước được thể hiện trên Hình 0-1. Phương pháp tiếp cận theo các bước được thể hiện như sau:

Tiếp cận thực nghiệm (thu thập và tổng hợp dữ liệu)

Các bước 1 – 4 đều liên quan tới các tiếp cận này. Thu thập dữ liệu trong luận án phục vụ cho đầu vào và kiểm định mô hình gồm: thu thập số liệu mực nước, lưu lượng, độ mặn tại các trạm thủy văn, gồm Sông Vệ, Tam Quan, An Chỉ. Dữ liệu thực đo mặn

tại các mặt cắt MC0, MC3, MC4 được thực hiện theo tầng sâu (mặt, giữa, đáy) dùng để hiệu chỉnh kiểm định mô hình truyền mặn. Thu thập và sử dụng dữ liệu khí tượng (bốc hơi, nhiệt độ), ảnh vệ tinh GPCP MON, địa hình biển và sông Vệ để làm đầu vào cho mô hình thủy động lực học Mike 21, Mike 3 HD AD.

Tiếp cận mô hình toán thủy văn – thủy lực – truyền mặn

Các bước 3, 4 trong sơ đồ nghiên cứu đòi hỏi thiết lập thông số và kiểm định mô hình. Cụ thể như sau các mô hình MIKE (NAM, HD, AD, MIKE 21/3) cần được căn chỉnh để mô phỏng dòng chảy, mực nước, độ mặn và phân tầng nước phù hợp với khu vực cửa sông Vệ. Mô hình toán MIKE 3 được sử dụng để mô phỏng quá trình xâm nhập mặn theo các yếu tố: lưu lượng, triều, bốc hơi, lượng mưa, địa hình. Đây là mô hình có ý nghĩa quan trọng làm rõ cơ chế truyền mặn từ biển truyền vào đất liền (theo đáy). Cuối cùng để khẳng định độ tin cậy, mô hình truyền mặn MIKE 3 AD còn được kiểm định mô hình bằng số liệu thực đo để đảm bảo độ tin cậy.

Tiếp cận theo kịch bản khí hậu

Bước 2 trong sơ đồ nghiên cứu liên quan tới phân tích yếu tố biến đổi khí hậu đòi hỏi phải xây dựng các thông số cho các mô hình, tương ứng với kịch bản BĐKH năm 2035 theo RCP 4.5 và RCP 8.5. Các thông số liên quan tới mô hình gồm: lượng mưa, lượng bốc hơi, biên mực nước. Kết quả chạy mô hình theo các thông số liên quan tới BĐKH được sử dụng để so sánh kịch bản nền với kịch bản BĐKH.

Tiếp cận theo thời điểm đỉnh triều – chân triều và theo mùa lũ/mùa kiệt

Bước 5 liên quan tới trình bày kết quả và phân tích đòi hỏi phải thực hiện các phân tích truyền mặn tại các thời điểm đỉnh triều và chân triều trong mùa khô và mùa mưa. Cùng với đó, đánh giá hình dáng nêm mặn, mức độ phân tầng và phạm vi xâm nhập mặn theo chu kỳ khí tượng – thủy văn.

Tiếp cận GIS – viễn thám

Các bước 1 và 5 đòi hỏi ứng dụng GIS để minh họa kết quả thu thập được và trình kết quả mô hình hóa. Các nội dung cần thực hiện gồm tích hợp bản đồ, lưới tam

giác, ảnh vệ tinh lượng mưa toàn cầu để mô phỏng và trực quan hóa kết quả. GIS cũng được sử dụng để trích xuất kết quả theo tuyến bờ trái, tim sông, bờ phải, theo chiều sâu và thời gian.

2.2 Các mô hình toán được sử dụng

Mô hình NAM dựa trên nguyên tắc các bể chứa theo chiều thẳng đứng và các hồ chứa tuyến tính. Trong mô hình NAM, mỗi lưu vực được xem là một đơn vị xử lý. Do đó, các thông số và các biến là đại diện cho các giá trị được trung bình hóa trên toàn lưu vực. Dòng chảy tràn và dòng chảy sát mặt được diễn toán qua một hồ chứa tuyến tính thứ nhất, sau đó các thành phần dòng chảy được cộng lại và diễn toán qua hồ chứa tuyến tính thứ 2. Cuối cùng thu được dòng chảy tổng cộng tại cửa ra. Dữ liệu đầu vào của mô hình là mưa, bốc hơi tiềm năng, và nhiệt độ. Kết quả đầu ra của mô hình là dòng chảy trên lưu vực, mực nước ngầm, và các thông tin khác trong chu trình thủy văn, như sự thay đổi tạm thời độ ẩm của đất và khả năng bổ xung nước ngầm. Mô hình MIKE NAM thuộc loại mô hình tất định, thông số tập trung, và là mô hình mô phỏng liên tục. Những ứng dụng chủ yếu của mô hình MIKE NAM gồm:

- Phân tích thủy văn: Phân phối dòng chảy, ước tính thấm và bốc hơi.
- Dự báo lũ: Dòng chảy lưu vực nhỏ đổ vào mô hình sông, liên kết với các mô hình khí tượng.
- Kéo dài số liệu dòng chảy: Phục hồi những số liệu bị thiếu, cơ sở xác định các giá trị cực đoan.
- Dự báo dòng chảy kiệt: Phục vụ tưới.

Các yếu tố chính ảnh hưởng đến dòng chảy gồm

- Lượng trữ bề mặt
- Lượng trữ tầng đáy và tầng thấp hơn
- Sự bốc hơi nước

- Dòng chảy tràn (dòng chảy mặt)
- Lượng gia nhập nước ngầm
- Độ ẩm chứa trong đất
- Dòng chảy cơ bản

Những điều kiện ban đầu theo yêu cầu của mô hình MIKE NAM bao gồm lượng nước trong bể tuyết, bể mặt, bể chứa tầng rễ cây cùng với những giá trị ban đầu của dòng chảy từ 2 bể chứa tuyến tính cho dòng chảy tràn, dòng chảy hội lưu và dòng chảy ngầm.

Thông thường tất cả các giá trị ban đầu có thể lấy bằng 0 trừ lượng nước ở tầng rễ cây và tầng ngầm. Ước tính những điều kiện ban đầu này có thể lấy từ lần mô phỏng trước đó, nhưng cần đúng với thời gian bắt đầu mô phỏng của nửa năm đầu tiên để loại bỏ những ảnh hưởng sai số của những điều kiện ban đầu.

Điều kiện ban đầu mô hình bao gồm:

- U là lượng nước chứa trong bể chứa mặt (mm);
- L là lượng nước chứa trong bể chứa tầng dưới (mm);
- QOF là cường suất dòng chảy mặt sau khi diễn toán qua bể chứa tuyến tính (mm/h);
- QIF là cường suất dòng chảy sát mặt khi qua bể chứa tuyến tính (mm/h);
- BF là cường suất dòng chảy ngầm (mm/h).

Mô hình gồm 9 thông số chính tương đối theo đặc điểm lưu vực: Lmax, Umax, CQOF, TOF, TIF, TG, CKIF, CK12, CKBF. Các thông số trong mô hình này thường được xác định bằng phương pháp tối ưu hóa (Xem Bảng 2-1).

Bảng 2-1. Các thông số hiệu chỉnh của mô hình NAM

Thông số mô hình	Mô tả
$L_{\max}$	Lượng nước tối đa trong bể chứa tầng rễ cây. $L_{\max}$ có thể gọi là lượng ẩm tối đa của tầng rễ cây để thực vật có thể hút để thoát hơi nước.
$U_{\max}$	Lượng nước tối đa trong bể chứa mặt. Lượng trữ này có thể gọi là lượng nước để điền trứng, rơi trên mặt thực vật, và chứa trong vại C_m của bề mặt của đất.
CQ_{OF}	Hệ số dòng chảy mặt ($0 \leq CQ_{OF} \leq 1$). CQ_{OF} quyết định sự phân phối của mưa hiệu quả cho dòng chảy ngầm và thấm.
T_{OF}	Giá trị ngưỡng của dòng chảy mặt ($0 \leq T_{OF} \leq 1$). Dòng chảy mặt chỉ hình thành khi lượng ẩm tương đối của đất ở tầng rễ cây lớn hơn T_{OF} .
T_{IF}	Giá trị ngưỡng của dòng chảy sát mặt ($0 \leq T_{OF} \leq 1$). Dòng chảy sát mặt chỉ được hình thành khi chỉ số ẩm tương đối của tầng rễ cây lớn hơn T_{IF} .
TG	Giá trị ngưỡng của lượng nước bổ sung cho dòng chảy ngầm ($0 \leq T_{OF} \leq 1$). Lượng nước bổ sung cho bể chứa ngầm chỉ được hình thành khi chỉ số ẩm tương đối của tầng rễ cây lớn hơn TG.
CK_{IF}	Hằng số thời gian của dòng chảy sát mặt. CK_{IF} cùng với $U_{\max}$ quyết định dòng chảy sát mặt. Nó chi phối thông số diễn toán dòng chảy sát mặt $CK_{IF} \gg CK_{12}$.
CK_{12}	Hằng số thời gian cho diễn toán dòng chảy mặt và sát mặt. Dòng chảy mặt và dòng chảy sát mặt được diễn toán theo các bể chứa tuyến tính theo chuỗi với cùng một hằng số thời gian CK_{12} .
CK_{BF}	Hằng số thời gian dòng chảy ngầm. Dòng chảy ngầm từ bể chứa ngầm được tạo ra sử dụng mô hình bể chứa tuyến tính với hằng số thời gian CK_{BF} .

Mô hình Mike mô phỏng truyền mặn được thực hiện trong nhiều nghiên cứu trong nước [3] – [7], [11] – [22]. Các module chính, gồm MIKE 21, MIKE 3 HD, AD được sử dụng trong luận án này, tham khảo từ [66] – [68]. Module Mike 3 HD được xây dựng trên hệ phương trình Navier-Stokes trung bình Reynolds cho chất lỏng không nén được 2 hoặc 3 chiều kết hợp với giả thiết Boussinesq và giả thiết áp suất thủy tĩnh, gồm: phương trình liên tục, động lượng, được khép kín bởi sơ đồ khép kín rối. Với trường hợp ba chiều thì sử dụng xấp xỉ chuyển đổi hệ tọa độ sigma [66]. Trong đó hệ tọa độ

sigma là hệ tọa độ phổ biến được sử dụng trong các mô hình tính toán về hải dương học, khí tượng học và các lĩnh vực khác có liên quan đến động lực học chất lỏng. Hệ tọa độ này nhận tên từ biến độc lập dùng để biểu thị mức áp suất được chia tỷ lệ.

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (2.1)$$

Phương trình động lượng theo phương x và y tương ứng:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) \\ + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \\ + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (2.4)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (2.5)$$

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.6)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), i, j = 1, 2 \quad (2.7)$$

Trong đó: t là thời gian; x, y và z là tọa độ Đề các ; η là dao động mực nước ; d là độ sâu; $h = \eta + d$ là độ sâu tổng cộng; u, v và w là thành phần vận tốc theo phương x, y và z ; $f = 2\Omega \sin \Phi$ là tham số Coriolis; g là gia tốc trọng trường; ρ là mật độ nước; s_{xx}, s_{xy}, s_{yx} và s_{yy} – các thành phần tensor ứng suất bức xạ, v_t là nhớt rối thẳng đứng; p_a là áp suất khí quyển ; ρ_0 là mật độ chuẩn; S là độ lớn của lưu lượng do các điểm nguồn; (u_s, v_s) là

vận tốc của dòng lưu lượng đi vào miền tính; F_u, F_v là các số hạng ứng suất theo phương ngang. A - là độ nhớt rối ở quy mô lưới con (the subgrid scale eddy viscosity), c_s là hằng số, l là chiều dài đặc trưng, S_{ij} – là tốc độ biến dạng.

Module MIKE 21 HD là mô hình tính toán dòng hai chiều không đồng nhất trong một lớp chất lỏng đồng nhất theo phương thẳng đứng.

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = hS \quad (2.8)$$

Trong đó: U, V là các thành phần vận tốc trung bình theo độ sâu của các thành phần vận tốc u, v theo các phương tọa độ x, y ; t là thời gian; $h = \eta + d$: độ sâu tổng cộng = mực nước (η) + độ sâu (d)

Các phương trình động lượng:

$$\begin{aligned} \frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hU^2}{\partial x} + \frac{\partial hUV}{\partial y} = fVh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hU_s S \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hV^2}{\partial x} + \frac{\partial hUV}{\partial y} = -fUh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hV_s S \end{aligned} \quad (2.10)$$

Với $(\tau_{sx}, \tau_{sy}), (\tau_{bx}, \tau_{by})$ là các thành phần x, y của ứng suất gió bề mặt (surface) và đáy (bottom). S là lưu lượng thải do nguồn điểm; U_s, V_s là các thành phần tốc độ nguồn thải do nguồn điểm; g là gia tốc trọng trường; $f = 2\Omega \sin \varphi$ là tham số Coriolis; ρ là mật độ nước, ρ_0 là mật độ tiêu chuẩn; p_a là áp suất khí quyển.

Phương trình truyền mặn được xây dựng dựa trên định luật bảo toàn khối lượng lưu ý tới lượng đi vào và đi ra trong một khối thể tích có lưu ý tới các biến đổi sinh hóa. Phương trình lan truyền cho mặn có dạng [66]:

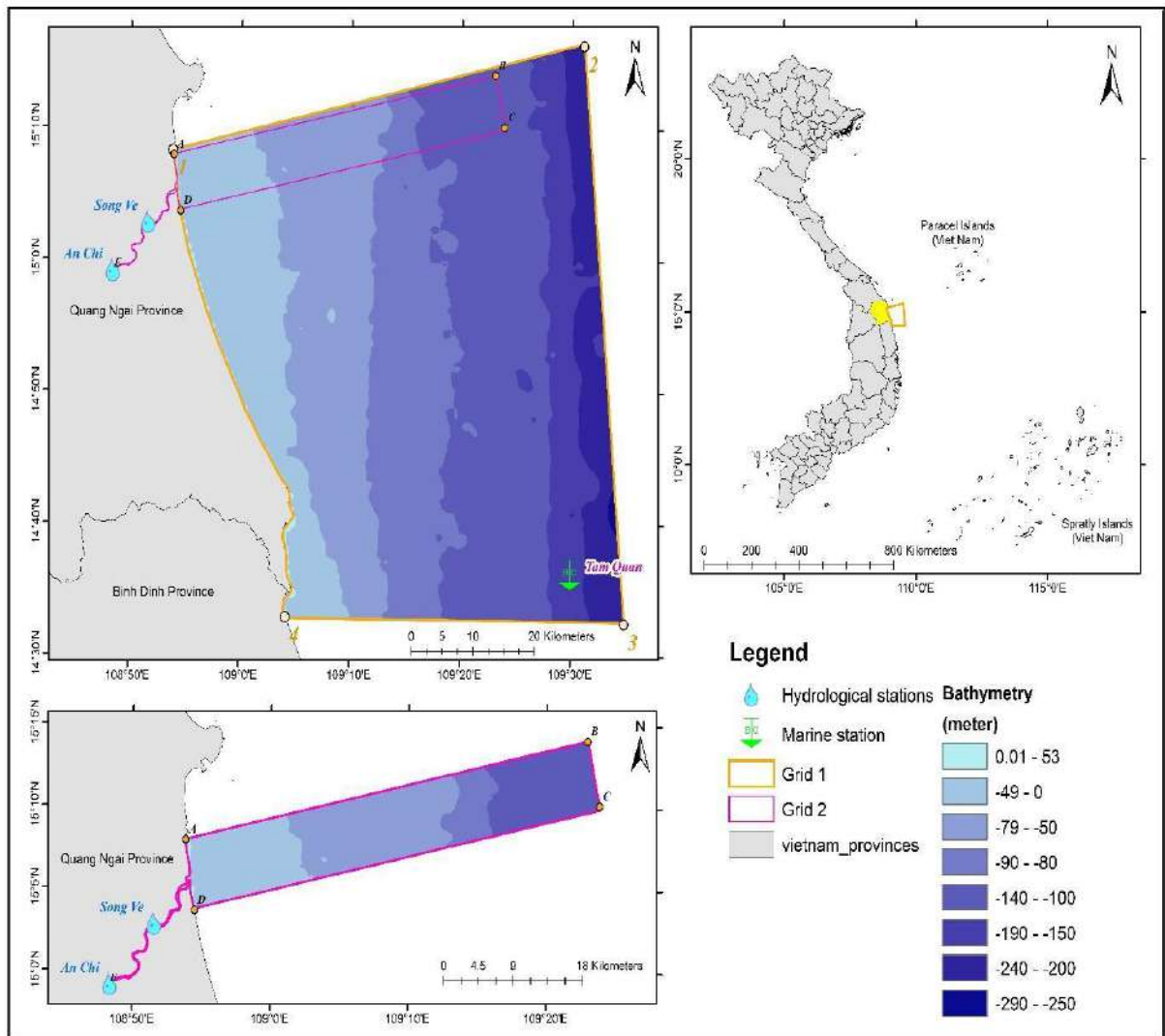
$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (2.11)$$

Trong đó: (u, v, w) là 3 thành phần của vectơ dòng chảy, D_v là hệ số khuếch tán rối thẳng đứng; S là lưu lượng nguồn thải, s_s là độ mặn của nguồn;

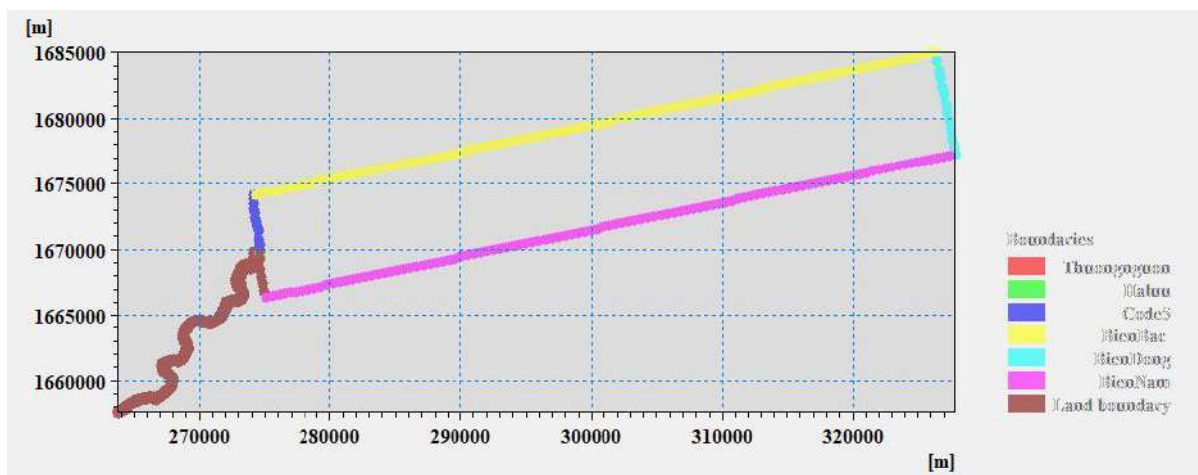
2.2.1. Thiết lập mô hình tính toán

Trong luận án, mô hình Mike 21/3 được sử dụng. Sơ đồ tính cho đoạn sông có chiều dài 21,47km (Hình 2-2), từ vị trí trạm khí tượng thủy văn Ba Tơ ra đến cửa Lở, được mở rộng ra phía biển Đông. Để phân chia lưới và gán cao độ lòng sông cho mô hình tính toán, công cụ tạo lưới The Mesh Generator của mô hình MIKE được sử dụng. Miền tính toán được phân thành lưới tam giác bất quy tắc, việc phân chia khu vực tính toán lưới mịn hay thô phụ thuộc số điểm tính toán cũng như diện tích của các ô tính toán. Khu vực được chia thành 2 lớp lưới tính, D1, D2 với Lưới D1: gồm 1897 nút, 3008 ô lưới tam giác, diện tích ô lưới nhỏ nhất 112,53 m², diện tích ô lưới lớn nhất 4,19 km²; Lưới D2: gồm 2787 nút, 4725 ô lưới tam giác, diện tích ô lưới nhỏ nhất 222,83 m², diện tích ô lưới lớn nhất 169915,89 m². Lời giải số các phương trình bằng phương pháp thể tích hữu hạn được mô tả trong tài liệu kỹ thuật của DHI [66], [67]. Các thông số thiết lập mô hình toán được sử dụng trong luận án gồm: lưới tính (mô tả ở trên), bước thời gian tính toán là 30s, thời gian chạy mô hình là 5 năm từ 2015 – 2019, độ phân giải theo phương đứng gồm 8 lớp sigma. Các điều kiện biên gồm: biên ướt lưới D1 được trích xuất từ dữ liệu toàn cầu, kết quả chạy mô hình thủy lực cho lưới D1 được trích xuất để tạo biên mực nước cho lưới D2 – phần sông Vệ. Biên ướt cho lưới D2 (thượng nguồn sông) trích xuất từ kết quả chạy Mike NAM.

Địa hình lòng sông và khu vực biển khu vực thuộc phạm vi nghiên cứu được thu thập như sau: địa hình lòng sông: Dữ liệu địa hình đáy sông Vệ được tạo thành từ số liệu của 19 mặt cắt thực đo, đoạn sông Vệ dài 21, 47 km tính từ Cửa Lở đi lên phía thượng nguồn được nghiên cứu sinh kế thừa từ Viện Quy hoạch thủy lợi [26]. Địa hình biển: được thu thập từ dữ liệu toàn cầu tại trang GEBCO hoạt động dưới sự bảo trợ chung của Ủy ban Hải dương học Liên chính phủ (Intergovernmental Oceanographic Commission – IOC) (Hình 2-3).



Hình 2-2. Phạm vi và lưới tính toán tam giác cho vùng nghiên cứu



Hình 2-3. Sơ đồ hóa các biên tính toán trong mô hình tính

2.2.2. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình thủy lực

Chỉ số đánh giá mức độ tương quan giữa kết quả tính toán và kết quả đo đạc, được xác định theo các công thức sau:

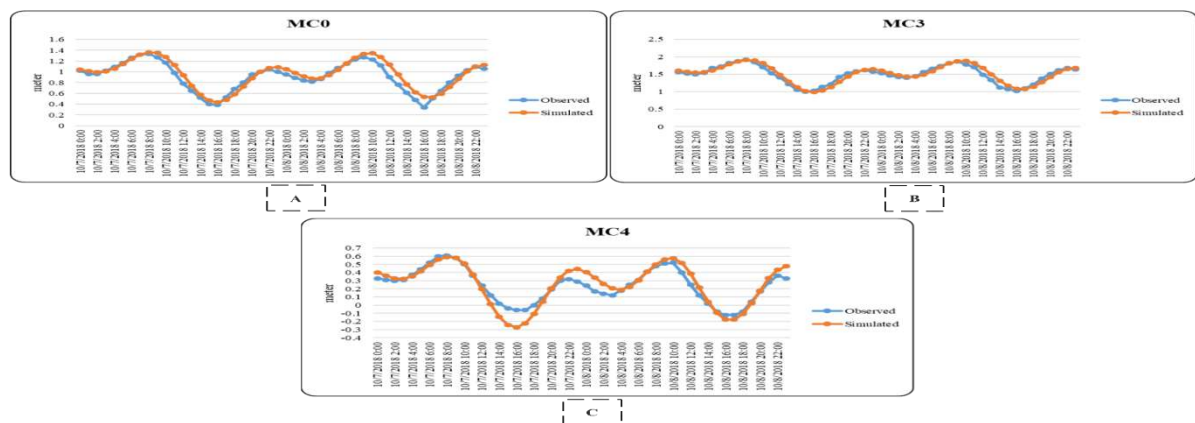
$$NSE(Nash) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (2.12)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [(M_i - \bar{M}) \times (O_i - \bar{O})]^2}{\left(\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M}) \right)^2 \times \left(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) \right)^2} \quad (2.13)$$

Trong đó, M_i kết quả chạy mô hình, O_i là kết quả thực đo, $\bar{M}$ nồng độ trung bình của M_i , $\bar{O}$ nồng độ trung bình O_i , N là số mẫu.

Bước hiệu chỉnh được thực hiện để lựa chọn được bộ thông số mô hình phù hợp nhất có thể, dựa trên bộ số liệu thực đo. Kết quả hiệu chỉnh sẽ có ý nghĩa quyết định cho các bước tính toán tiếp theo. So sánh kết quả tính toán mô phỏng với các giá trị thực đo để đánh giá sự phù hợp giữa chúng dùng hệ số xác định bình phương (hay còn gọi là bình phương hệ số tương quan) R^2 với các mức độ phù hợp như sau $R^2 \leq 0,5$: số liệu tính không phù hợp với số liệu thực đo; $0,5 < R^2 < 0,7$: sự phù hợp giữa chúng là chấp nhận được; $0,7 < R^2 < 0,85$: sự phù hợp giữa chúng là khá tốt; $0,85 < R^2 < 0,95$: sự phù hợp giữa chúng là tốt; $R^2 > 0,95$: sự phù hợp giữa chúng là rất tốt. Đây là những chỉ tiêu được nhiều tác giả sử dụng để đánh giá sự phù hợp giữa số liệu mô phỏng và thực đo. Đồng thời để đánh giá sự phù hợp giữa tính toán mô phỏng và thực đo hệ số Nash – Sutcliffe (NSE) cũng được sử dụng. Mức độ phù hợp được xác định như sau: Rất tốt $0,75 < NSE \leq 1,0$; Tốt $0,65 < NSE \leq 0,75$; Chấp nhận được $0,5 \leq NSE \leq 0,65$ và không chấp nhận được $NSE \leq 0,5$.

Kết quả hiệu chỉnh/kiểm định (calibration/verification) thủy lực trong luận án được thực hiện theo các bước cụ thể [10]. Bước đầu tiên, thực hiện hiệu chỉnh mô hình thủy lực khu vực ven bờ biển với lưới D1. Chuỗi số liệu mực nước thực đo tại trạm Tam Quan được sử dụng. Kết quả của bước này nhận được bộ thông số được lựa chọn: hệ số nhớt 0,28 (m^2/s), hệ số nhám 30 ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$). Tiếp đó, bước hiệu chỉnh, kiểm định mô hình thủy lực cho phần sông Vệ được thực hiện [10]. Bộ dữ liệu thực đo dùng để hiệu chỉnh, kiểm định mô hình là chuỗi thời gian đo mực nước tại trạm Sông Vệ [10] (mỗi bước là 1 giờ). Kết quả của bước này là chọn bộ thông số hệ số nhớt bằng 0,28 và hệ số nhám Manning bằng 32 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình truyền mặn. Bộ thông số thủy lực hiệu chỉnh nhận được được sử dụng để chạy mô hình thủy lực Mike 3 (được sử dụng trong luận án) và được thông qua (validation) sau khi so sánh với số liệu mực nước thực đo trong 48 tiếng, từ 7/10 – 8/10/2018. Kết quả kiểm định này được thể hiện trên Hình 2-4.



Hình 2-4. Kết quả kiểm định (validation) mực nước tại các mặt cắt.

2.2.3. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình truyền mặn

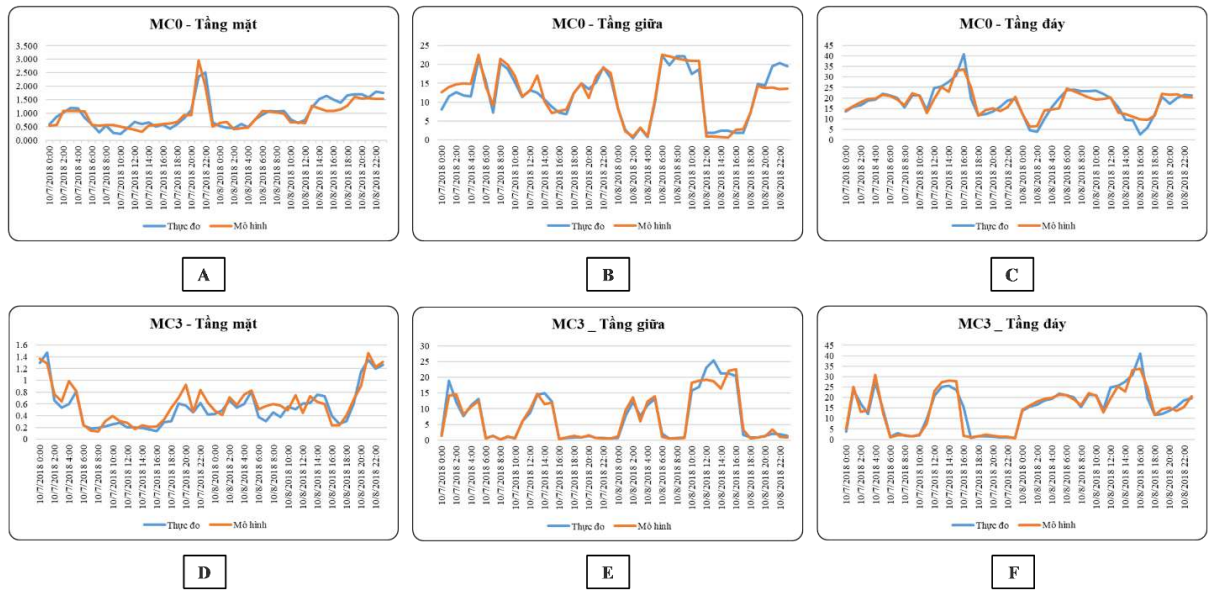
Trong nghiên cứu này sử dụng Mike 3 để tìm ra cơ chế truyền mặn tại vùng cửa sông Vệ nên bộ 3 hệ số (D_x – theo phương dọc theo dòng chảy, D_y – phương ngang từ bờ này qua bờ kia, D_z – theo phương đứng từ mặt nước tới đáy) đóng vai trò rất quan trọng (và đây cũng là phát hiện khoa học quan trọng của Luận án này). Để thực hiện cả 2 bước hiệu chỉnh và kiểm định đòi hỏi sự thận trọng và thời gian do chạy Mike 3 thường là 8 ngày/kịch bản. Việc hiệu chỉnh và kiểm định module truyền mặn dựa trên kết quả đo liên tục. Do hạn chế của số liệu thực đo nên chuỗi số liệu đo ngày 7/10/2018 tại các mặt cắt 2 mặt cắt MC0, MC3 được sử dụng cho bước hiệu chỉnh (do trong đợt đo này,

kết quả tại MC4 độ mặn tại các điểm đo cũng như tại các tầng rất nhỏ, gần như bằng 0). Còn lại ngày 8/10/2018 được sử dụng để kiểm định. Hệ số D_x được lựa chọn là 0.3 (m^2/s) là tối ưu (theo bộ số liệu thực đo). Quá trình hiệu chỉnh D_z , D_y được thực hiện đầu tiên với hệ số D_z lần lượt là các số 0.01, 0.001 và 0.0001 kết hợp với hệ số D_y được giữ nguyên ở giá trị là 0.6. Trong quá trình hiệu chỉnh D_z NCS thấy hệ số này ảnh hưởng đến sự phân tầng của độ mặn (sự phân bố mặn theo độ sâu), cụ thể hệ số này càng nhỏ độ mặn phân bố giữa các tầng càng có sự chênh lệch. Để đánh giá sai số bước hiệu chỉnh, chuỗi số liệu đo với bước thời gian 1h (ngày 7/10/2018) theo 3 tầng tại vị trí MC0 và MC3 được tận dụng để so sánh với kết quả mô hình thông qua các chỉ số Nash-Sutcliffe, R^2 , PBIAS và RSR được thực hiện. Bước hiệu chỉnh cho thấy các chỉ số ở tầng giữa và tầng đáy có xu hướng tốt hơn tầng mặt, đồng thời $D_z = 0.0001$ (m^2/s) là tối ưu nhất. Sau bước đầu sơ bộ chọn được hệ số D_z , bước hiệu chỉnh tiếp theo sẽ thay đổi hệ số D_y . Quá trình hiệu chỉnh hệ số D_y được thay đổi lần lượt với các giá trị 0.1, 0.2, 0.3, ... (m^2/s) và nhận thấy được quy luật là hệ số D_y càng lớn thì độ mặn càng tăng. Kết quả mô phỏng độ mặn với các giá trị D_y cũng được so sánh với số liệu thực đo yếu tố độ mặn theo chế độ 24/24 từ 0h ngày 7-10 đến 23h cùng ngày tại 3 tầng của 2 mặt cắt: mặt cắt 0, mặt cắt 3 được đánh giá mức độ phù hợp của các hệ số. Từ kết quả tính toán trên nhận thấy, các chỉ số tối ưu nhất khi kết hợp giữa hệ số $D_y = 0.1$ (m^2/s) và $D_z = 0.0001$ (m^2/s). Kết quả kiểm định được thực hiện trên bộ số liệu thực đo ngày 8/10/2018 được thể hiện trên Bảng 0-1, **Error! Reference source not found..**

Bảng 0-1. Kết quả tính toán các chỉ số ở bước hiệu chỉnh mô hình

	NSE			R^2			PBIAS			RSR		
	M	G	Đ	M	G	Đ	M	G	Đ	M	G	Đ
MC0	0.787	0.909	0.830	0.866	0.915	0.855	10.242	6.237	-2.732	0.462	0.302	0.413
MC3	0.807	0.935	0.826	0.825	0.936	0.831	-5.108	1.573	-2.289	0.440	0.254	0.417

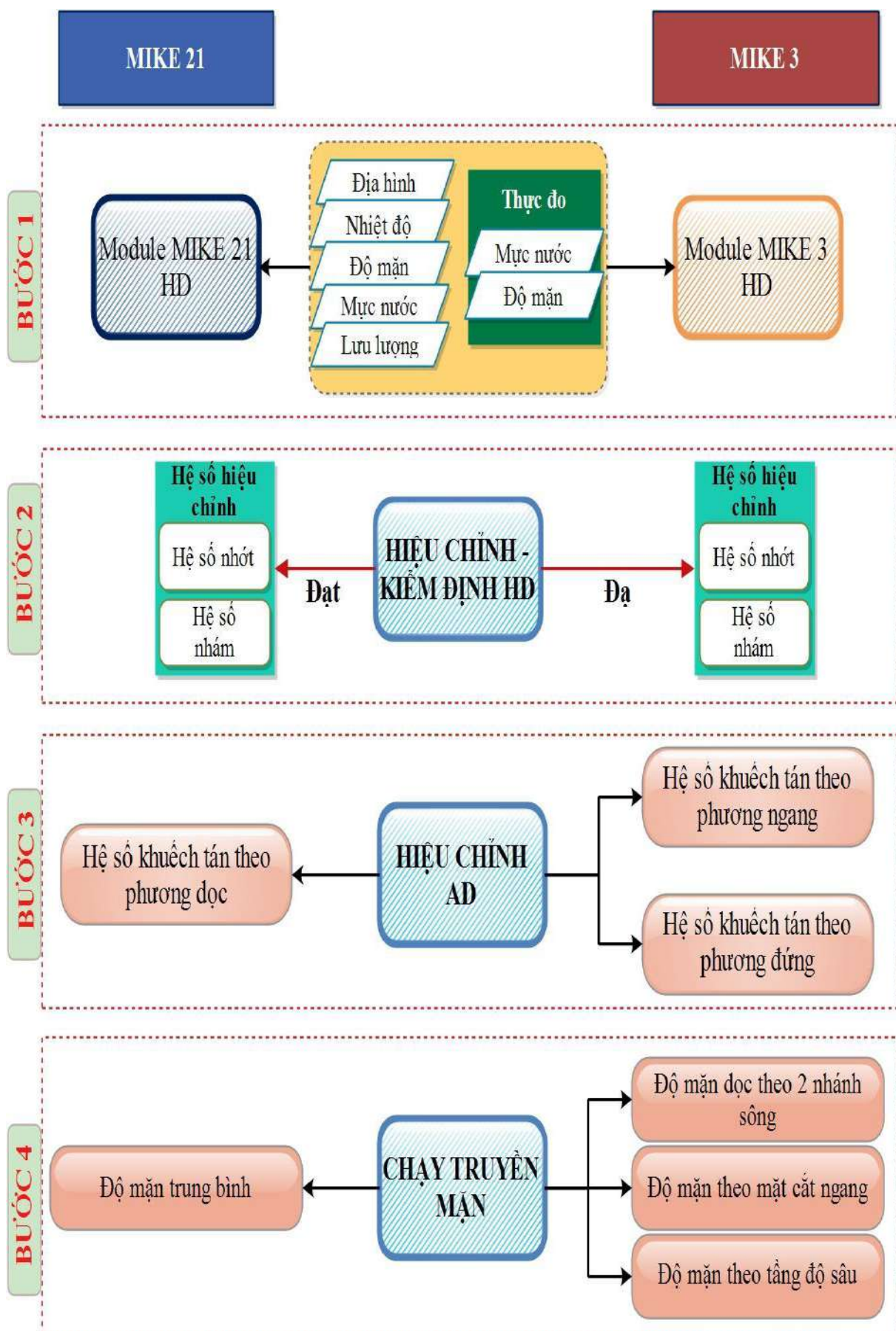
Kết quả nhận được cho khu vực cửa sông Vệ như sau: hệ số rối theo phương dọc : 0,3 (m^2/s), theo phương ngang 0,1 (m^2/s), theo phương đứng 0,0001 (m^2/s).



Hình 2-5. Kết quả kiểm định mặn theo 3 tầng (tầng mặt, tầng giữa, tầng đáy)

2.2.4. Các bước ứng dụng mô hình toán

Nội dung và các bước ứng dụng mô hình toán thủy động học được sử dụng trong luận án được trình bày trên Hình 2-6, gồm dữ liệu đầu vào (được thể hiện trong bước 1), trong đó bộ số liệu thực đo gồm độ mặn, mực nước (trạm Sông Vệ, Hình 1-2), lưu lượng (trạm An Chỉ, Hình 1-2). Bước 2, thực hiện hiệu chỉnh và kiểm định mô hình toán HD, sử dụng bộ số liệu thực đo có trong bước 1. Bước 3, thực hiện hiệu chỉnh bộ thông số hệ số khuếch tán theo phương ngang và phương đứng, bước này sử dụng mô hình HD (đã được kiểm định trong bước 2). Bước 4 thực hiện chạy mô hình truyền mặn, sử dụng kết quả từ bước 3. Kết quả của bước 4, sẽ xuất ra độ mặn, chuỗi số liệu theo thời gian, theo 2 bờ, tim sông, theo mặt cắt ngang và theo các tầng theo độ sâu.



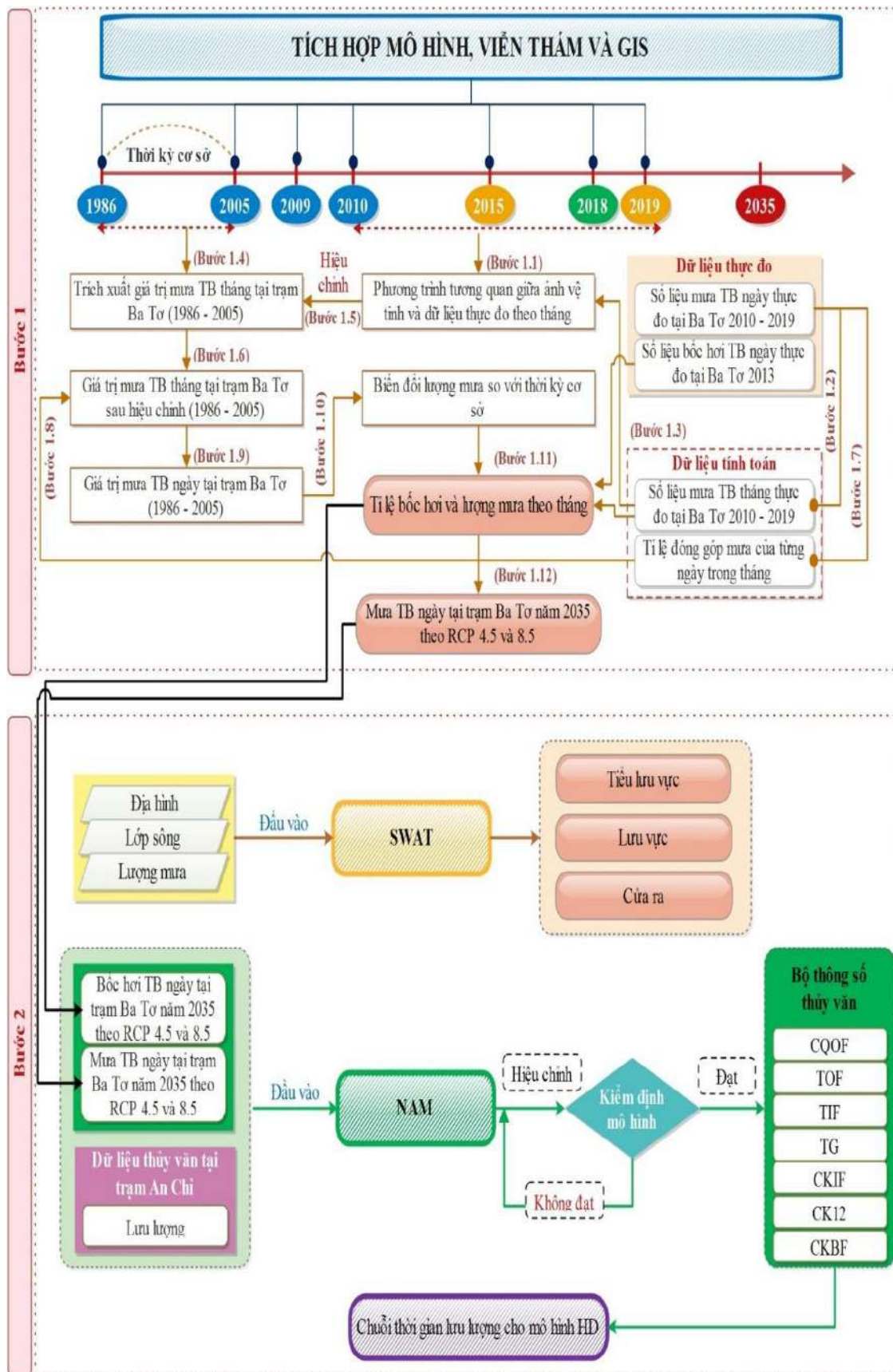
Hình 2-6. Khung nghiên cứu với các mô hình toán được sử dụng.

2.3 Xây dựng bộ thông số lưu ý tới BĐKH

Quy trình xây dựng bộ thông số – có lưu ý tới BĐKH được xây dựng dựa trên cách tiếp cận thực đo – viễn thám – mô hình hóa – dự báo theo kịch bản BĐKH, theo 12 nội dung được chỉ ra trên Hình 2-7. Cụ thể như sau: 1/ xây dựng phương trình tương quan giữa ảnh vệ tinh và số liệu thực đo (tạo mối liên hệ định lượng để hiệu chỉnh ảnh mưa GPCPMON); 2/ Hiệu chỉnh dữ liệu ảnh vệ tinh bằng phương trình tương quan (nâng độ chính xác của ảnh mưa); 3/ So sánh mưa từ ảnh vệ tinh với mưa thực đo tại các trạm Quảng Ngãi và Ba Tơ (đánh giá độ lệch & xác nhận độ chính xác của dữ liệu); 4/ Trích xuất mưa trung bình tháng từ dữ liệu thực đo (tạo chuỗi mưa giai đoạn nền 1986–2005, 2010–2019); 5/ Hiệu chỉnh chuỗi mưa tháng đã trích xuất (nhằm chuẩn hóa dữ liệu đầu vào cho mô hình); 6/ Chuyển đổi từ mưa tháng sang mưa trung bình ngày (nhằm phục vụ mô phỏng theo bước thời gian ngày trong mô hình NAM); 7/ Tính lượng mưa tháng theo phương pháp phân bố tỷ lệ (phân bố chính xác mưa nội tháng từ tổng số liệu tháng); 8/ Xây dựng chuỗi mưa trung bình ngày lịch sử (tạo chuỗi đầu vào đủ dài); 9/ Phân tích biến động mưa so với thời kỳ cơ sở (đánh giá xu thế biến đổi khí hậu theo thời gian); 10/ Tính tỷ lệ bốc hơi và lượng mưa theo tháng (phân tích cân bằng nước và nguy cơ khô hạn từng tháng); 11/ Dự báo lượng mưa ngày năm 2035 theo RCP 4.5 & RCP 8.5; 12/ Áp dụng chuỗi dữ liệu vào mô hình NAM & SWAT (mô phỏng lưu lượng, phân chia tiêu lưu vực, phục vụ đánh giá BĐKH). Bộ số liệu đầu vào gồm:

Mưa thực đo tại trạm Ba Tơ và Quảng Ngãi (2010–2019) (Hình 2-8)

- Bốc hơi thực đo trung bình tháng cùng thời gian (Hình 2-9)
- Ảnh mưa GPCPMON v3.2 từ NASA (1986–2005, 2010–2019)
- Kịch bản BĐKH RCP 4.5 & RCP 8.5 do Bộ TNMT công bố (2016)

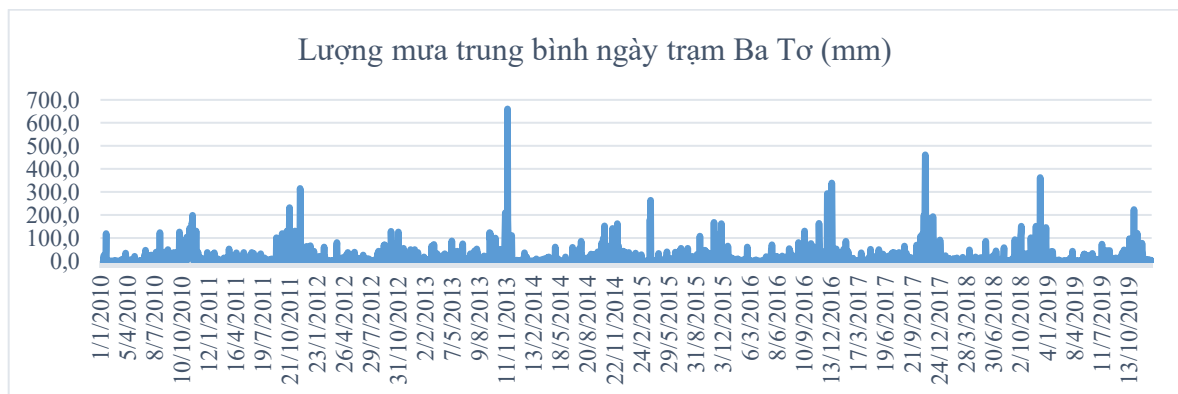


Hình 2-7. Các nội dung và các bước xây dựng bộ dữ liệu lưu ý tới biến đổi khí hậu

Bộ số liệu trên được thu thập (Hình 2-6, bước 1), gồm bộ số liệu mưa thực đo tại hai trạm Ba Tơ và Quảng Ngãi, thời gian: 1/2010 – 12/2019, trung bình ngày (Hình 2-9); số liệu bốc hơi thực đo tại các vị trí: trạm Ba Tơ và Quảng Ngãi, thời gian: 1/2010 – 12/2019, bước thời gian: trung bình tháng (Hình 2-9); kịch bản Biến đổi khí Bộ TNMT công bố năm 2016 với nhan đề “Sự thay đổi giá trị lượng mưa so với thời kỳ cơ sở của năm 2035 theo kịch bản RCP4.5 và 8.5”. Ảnh mưa vệ tinh GPCPMON v3.2 (thuộc chương trình Nghiên cứu Khí hậu Thế giới - WCRP) được sử dụng để ước tính lượng mưa. Bộ ảnh có độ phân giải là $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ và theo thời gian hàng tháng với dữ liệu hiện tại là 1986-2020. Luận án sử dụng ảnh với thời gian từ 1/1986 – 12/2005 và 1/2010 – 12/2019 tại trang web <https://search.earthdata.nasa.gov/>. Kết quả của bước 1 sẽ phục vụ đầu vào cho bước 2 (Hình 2-7), được đưa vào mô hình thủy văn NAM để tạo biên lưu lượng cho kịch bản BĐKH. Lưu ý rằng trong bước 2, mô hình SWAT còn được sử dụng để phân chia tiểu lưu vực, lưu vực và cửa ra [10]. Công thức tính toán của lượng mưa trong tương lai được xác định như sau:

$$\Delta R_{tương\ lai} = \frac{R_{tương\ lai} - \underline{R}_{1986-2005}}{\underline{R}_{1986-2005}} \times 100 \quad (2.14)$$

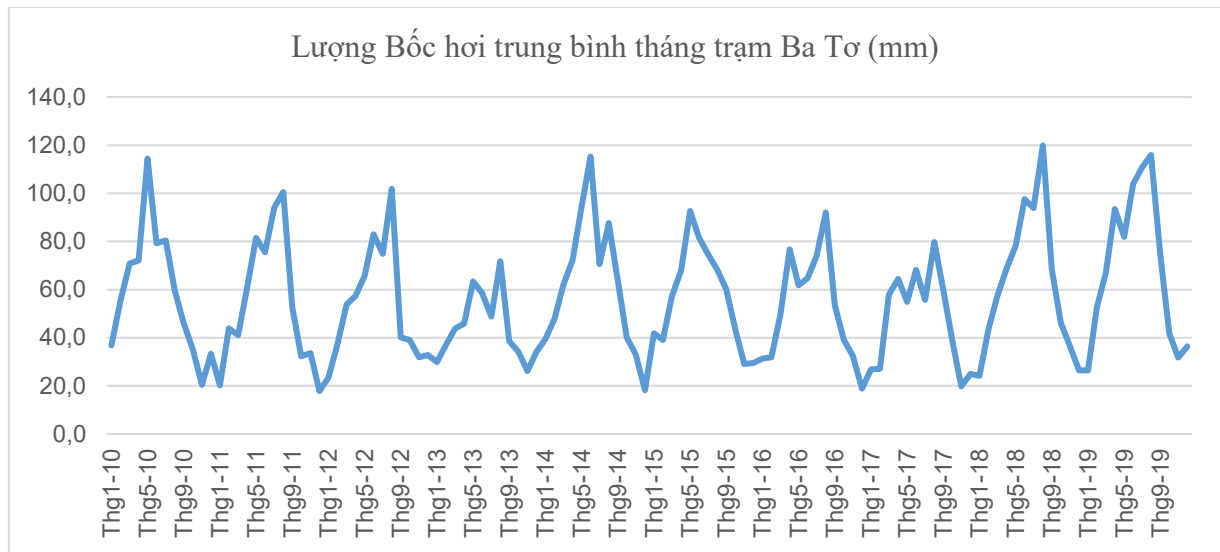
Trong đó: $\Delta R_{tương\ lai}$ = Thay đổi của lượng mưa trong tương lai so với thời kỳ cơ sở (%); $R_{tương\ lai}$ = Lượng mưa trong tương lai (mm); $\underline{R}_{1986-2005}$ = Lượng mưa trung bình của thời kỳ cơ sở (1986-2005) (mm).



Hình 2-8. Biểu đồ lượng mưa trung bình ngày của trạm Ba Tơ

Biểu đồ phân tích lượng mưa trung bình ngày tại trạm Ba Tơ cho thấy lượng mưa thường dao động từ 0 – 20mm (chiếm 86.4%) và 8.6% đối với lượng mưa từ 20 – 50mm.

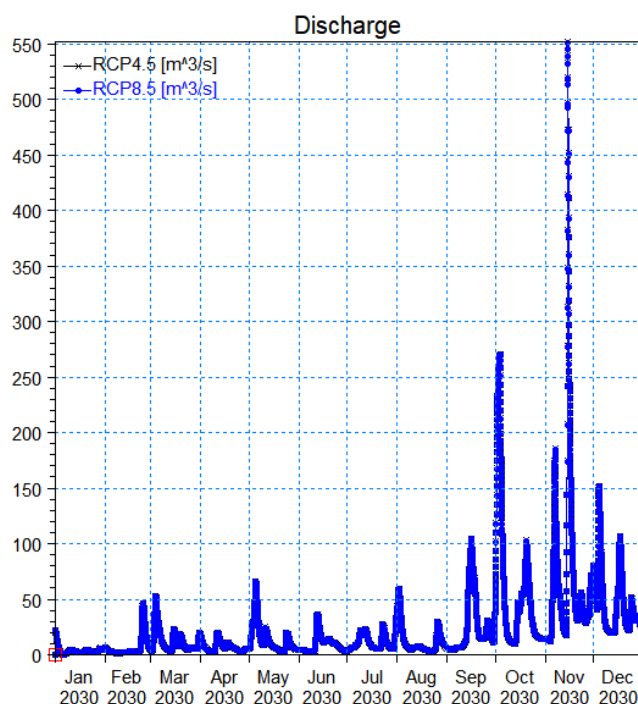
Một số ngày có lượng mưa cao bất thường như 15/11/2013 (660.7mm) và 6/11/2017 (421.7mm) Hình 2-8.



Hình 2-9. Lượng bốc hơi trung bình tháng của trạm Ba Tơ thực đo [8] [10]

Lượng nước bốc hơi trung bình tháng tại trạm Ba Tơ chủ yếu dao động từ 20 – 50mm (chiếm 43.3%), thời điểm có lượng bốc hơi cao rơi vào tháng 4 đến tháng 8 hàng năm. Một số tháng có lượng bốc hơi trên 100mm như 5/2010, 8/2012, 6/2014, 8/2018 và tháng 7, 8/2019. Thông qua xu thế thay đổi lượng bốc hơi hàng tháng tại trạm Ba Tơ, có 10/12 tháng lượng bốc hơi có xu hướng tăng (trừ tháng 2 và tháng 5) Hình 2-9.

Dựa trên bước 2 của Hình 2-7 thực hiện chạy NAM với bộ thông số thủy văn đã được hiệu chỉnh [11] để tạo ra chuỗi số liệu time series cho MIKE 21 HD.



Hình 2-10. Kết quả chạy NAM xuất ra lưu lượng biên các kịch bản xem xét.

2.4 Lựa chọn phương án phân tích

Xâm nhập mặn tại nhiều con sông của khu vực miền Trung có đặc điểm khác biệt rõ rệt theo hai mùa khô và mùa mưa [14], [16]. Để thấy được tổng quát cơ chế xâm nhập mặn, sự khác nhau giữa bức tranh lan truyền mặn của 2 mùa tại sông Vệ, nghiên cứu sinh thực hiện phân tích đánh giá mức độ, phạm vi phân tầng mặn trung bình theo các mùa giai đoạn 2015 - 2019. Trong từng năm, độ mặn trung bình mùa khô được tính toán theo 6 tháng kiệt nhất trong năm, từ tháng 2 đến tháng 7; mùa mưa được tính theo 6 tháng còn lại từ tháng 8 tới tháng 1 năm sau. Kết quả phân tích cho thấy đặc điểm phân tầng mặn tại vùng cửa sông Vệ luôn có sự biến động phụ thuộc vào chế độ thủy triều ngoài biển và tác động dòng chảy thượng nguồn theo các thời kỳ và thời điểm khác nhau. Để tổng quát về cơ chế phân tầng mặn trong luận án thực hiện phân tích so sánh giữa các thời điểm triều của thời kỳ triều đặc trưng trong mùa kiệt, mùa lũ.

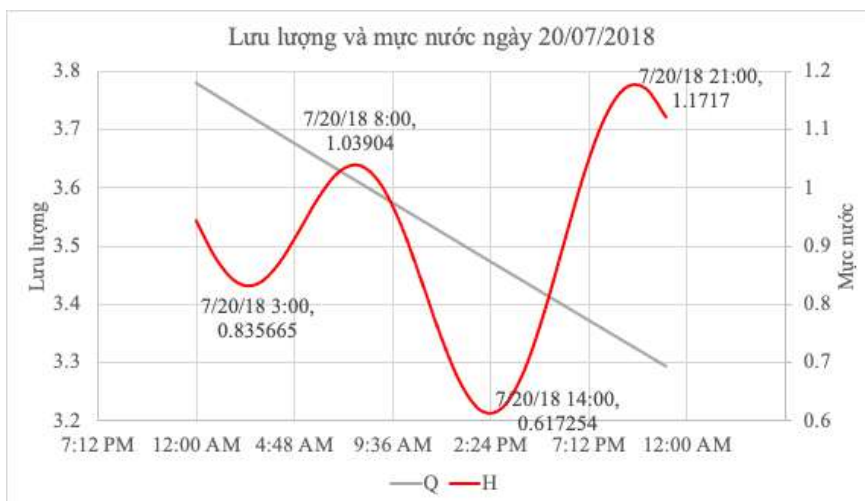
2.4.1. Lựa chọn thời kỳ phân tích phân tầng và nêm mặn

Từ kết quả tính toán mực nước và lưu lượng, trích xuất tháng đặc trưng cho mùa kiệt trong năm, tháng 7 của năm cụ thể được lựa chọn là tháng điển hình của mùa kiệt, tháng

12 được chọn - tháng điển hình của mùa lũ. Trong luận án trình bày cho năm điển hình 2018.



Hình 2-11. Lưu lượng thượng nguồn tháng 7/2018 [10]



Hình 2-12. Biểu đồ lưu lượng, mực nước ngày 20/7/2018 [8][10]

Để đánh giá phạm vi truyền mặn xa nhất cùng với đó là mức độ phân tầng, nghiên cứu lựa chọn trong từng năm giai đoạn 2015 – 2019 chọn ra tháng “kiệt” nhất, với 5 năm được xem xét, tháng kiệt nhất trong năm rơi vào các tháng khác nhau. Để lựa chọn ngày cụ thể của mùa kiệt theo năm thủy văn, ngày 20 tháng 7 tháng 2018, bởi vì đây một trong những ngày kiệt nhất tháng 7 ứng với năm 2018 với các biểu đồ về mực nước và lưu lượng tương ứng (Hình 2-12).

Kết quả phân tích cho thấy, chế độ thủy triều của sông Vệ thuộc khu vực bán nhật triều không đều gồm hai lần triều lên, hai lần triều xuống trong ngày (Bảng 2-3). Con triều lần thứ nhất có mực nước dao động ít hơn con triều lần thứ hai trong ngày.

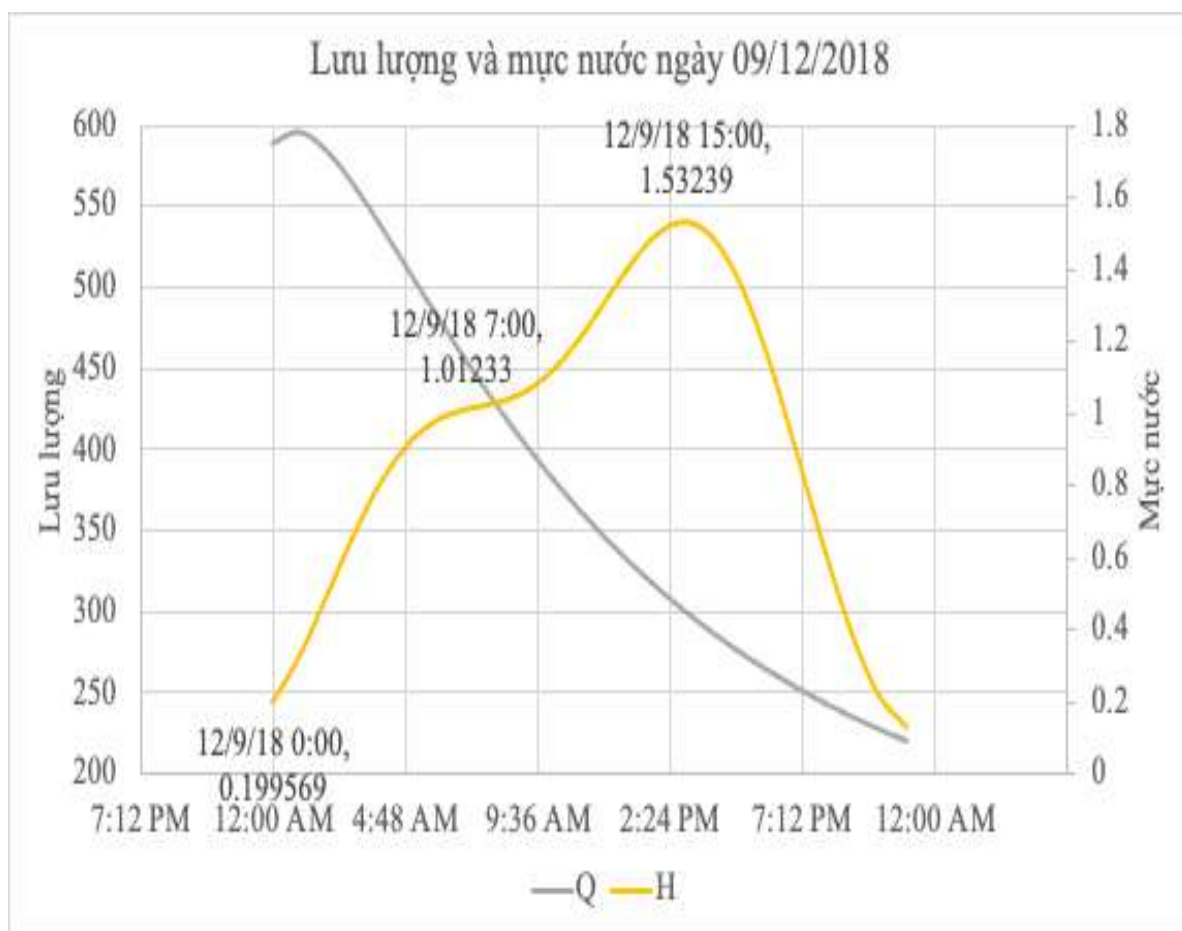
Thời gian triều lên là từ 3 giờ đến 8 giờ, từ 8 giờ tới 14 giờ triều xuống, triều lên lại lúc 21 giờ, và tới 3 giờ ngày hôm sau xuống lại. Các kết quả cơ chế lan truyền mặn, mức độ phân tầng được trích xuất cho cả 2 thời kỳ triều thấp và triều cao để so sánh và đánh giá. Thời điểm trích xuất độ mặn được thể hiện trong Bảng 2-3.

Bảng 2-3. Các thời điểm trích xuất kết quả trong mùa kiệt

Thời điểm trích xuất kết quả		Đặc điểm triều
Triều thấp	Triều cao	
3 giờ 20/07/2018	14 giờ 20/07/2018	Chân triều
8 giờ 20/07/2018	21 giờ 20/07/2018	Đỉnh triều

Dựa trên chuỗi số liệu lưu lượng và mực nước trong tháng mùa lũ, nghiên cứu lựa chọn ngày 09 tháng 12 năm 2018 thực hiện phân tích. Số liệu cho thấy lưu lượng ngày 9/12/2018 đạt cực đại trong năm 2018.

Có thể thấy sự khác biệt rõ rệt giữa lưu lượng và mực nước giữa mùa kiệt (Hình 2-12) và mùa lũ (Hình 2-13). Lưu lượng mùa lũ có ngày lên đến gần 600 m³/s và mực nước cũng biến động khác biệt so với mùa kiệt.



Hình 2-13 Biểu đồ lưu lượng và mực nước ngày 09/12/2018

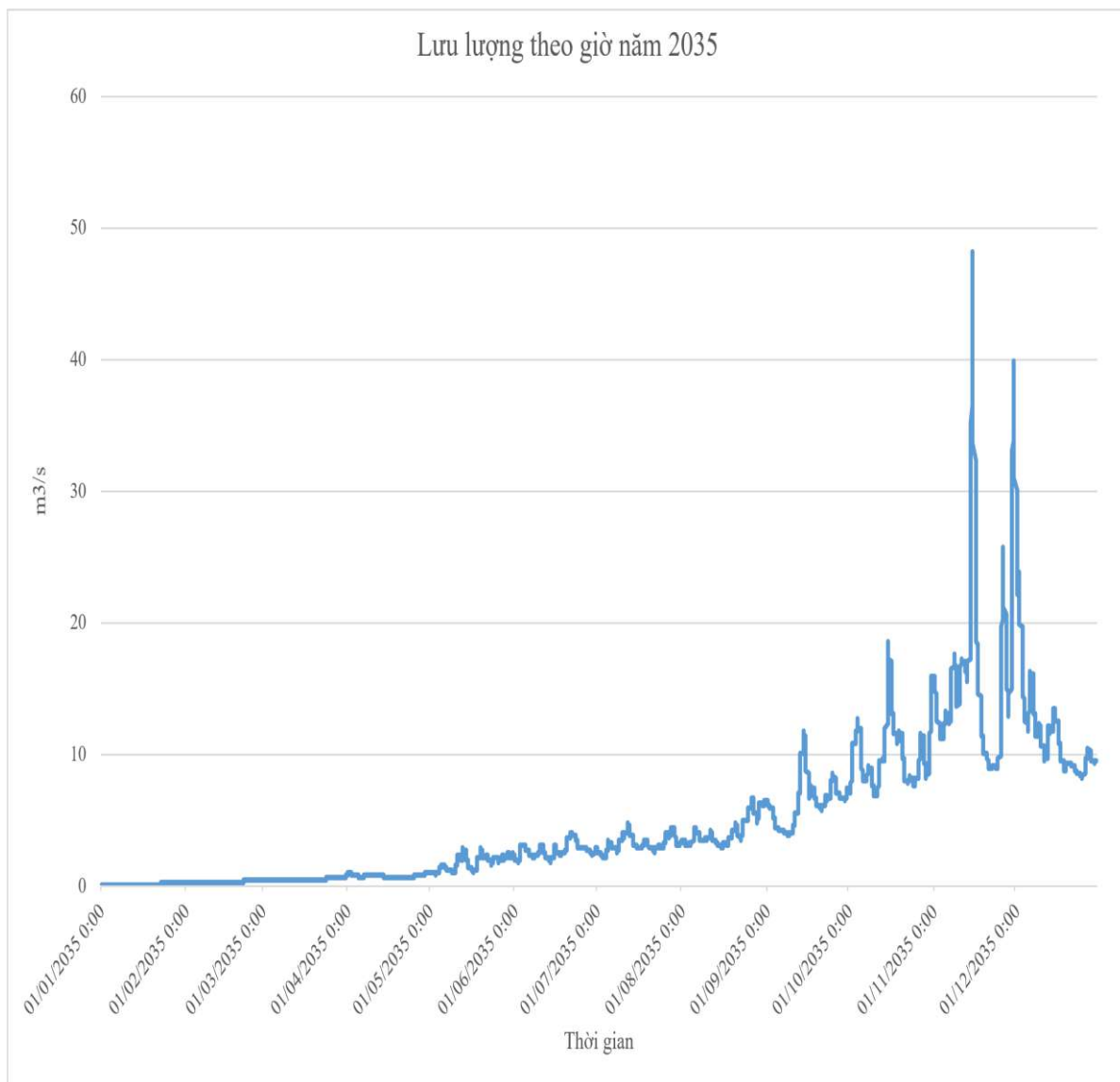
Chế độ thủy triều của sông Vệ thuộc khu vực bán nhật triều không đều, tuy nhiên vào mùa lũ, quy luật không rõ ràng như mùa khô (Hình 2-12, Hình 2-13). Nếu vào mùa khô, hai lần triều lên và hai lần triều xuống. Trong khi vào mùa mưa lũ, từ 0 giờ đến 7 giờ triều lên, từ 7 giờ đến 9 giờ triều có xuống nhưng rất nhẹ, và tiếp tục lên lần thứ hai trong ngày đến 15 giờ, sau 15 giờ triều xuống. Các kết quả phân tích cơ chế lan truyền mặn vẫn được trích xuất cho thời kỳ triều thấp và triều cao để so sánh và đánh giá (Bảng 2-4).

Bảng 2-4. Các thời điểm trích xuất kết quả mùa mưa - lũ

Thời điểm trích xuất kết quả		Đặc điểm triều
Triều thấp	Triều cao	
7 giờ 09/12/2018	23 giờ 09/12/2018	Chân triều
0 giờ 09/12/2018	15 giờ 09/12/2018	Đỉnh triều

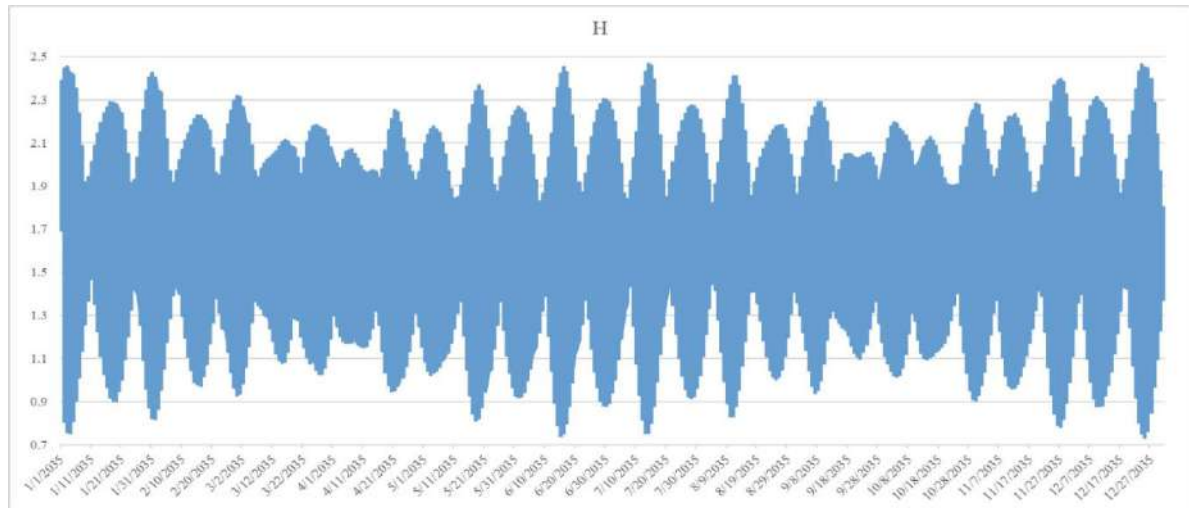
2.4.2. Lựa chọn thời kỳ phân tích phân tầng cho kịch bản BĐKH

Chuỗi số liệu mực nước và lưu lượng năm 2035 được phân tích, tháng 7 được chọn là tháng điển hình của mùa kiệt, tháng 11 là tháng điển hình của mùa mưa lũ được lựa chọn (Hình 2-14).



Hình 2-14 Lưu lượng thượng nguồn cho kịch bản BĐKH năm 2035, đơn vị: m³/s.

Lưu lượng thượng nguồn năm 2035 có sự chênh lệch vào mùa mưa so với các năm 2015 - 2019. Kết quả tính toán dự báo cho 2035 cho thấy, sự chênh lệch này do lượng mưa vào mùa khô năm 2035 giảm đi hơn một nửa so với năm 2018 (Hình 2-14, Hình 2-15).



Hình 2-15 Mực nước cho kịch bản BĐKH năm 2035, đơn vị: m

Tương tự, ngày 20/7/2035 được lựa chọn để xem xét tác động của BĐKH tại khu vực nghiên cứu Bảng 2-5.

Bảng 2-5. Các thời điểm trích xuất kết quả mùa kiệt, 2035

Thời điểm trích xuất kết quả		Đặc điểm triều
Triều thấp	Triều cao	
3 giờ 20/07/2035	14 giờ 20/07/2035	Chân triều
8 giờ 20/07/2035	21 giờ 20/07/2035	Đỉnh triều

2.5 Lựa chọn tuyến phân tích kết quả xâm nhập mặn

2.5.1. Tuyến trích xuất kết quả bản đồ theo phương đứng

Kết quả dọc sông từ cửa biển (trạm Cửa Lở) lên phía thượng nguồn 6 km, dọc theo bờ trái, tim sông và bờ giữa của sông được trích xuất. Trên sơ đồ tính sẽ trích xuất kết quả theo các điểm có tọa độ theo mặt bằng, cố định theo từ đường thẳng. Các kết quả dọc theo nhánh sông sẽ được trích xuất tại cùng một thời điểm để trên cơ sở đó so sánh các giá trị liên quan đến xâm nhập mặn, phân tầng trên hai nhánh sông (Bảng 2-6).

Bảng 2-6. Toạ độ và cao trình các điểm trích xuất kết quả

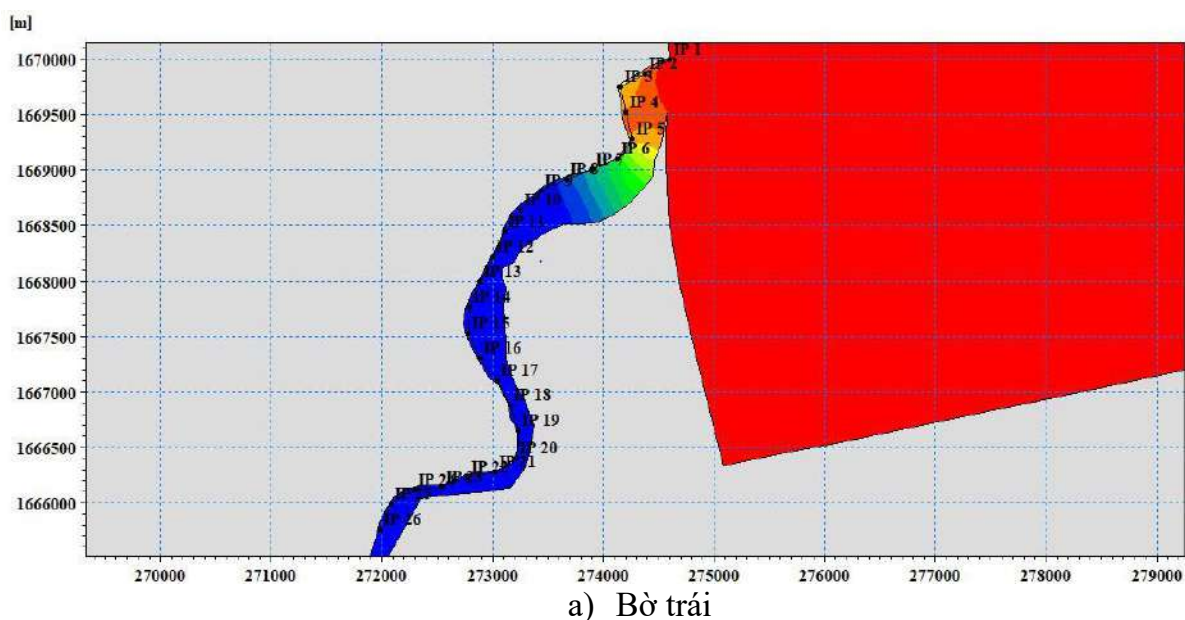
Bờ trái			Tim sông			Bờ phải		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
274599.8922	1669988.557	-10.332	274634.6573	1669762.891	-5.028	274628.3281	1669553.732	-7.070
274378.8684	1669871.73	-12.680	274388.783	1669735.866	-12.103	274518.1088	1669373.195	-9.354
274157.8445	1669754.903	-12.890	274404.4901	1669486.778	-11.023	274452.4656	1669131.967	-9.904
274201.3862	1669520.612	-12.292	274374.294	1669239.283	-10.566	274366.3739	1668903.433	-12.425
274262.9623	1669278.314	-12.405	274263.644	1669017.857	-10.940	274206.9628	1668713.546	-12.414
274130.0157	1669096.203	-12.610	274068.8712	1668866.852	-13.582	273994.6836	1668581.495	-12.461
273897.3042	1669004.85	-13.404	273835.3967	1668777.682	-13.664	273750.9879	1668542.881	-13.185
273664.5927	1668913.497	-13.664	273603.7935	1668684.127	-13.674	273515.7796	1668471.464	-13.658
273440.2533	1668808.766	-13.386	273398.2767	1668542.504	-13.671	273303.8834	1668339.858	-13.674
273256.3671	1668639.398	-13.113	273209.5753	1668379.05	-13.641	273117.0372	1668174.954	-13.675
273106.5275	1668446.743	-13.264	273063.2997	1668176.31	-13.675	273086.7585	1667948.583	-13.661
273007.1772	1668217.721	-13.577	272985.7679	1667943.142	-13.675	273070.2366	1667700.967	-13.609
272890.6847	1667996.555	-13.622	272908.2048	1667706.892	-13.675	273086.0923	1667451.493	-13.473
272789.9777	1667767.737	-13.675	272951.3139	1667461.771	-13.675	273124.9476	1667205.327	-13.617
272787.7408	1667525.525	-13.675	273041.8747	1667228.872	-13.675	273231.4426	1666979.145	-13.629
272892.8807	1667299.705	-13.675	273156.0388	1667006.608	-13.672	273330.9733	1666749.982	-13.295
273040.9062	1667101.511	-13.675	273249.1608	1666776.711	-13.673	273318.3714	1666506.915	-13.623
273158.2229	1666882.455	-13.673	273290.6376	1666534.657	-13.671	273235.9191	1666274.207	-13.448
273236.0795	1666648.36	-13.674	273194.3073	1666310.763	-13.669	273040.8803	1666145.264	-13.597
273216.2535	1666406.343	-13.665	272980.479	1666196.021	-13.676	272792.983	1666113.867	-13.676
273019.3048	1666272.496	-13.675	272734.0398	1666154.988	-13.676	272544.8402	1666083.57	-13.676
272773.0639	1666229.305	-13.676	272489.4137	1666103.674	-13.676	272312.1741	1666029.183	-13.676
272539.109	1666144.977	-13.676	272256.2453	1666032.954	-13.676	272196.6609	1665807.522	-13.676
272291.5059	1666110.441	-13.676	272106.759	1665840.73	-13.676	272069.9528	1665592.042	-13.677
272084.8269	1665986.928	-13.676	272010.4591	1665610.024	-13.677			
271985.3479	1665760.861	-13.676						

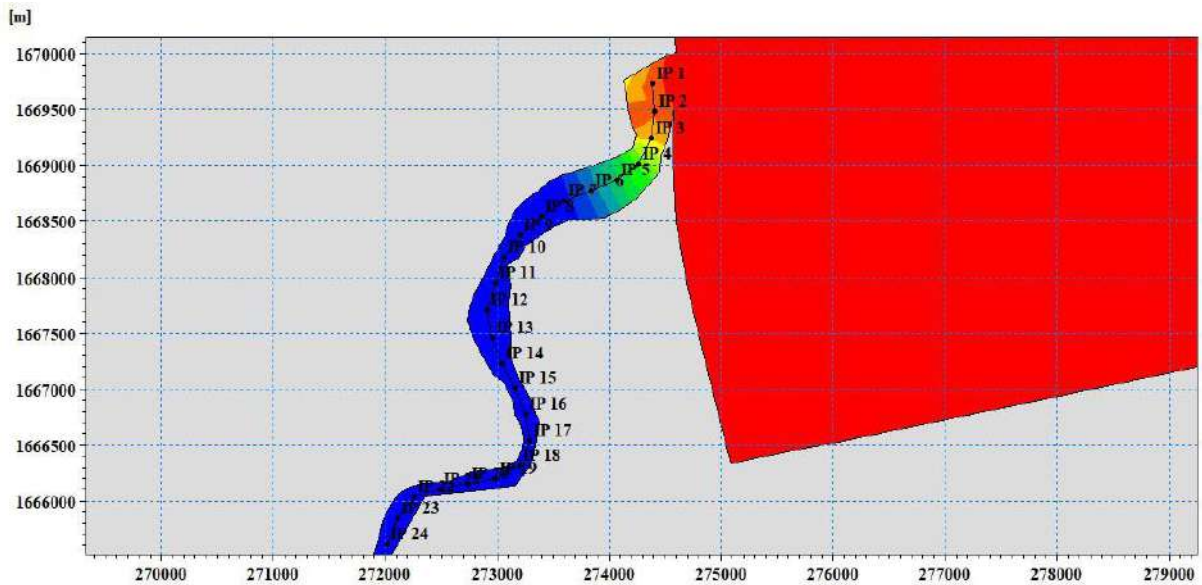
Bảng 2-7. Độ sâu theo tầng tại 2 vị trí mặt cắt MC0 và MC3

	MC0			MC3		
	Bờ trái	Tim sông	Bờ phải	Bờ trái	Tim sông	Bờ phải
Tầng 1	1.59	0.63	0.88	1.61	1.38	1.24
Tầng 2	3.17	1.25	1.75	3.22	2.76	2.48
Tầng 3	4.76	1.88	2.63	4.83	4.13	3.71
Tầng 4	6.34	2.50	3.50	6.45	5.51	4.95
Tầng 5	7.93	3.13	4.38	8.06	6.89	6.19
Tầng 6	9.51	3.75	5.25	9.67	8.27	7.43
Tầng 7	11.10	4.38	6.13	11.28	9.65	8.67
Tầng 8	12.68	5.00	7.00	12.89	11.02	9.90

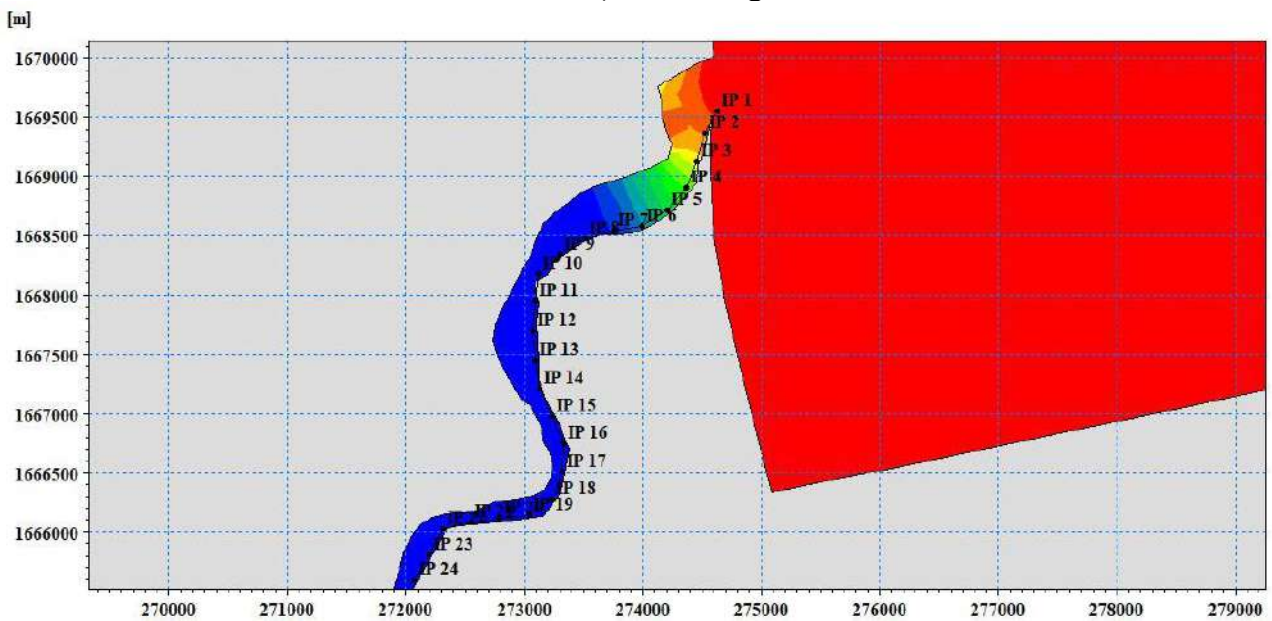
Trên Bảng 2-6 thể hiện tọa độ và độ sâu các điểm trích xuất kết quả dọc theo bờ trái, tim sông và bờ phải. Trên Bảng 2-7 độ sâu theo tầng tại 2 vị trí mặt cắt MC0 và MC3 của 8 tầng được trích xuất để phân tích cơ chế truyền mặn và hình dáng các nêm mặn được lựa chọn để biện luận.

Trên Hình 2-16 sơ họa các tuyến trích xuất kết quả của bờ trái, tim sông và bờ phải, ứng với tọa độ của từng điểm như trên Bảng 2-6.





b) Tím sông



c) Bờ phải

Hình 2-16. Sơ họa tuyến trích kết quả dọc nhánh sông Vệ

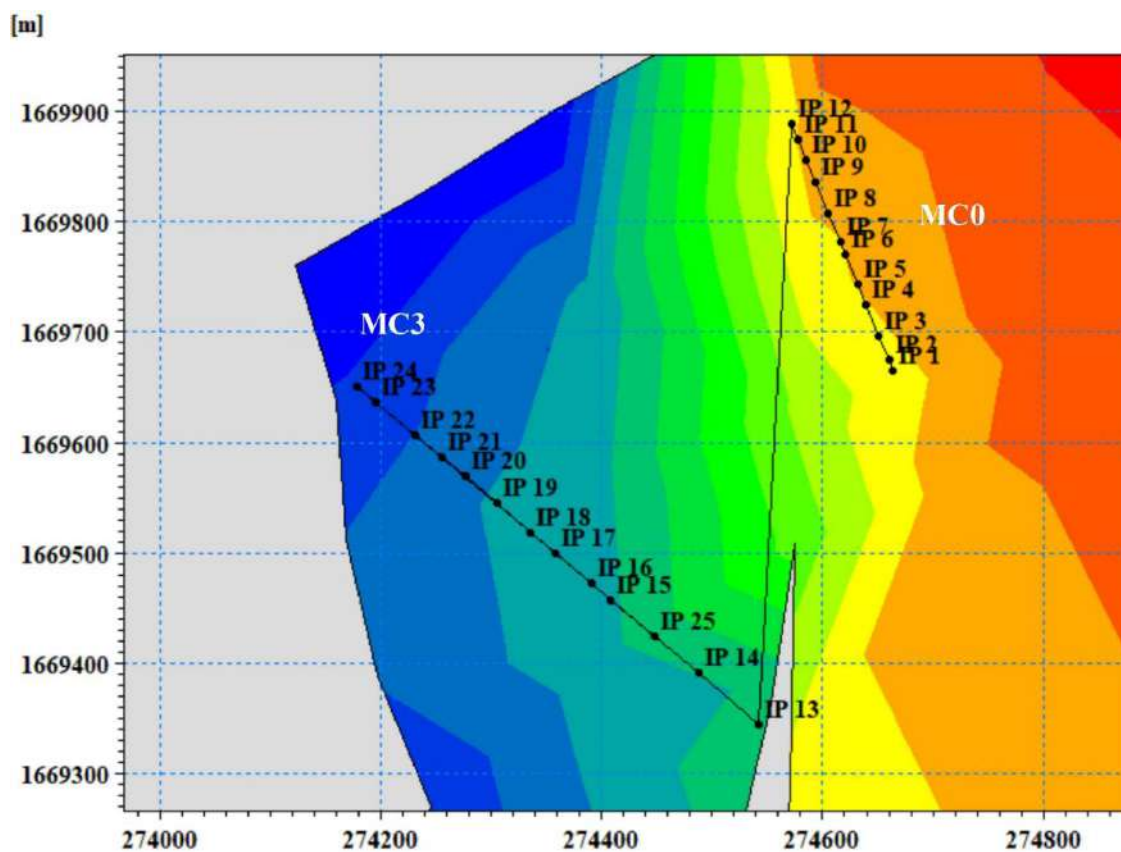
Để có cơ sở đánh giá, so sánh đặc điểm nê mặn, sự biến đổi hình dạng, độ dịch chuyển nê mặn trong các thời kỳ triều, các thời điểm triều đặc trưng trong mỗi con triều, đường đẳng trị mặn có nồng độ 1‰ được lựa chọn, bởi từ mốc này đánh dấu nước lợ - gây tác động cho hoạt động nông nghiệp.

Do dòng chảy sông Vệ về mùa lũ rất lớn, chênh lệch nhiều so với mùa kiệt nên xâm nhập mặn tại vùng cửa sông Vệ không đáng kể dẫn tới ít có những nghiên cứu tính toán cụ thể. Trong nghiên cứu này, để có thể đánh giá một cách đầy đủ về cơ chế phân tầng cho vùng

cửa sông theo các mùa trong năm, phân tích phần truyền mặn, phân tầng được thực hiện cho cả mùa lũ. Thời điểm phân tích tính toán, cho một con triều thấp và một con triều cao trùng với thời kỳ triều cường trong năm.

2.5.2. Tuyến trích xuất kết quả theo mặt cắt ngang sông

Trên cơ sở tính toán mặn có thể trích xuất kết quả phân bố mặn cho các mặt ngang sông tại từng vị trí theo dọc sông để đánh giá sự thay đổi của nồng độ mặn theo chiều sâu tại các vị trí ngang sông. Trong nghiên cứu, sẽ tiến hành trích dẫn dọc theo hai vị trí MC0 và MC3 (Hình 2-17).



Hình 2-17 Sơ đồ họa tuyến cắt ngang

Đánh giá chi tiết cho hai mặt cắt ngang sông MC0 và MC3 tại khu vực sông Vệ được thực hiện. Lý do hai mặt cắt này được lựa chọn để một mặt tận dụng kết quả mô phỏng, cũng như số liệu thực đo. Bên cạnh đó, mặt cắt MC0 là ranh giới mặn giữa cửa sông và biển, khu vực MC3 là ranh giới mặn lợ. Cắt một mặt cắt ngang vuông góc với trục dọc sông của nhánh

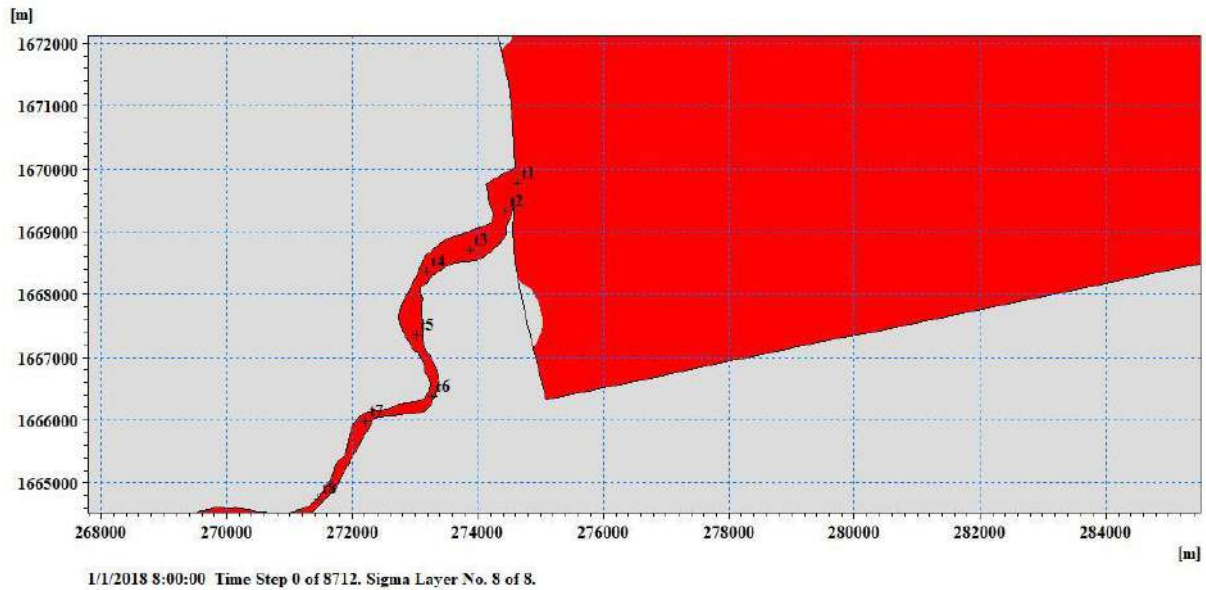
sông Vệ. Các thời điểm đặc trưng cho một con triều (chân triều, đỉnh triều) trong các thời kỳ triều khác nhau (triều thấp, triều cao) được thực hiện.

2.5.3. Tuyến trích xuất kết quả cho tính hồi quy tuyến tính

Nồng độ mặn từ kết quả chạy mô hình cho các điểm dọc sông từ cửa biển đến khoảng 6km được sử dụng để trích xuất. Trên sơ đồ tính sẽ trích xuất kết quả theo các điểm có tọa độ theo mặt bằng, gồm có các mặt cắt MC0, MC3, MC4 và các điểm P1-5 nằm giữa MC3 và MC4 (Bảng 2-8). Các kết quả này sẽ được trích xuất theo bước thời gian 1 giờ cho năm 2018, để tính tương quan với các yếu tố xem xét trong nghiên cứu trong chương kết quả. Phân tích hồi quy tuyến tính được chia làm hai giai đoạn: mùa khô (Tháng 2-7) và mùa mưa (Tháng 1-12) để xem xét các mối quan hệ và mức độ tương quan của các yếu tố trong từng mùa (Hình 2-18).

Bảng 2-8. Tọa độ và độ sâu các điểm trích xuất kết quả

Ký hiệu	X	Y	Độ sâu (Z)
MC0	274620,19	1669771,88	-5,38
MC3	274439,7	1669320,14	-8,67
P1	273874,4979	1668709,156	-13,66
P2	273188,9927	1668366,403	-13,67
P3	273017,6164	1667355,283	-13,68
P4	273274,6809	1666378,438	-13,65
P5	272212,1479	1665984,273	-13,68
MC4	271450,51	1664752,09	-12,17



Hình 2-18 Sơ họa tuyến trích xuất kết quả dọc nhánh sông Vệ.

2.6 Mô hình tính toán hệ số phân tầng

Theo [11] để xác định cơ chế dòng chảy tại vùng cửa sông ven biển người ta phân thành 3 loại: xáo trộn hoàn toàn - Loại I (không phân tầng hoặc phân tầng yếu); xáo trộn bán phần - Loại II (phân tầng trung bình); xáo trộn yếu - Loại III (phân tầng mạnh hay hình thành các nêm muối). Ba loại pha trộn dọc và phân tầng nước này được xác định trong khu vực trộn nước sông và biển [11]. Theo đó, tham số phân tầng n được xác định theo công thức giải tích như sau:

$$n = \frac{\Delta S}{S_m} = \frac{S_{bot} - S_{surf}}{0,5(S_{bot} + S_{surf})} \quad (2.14)$$

Trong đó:

- ΔS : Độ chênh lệch nồng độ mặn theo chiều đứng
- S_m : Độ mặn trung bình
- S_{bot} và S_{surf} độ mặn tại tầng đáy và tầng mặt

Xáo trộn mạnh và phân tầng yếu tương ứng với $n < 0,1$ (Loại I); Xáo trộn một phần và phân tầng trung bình, khi n thay đổi từ 0,1 đến 1,0 (Loại II); Xáo trộn yếu và phân tầng mạnh, nêm muối khi n thay đổi từ 1,0 đến 2,0 (Loại III). Giá trị n không bao giờ vượt quá 2,0 [11].

Trong khuôn khổ thực hiện luận án này, nghiên cứu sinh đã thực hiện đo mặn tại 3 mặt cắt MC0, MC3 và MC4 (Hình 1-2, Bảng 2-8) theo 3 độ sâu : mặt, giữa và đáy. Kết quả khá tương đồng về mặt không gian và đặc tính phân tầng (phân tầng mạnh, yếu hoặc không phân tầng). Điều này cho phép dùng tham số n để sơ bộ xác định đặc tính phân tầng cho sông Vệ. Cùng với ứng dụng MIKE 3, tham số n cho phép khẳng định sự phân tầng cùng với sự xuất hiện nêm mặn cho vùng cửa sông Vệ.

Kết luận chương

Các nội dung chính của chương gồm:

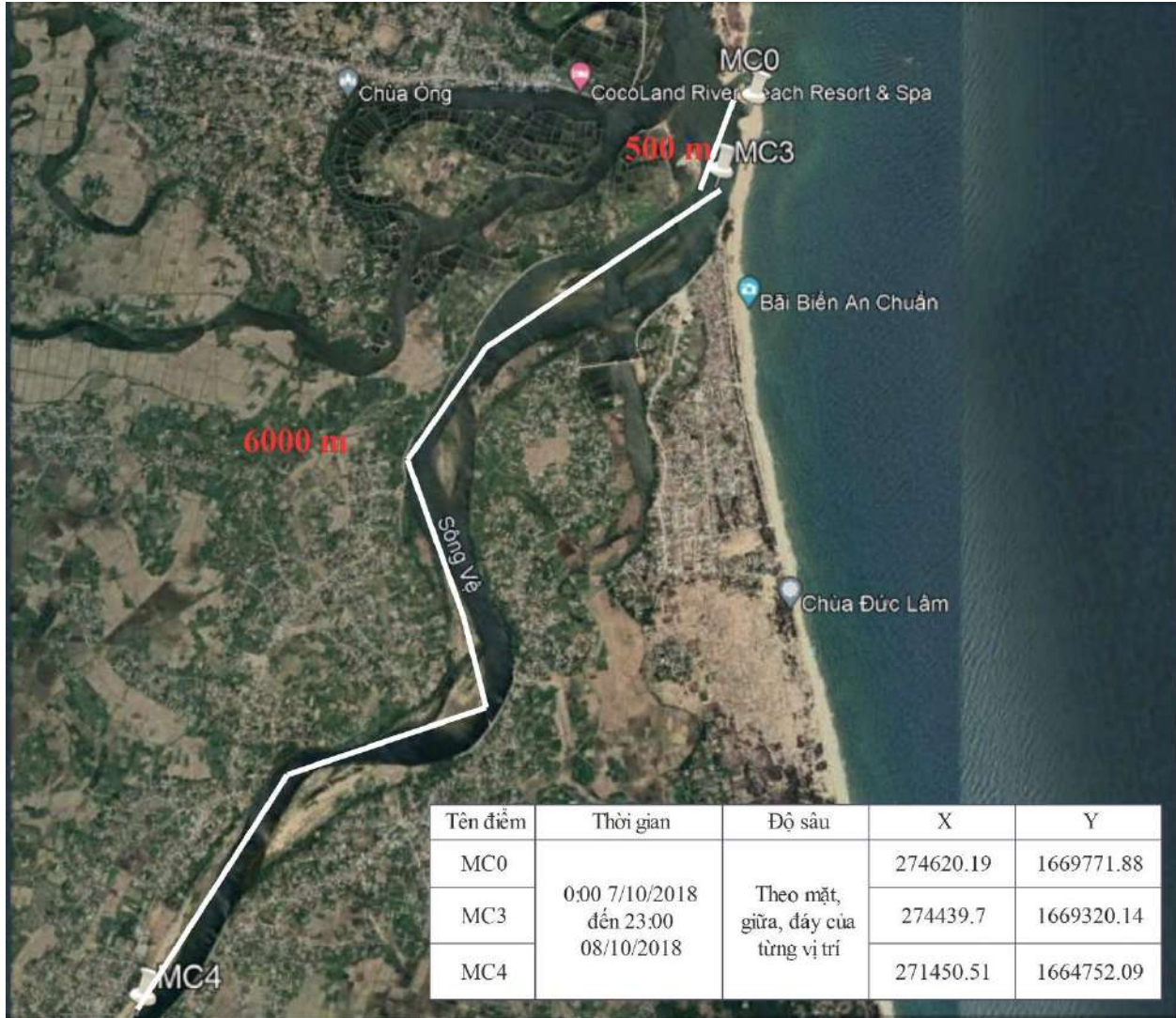
- Trình bày cơ sở mô hình giải tích tính toán tham số phân tầng n dựa trên bộ số liệu quan trắc do nghiên cứu sinh thực hiện. Công thức này đã được nghiên cứu từ khía cạnh thực nghiệm cho nhiều cửa sông điển hình. Tại Việt Nam, công thức này cũng đã được nghiên cứu áp dụng cho Đồng Bằng Sông Cửu Long.
- Đưa ra sự lựa chọn phương án phân tích cơ chế xâm nhập mặn trong luận án. Phân tích cơ chế xâm nhập mặn được thực hiện theo 2 mùa khô (tháng 2 – tháng 7), mùa mưa (tháng 8 – tháng 1). Bản đồ phân tầng trung bình theo mùa được xây dựng trong chương 3. Để đánh giá phạm vi truyền, đã chọn là phân tích theo thời kỳ triều cao, triều thấp, đỉnh triều, chân triều của ngày kiệt nhất trong mùa khô, cũng như ngày có lũ trong mùa mưa.
- Lựa chọn phương án phân tích cơ chế truyền mặn cho kịch bản BĐKH cho ngày kiệt nhất trong mùa khô. Kết quả này được so sánh với kịch bản hiện trạng để đánh giá tác động của BĐKH tới truyền mặn cho cửa sông Vệ.
- Lựa chọn tuyến để phân tích gồm: theo phương đứng và theo mặt cắt ngang. Theo phương đứng nghiên cứu sinh chọn 3 tuyến: bờ trái, tim sông và bờ phải. Tám vị trí cho mặt cắt ngang được lựa chọn. Để có cơ sở đánh giá, so sánh đặc điểm nêm mặn,

sự biến đổi hình dạng, độ dịch chuyển nệm mặ̣n trong các thời kỳ triều, các thời điệ̉m triều đặc trưng trong mỗi con triều, đường đặ̉ng trị mặ̣n có nồng độ 1‰ được lựa chọn.

- Trình bày nội dung và các bước xây dựng bộ thông số mưa và bốc hơi cho kịch bản BĐKH, phạm vi lưu vực sông Vệ. Bộ thông số này được áp dụng để tính lưu lượng dòng chảy cho kịch bản BĐKH 2035 sông Vệ.
- Trình bày kết quả thiết lập được mô hình tính toán, trong đó mô tả chi tiết sơ đồ tính, số liệu đầu vào, các thông số mô hình, kết quả hiệu chỉnh mô hình.
- Cuối cùng, khung nghiên cứu được đưa vào cuối chương 2 để làm rõ mối quan hệ giữa các nội dung, mô hình, thứ tự các bước cần thực hiện để đạt được mục tiêu.

CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Kết quả tính toán tham số phân tầng



Hình 3-1. Sơ đồ bố trí các điểm khảo sát dọc sông Vệ.

Nghiên cứu sinh thực hiện thu thập số liệu đo mặn tại hiện trường. Công tác đo mặn được thực hiện liên tục 24/24 theo chiều sâu và dọc theo nhánh sông Vệ vào hai ngày 7 – 8/10/2018, Phụ lục 1. Các kết quả này là cơ sở để tính toán thông số n theo công thức (2.14) tại các vị trí đo dọc theo sông, và được thể hiện trên các Bảng 3-1 – Bảng 3-3, Hình 3-1 và Phụ lục.

a) Kết quả tính toán tham số n tại MC0

Bảng 3-1. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC0

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 0:00	13,6	0,580	13,020	1,836	III	08/10/2018 0:00	12,2	0,520	11,68	1,836	III
07/10/2018 1:00	15,7	0,870	14,83	1,790	III	08/10/2018 1:00	4,510	0,464	4,046	1,627	III
07/10/2018 2:00	16,6	1,028	15,572	1,767	III	08/10/2018 2:00	3,980	0,446	3,534	1,597	III
07/10/2018 3:00	18,7	1,19	17,51	1,761	III	08/10/2018 3:00	10,2	0,610	9,59	1,774	III

b) Kết quả tính toán tham số n tại MC3

Bảng 3-2. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC3

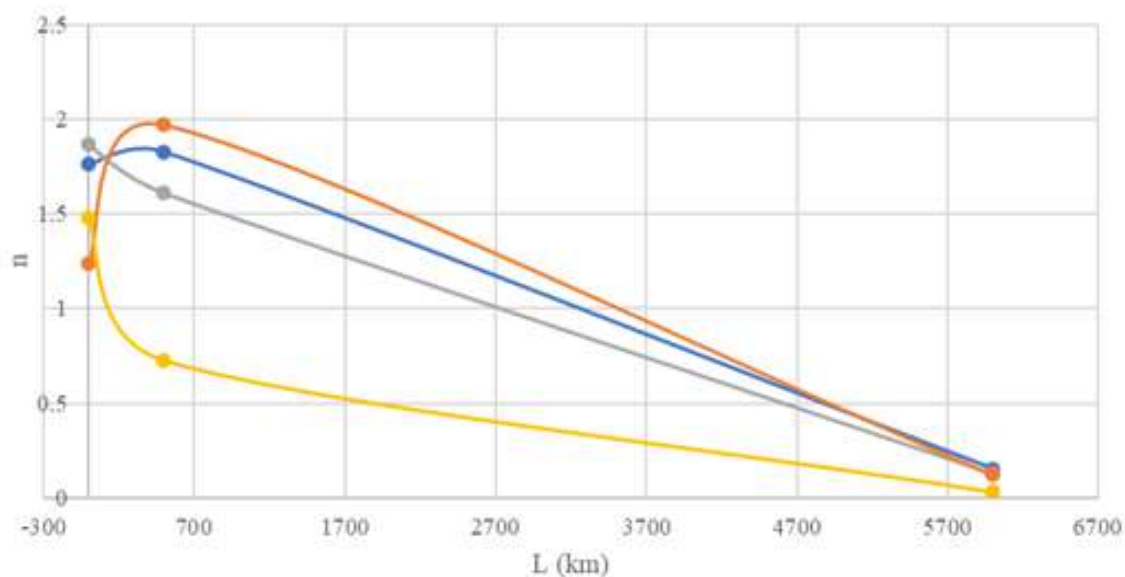
Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 0:00	3,700	1,300	2,4	0,960	II	08/10/2018 0:00	23,0	0,431	22,569	1,926	III
07/10/2018 1:00	23,5	1,478	22,022	1,763	III	08/10/2018 1:00	15,7	0,491	15,209	1,879	III
07/10/2018 2:00	17,1	0,660	16,44	1,851	III	08/10/2018 2:00	17,1	0,660	16,44	1,851	III
07/10/2018 3:00	12,1	0,540	11,56	1,829	III	08/10/2018 3:00	12,1	0,540	11,56	1,829	III

c) Kết quả tính toán tham số n tại MC4

Bảng 3-3. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC4

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 0:00	0,041	0,031	0,01	0,278	II	08/10/2018 0:00	0,033	0,034	-0,001	-0,03	I
07/10/2018 1:00	0,035	0,03	0,005	0,154	II	08/10/2018 1:00	0,035	0,033	0,002	0,059	I
07/10/2018 2:00	0,04	0,03	0,01	0,286	II	08/10/2018 2:00	0,034	0,033	0,001	0,030	I
07/10/2018 3:00	0,035	0,03	0,005	0,154	II	08/10/2018 3:00	0,035	0,033	0,002	0,059	I

Ngày 7/10/2018

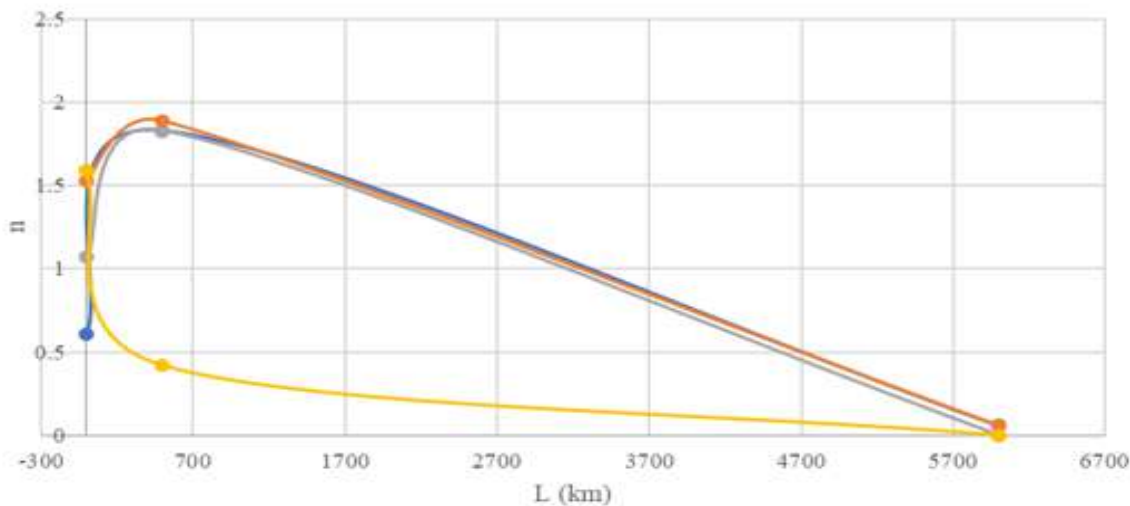


Biển

— Thời kỳ triều thấp - Chân triều — Thời kỳ triều thấp - Đỉnh triều
— Thời kỳ triều cao - Chân triều — Thời kỳ triều cao - Đỉnh triều

Hình 3-2. Quan hệ n và L thời điểm chân - đỉnh triều thời kỳ triều cao - thấp, ngày 07/10/2018

Ngày 8/10/2018



Biển

— Thời kỳ triều thấp - Chân triều — Thời kỳ triều thấp - Đỉnh triều
— Thời kỳ triều cao - Chân triều — Thời kỳ triều cao - Đỉnh triều

Hình 3-3. Quan hệ n và L thời điểm chân - đỉnh triều thời kỳ triều cao - thấp, ngày 08/10/2018

Từ kết quả tính toán cho thấy sông Vệ diễn ra hiện tượng phân tầng mạnh tại các vị trí cửa sông – biển, trong đó L là khoảng cách từ mốc cửa sông tới vị trí xác định

trong đất liền. Đến vị trí MC4, cách 6km từ cửa sông, mặn không còn phân tầng và ổn định. Thời điểm chân triều và đỉnh triều có quy luật trái ngược nhau, chân triều có xu thế tăng dần từ cửa sông lên thượng lưu, thời điểm đỉnh triều thì ngược lại. Thời điểm chân - đỉnh triều của thời kỳ triều thấp và chân triều thời kỳ triều cao hiện tượng phân tầng ở mức mạnh trở lên, tuy nhiên thời điểm đỉnh triều của thời kỳ triều cao hiện tượng phân tầng từ trung bình cho đến mạnh, nhưng vẫn nhỏ hơn ở các thời điểm được liệt kê ở trên. Kết quả tính hệ số n phản ánh đúng bản chất về mặt lý thuyết là khi thủy triều xuống dòng chảy sông mạnh sẽ làm hiện tượng phân tầng diễn ra mạnh hơn. Đồng thời, hiện tượng phân tầng ở MC3 diễn ra mạnh mẽ hơn MC0 do mặt cắt MC3 chịu tác động nhiều hơn của dòng chảy sông. Ngày 08/10/2018, các xu thế của hiện tượng phân tầng tương đồng với ngày 7/10/2018, nhưng giá trị tham số n có phần nhỏ hơn (Bảng 3-1, Bảng 3-2, Bảng 3-3).

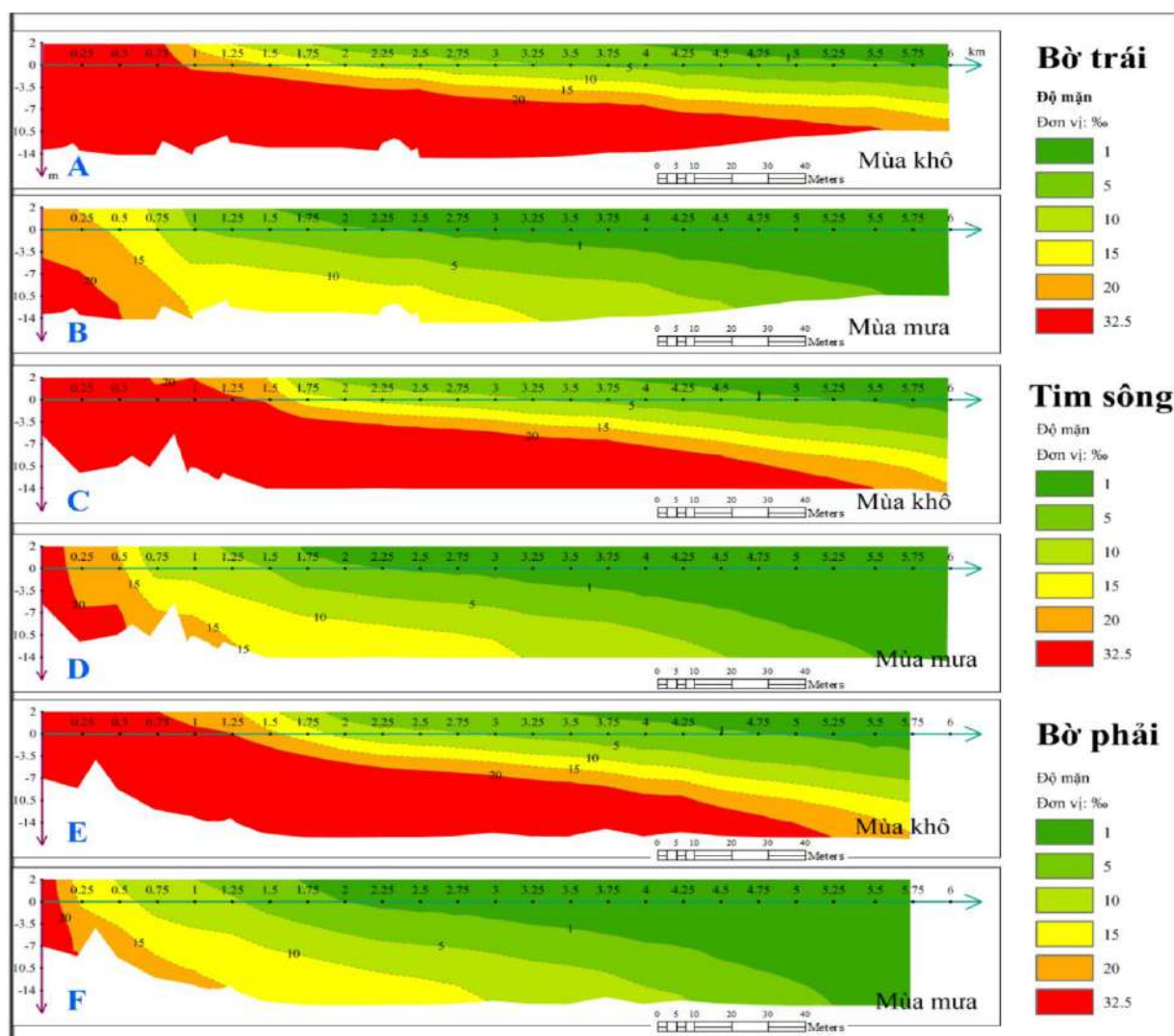
Kết quả tính toán tham số n để xác định cơ chế phân tầng vùng cửa sông Vệ dựa trên số liệu thực đo trong 2 ngày 7 và 8 tháng 10 năm 2018 cho thấy hiện tượng phân tầng xảy ra trong cả hai trường hợp triều lên và triều xuống (Hình 3-2, Hình 3-3). Mặc dù kết quả thực đo còn hạn chế nên việc đánh giá chưa bao trùm được diễn biến về xâm nhập mặn, đặc tính phân tầng, nhưng bước đầu khẳng định tại vùng cửa sông Vệ có xảy ra hiện tượng phân tầng. Kết quả tính toán bằng mô hình MIKE 3 đã chỉ ra có thời điểm phân tầng mạnh và hình thành nêm muối, sẽ được phân tích trong phần trình bày tiếp theo.

3.2 Kết quả phân tích sự phân tầng mặn vùng cửa sông Vệ

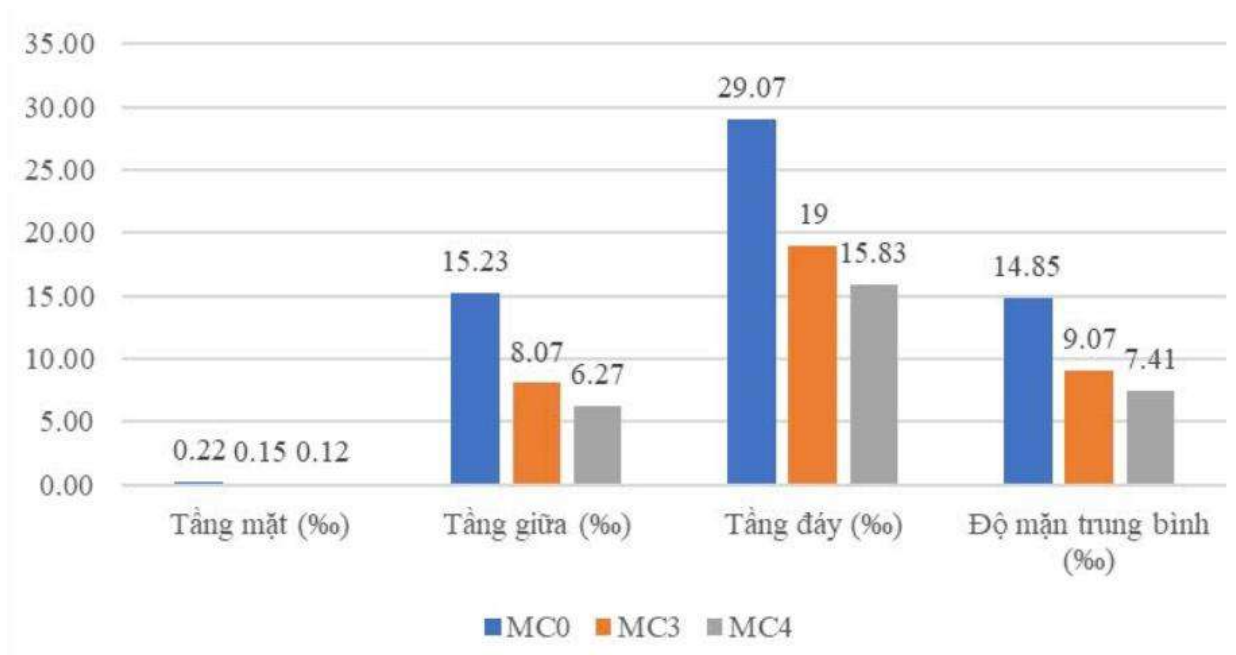
3.2.1. Phân tích nêm mặn theo mùa năm 2018

Dựa trên kết quả chạy MIKE 3 cho các tháng mùa khô (tháng 2 – tháng 7), bản đồ truyền mặn vào mùa khô năm 2018 được xây dựng và thể hiện trên Hình 3-4.a, c, e, Hình 3-5, Bảng 3-4. Mặn vào mùa khô xâm nhập vào nhánh sông theo cơ chế từ đáy sông. Theo từng độ sâu, độ mặn có sự chênh lệch đáng kể. Tính theo mốc 1‰, trên bề mặt bờ trái mặn truyền được 3,75 km nhưng ở đáy có thể thấy đến 6 km độ mặn vẫn còn ở mức 15‰ (Hình 3-4.a); Tương tự, trên bề mặt tim sông mặn truyền được 3,5 km nhưng mặn ở đáy đến 6km vẫn còn 15‰ (Hình 3-4.c); Bờ phải của sông Vệ cũng ra kết

quả tương tự, trên bề mặt mặn truyền được 3,3km thì còn 1‰, nhưng dưới đáy đến 6km vẫn còn 15‰ (Hình 3-4.e). Phạm vi truyền mặn với bờ trái, tim sông và bờ phải vào mùa khô chênh lệch không đáng kể, dao động trong khoảng 200-250m, nhưng mặn ở bờ trái truyền sâu hơn vào sông so với bờ phải và tim sông. Có thể nói, vào mùa khô, phạm vi truyền mặn giảm dần từ bờ trái qua bờ phải.



Hình 3-4. Bản đồ truyền mặn theo mùa năm 2018 theo mặt cắt dọc sông



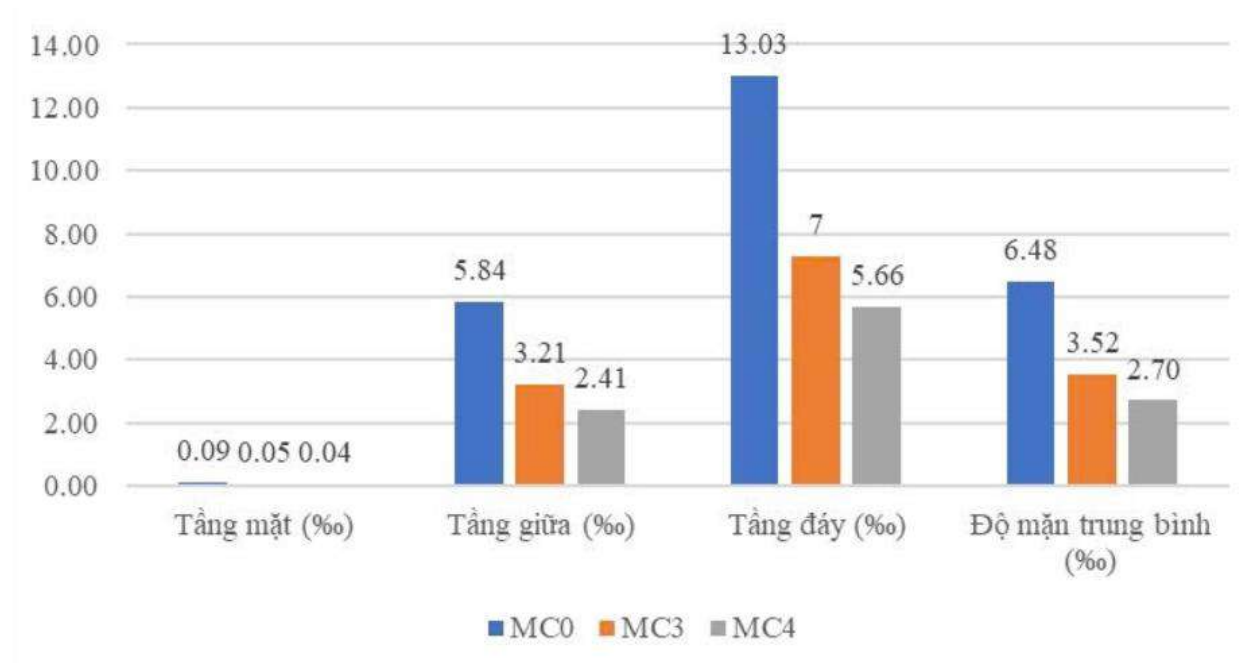
Hình 3-5. Biểu độ độ mặn trung bình mùa khô 2018

Bảng 3-4. Phân bố mặn trung bình mùa khô 2018

Mặt cắt	Vị trí ngang sông	Tầng mặt (%)	Tầng giữa (%)	Tầng đáy (%)	Độ mặn trung bình (%)
MC0	Bờ trái	0,204	12,5	25,7	~12,82
	Tim sông	0,223	15,6	28,9	~14,91
	Bờ phải	0,233	17,6	32,6	~16,81
MC3	Bờ trái	0,144	6,4	16,3	~7,61
	Tim sông	0,153	8,3	19,0	~9,15
	Bờ phải	0,163	9,5	21,7	~10,45
MC4	Bờ trái	0,113	4,9	13,6	~6,21
	Tim sông	0,123	6,6	15,9	~7,54
	Bờ phải	0,133	7,3	18,0	~8,47

Dữ liệu trung bình 6 tháng (tháng 8 – tháng 1 mặn truyền được 1,5 km, trong khi đó dưới đáy truyền tới 5,6km (Hình 3-4.b); Tương tự, trên bề mặt tim sông mặn truyền được 1,75km, mặn tiếp tục truyền phía đáy s) được dùng để xây dựng bản đồ xâm nhập mặn mùa mưa năm 2018 (Hình 3-4.b, d, f), Hình 3-5, Bảng 3-5. Vào mùa mưa, mặn truyền tương tự như mùa khô, từ dưới đáy đi vào sông, độ mặn phân tầng và có sự chênh lệch đáng kể theo độ sâu. Tính theo mốc 1‰, trên bề mặt bờ trái ông đến 5,5km (Hình 3-4.d); Bờ phải của sông Vệ cũng ra kết quả tương tự, trên bề mặt mặn truyền được 1,8 km thì còn 1‰, còn dưới đáy truyền đến 5,25km (Hình 3-4.f). Sự chênh lệch giữa phạm

vi truyền mặn với bờ trái, tim sông và bờ phải vào mùa mưa lớn hơn so với mùa khô, dao động trong khoảng 50-200m và trái ngược hoàn toàn so với mùa khô. Trên lớp bề mặt sông, độ mặn tăng dần từ trái qua phải nhưng dưới đáy lại giảm dần từ trái qua phải.



Hình 3-6. Biểu đồ độ mặn trung bình mùa mưa 2018

Bảng 3-5. Phân bố mặn trung bình mùa mưa 2018

Mặt cắt	Vị trí ngang sông	Tầng mặt (%)	Tầng giữa (%)	Tầng đáy (%)	Độ mặn trung bình (%)
MC0	Bờ trái	0,077	4,47	10,83	~5,61
	Tim sông	0,087	6,13	13,33	~6,52
	Bờ phải	0,097	6,93	14,93	~7,32
MC3	Bờ trái	0,037	2,07	5,63	~2,58
	Tim sông	0,047	3,43	7,23	~3,57
	Bờ phải	0,057	4,13	9,03	~4,41
MC4	Bờ trái	0,027	1,47	4,07	~1,85
	Tim sông	0,037	2,53	5,77	~2,79
	Bờ phải	0,047	3,23	7,13	~3,47

3.2.2. Phân tích mặn theo thời kỳ dọc theo tuyến sông

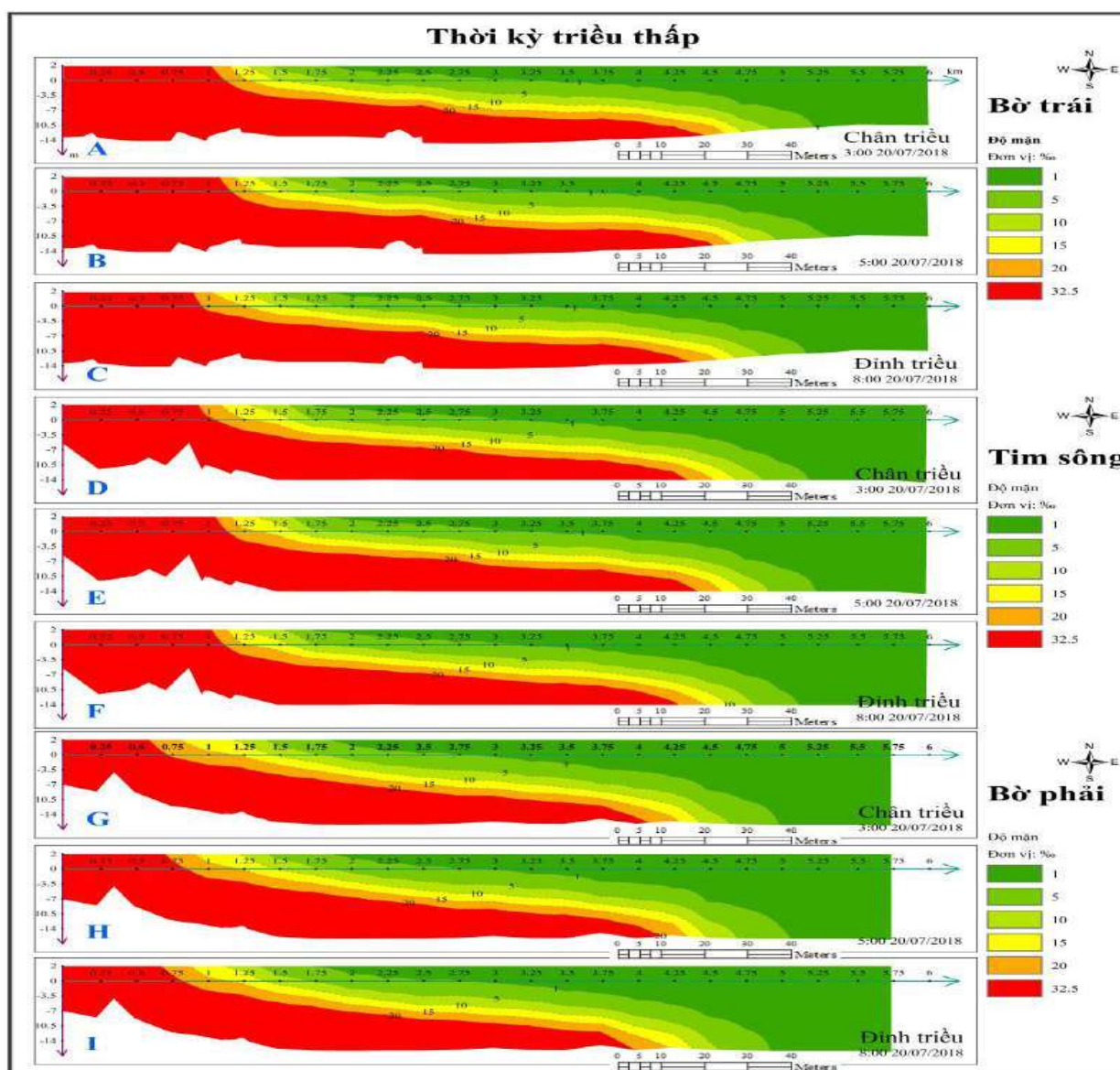
Thời kỳ triều thấp

Hai thời điểm chân triều và đỉnh triều trong thời kỳ triều thấp, đường đẳng trị mặn của nêm mặn có xu hướng dốc ở cửa sông vào 1,25km ở bờ trái, 1km ở tim sông

và 500m ở bờ phải, khi đi vào nhánh sông, đường đẳng trị mặn khá thoải (Hình 3-7). Vì vậy, phạm vi truyền mặn giảm dần từ bờ trái qua bờ phải. Cụ thể, thời điểm chân triều lúc 3 giờ, tính từ bề mặt sông bờ trái mặn truyền vào 1,8km (Hình 3-7.a), tim sông truyền được 1,7km (Hình 3-7.d) và bờ phải truyền được 1,75km (Hình 3-7.g); tính từ đáy phạm vi truyền mặn lần lượt là 5,25 km, 5,25km, 5km;

Cả tầng đáy và tầng mặt trên bờ trái đều có xu thế xâm nhập sâu hơn vào lòng sông so với tim sông và bờ phải, do dòng chảy từ biển vào sông bên bờ trái lớn hơn. Kết quả cho thấy dòng chảy từ biển vào sông lớn tạo ra các nêm mặn ở khoảng 200-300m. Các nêm mặn này sẽ dần biến mất khi qua bờ phải của nhánh sông. Các nêm mặn hình thành do hai dòng nước từ sông và biển, gây xáo trộn mặn ở vị trí cửa sông, dòng chảy càng lớn, sự xáo trộn này diễn ra càng mạnh mẽ.

Thời điểm đỉnh triều của thời kỳ triều thấp trong ngày 20/07/2018 rơi vào lúc 8 giờ. Hình dáng các đường đẳng trị mặn và phạm vi truyền mặn tương tự với thời điểm chân triều. Tuy nhiên, phạm vi truyền mặn có phần nhỏ hơn khoảng 50m, cụ thể, tính từ bề mặt sông bờ trái mặn truyền vào 1,8km (Hình 3-7.c), tim sông truyền được 1,75km (Hình 3-7.f) và bờ phải truyền được 1,75km; tính từ đáy phạm vi truyền mặn lần lượt là 5,2 km, 5,2 km, 5km;



Hình 3-7. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều thấp thời điểm theo tuyến.

Mức nước thời điểm chân triều và đỉnh triều trong thời kỳ triều thấp chênh lệch nhau chỉ 0,20m nên sự khác biệt giữa hai thời điểm này không cao. Tuy nhiên, thời điểm đỉnh triều, phạm vi truyền mặn và dòng chảy từ biển nhỏ hơn thời điểm chân triều. Phạm vi truyền mặn tại khu vực nghiên cứu thời kỳ triều thấp ngày 20/07/2018 dao động trong khoảng 1,7 – 1,8 km tính từ bề mặt, 5 – 5,25 km tính từ đáy.

Thời kỳ triều cao

Vào thời kỳ triều cao, thời điểm chân triều, mực nước chân triều xuống tới mức 0,6 m. Tại bề mặt phía bờ trái mặn truyền được 1,7km (Hình 3-8.a); mặn vẫn ổn định và truyền được 1,7km ở tim sông (Hình 3-8.d); trên bề mặt bờ phải thì tăng lên 1,75km

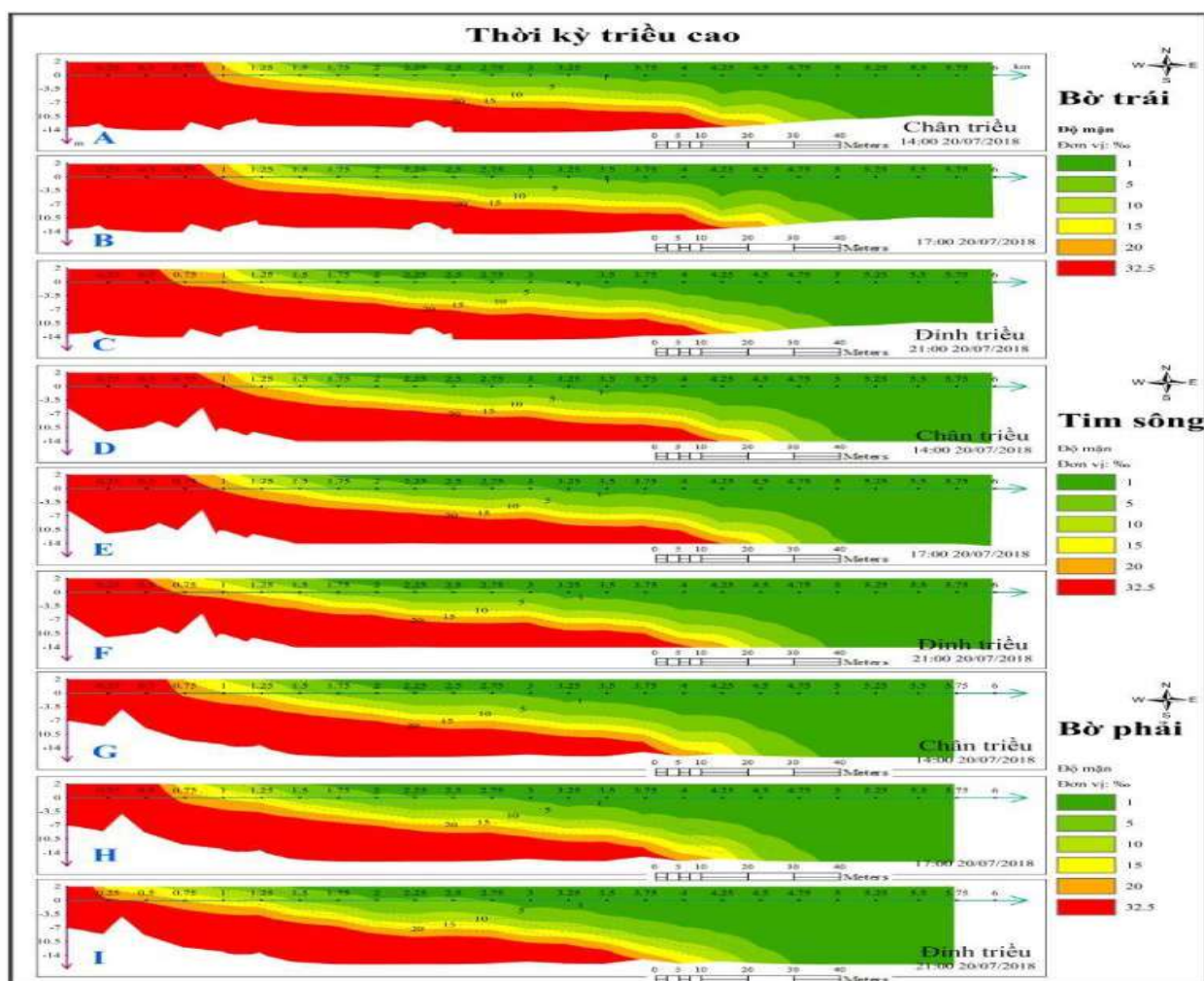
(Hình 3-8.g), tính từ đáy phạm vi truyền mặn lần lượt là 5,2km; 5,1km; 4,9km. Tương tự với thời điểm chân triều của thời kỳ triều thấp, thời điểm chân triều của thời kỳ triều cao mặn vẫn giảm dần từ bờ trái qua bờ phải.

Thời điểm chân triều và đỉnh triều trong thời kỳ triều cao, các đường đẳng trị mặn của nêm mặn có sự khác nhau rõ rệt, có xu hướng dốc ở cửa sông vào 1km ở bờ trái, 0,9km ở tim sông và 0,5km ở bờ phải, khi đi vào nhánh sông, đường đẳng trị mặn lại khá thoải (Hình 3-8). Độ dốc của đường đẳng trị mặn phản ánh phạm vi truyền mặn của từng vị trí trên nhánh sông,

Tại lớp bề mặt thời điểm đỉnh triều thời kỳ triều cao tại bờ trái truyền được 1,5km (Hình 3-8.c); đến tim sông tăng lên 1,6km (Hình 3-8.f); bờ phải đã tăng lên 1,75km (Hình 3-8.i); Kết quả lần lượt cho tầng đáy là 5km; 5km; 4,75km.

Thời điểm đỉnh triều, thời kỳ triều cao mực nước lên tới 1,17m, làm cho bức tranh truyền mặn có sự thay đổi so với các thời điểm trước đó, mặn không còn giảm dần từ bờ trái qua bờ phải, mà tăng dần từ trái qua phải khi tính từ bề mặt, giảm dần từ trái qua phải tính từ đáy sông. Sở dĩ có sự khác biệt này là do sự xuất hiện các đường nêm mặn. Độ dốc đường đẳng trị mặn nhỏ hơn hẳn so với các thời điểm trước, cụ thể 0,5 km từ bờ trái, tim sông chỉ còn 0,25km; và 0,25 km tại bờ phải (Hình 3-8), phạm vi truyền mặn giảm là hợp lý

Phạm vi truyền mặn trong thời kỳ triều cao dao động trong khoảng 1,5 - 1,75 km trên lớp bề mặt và 4,75 – 5,2km lớp đáy. Kết quả này cho thấy không chênh lệch đáng kể so với thời kỳ triều thấp tại khu vực nghiên cứu. Một số kết luận được rút ra như sau, thứ nhất, do chiều sâu ở cửa sông nông, cao, có thể ngăn mặn, ít bị ảnh hưởng của thủy triều. Thứ hai, do mực nước, chế độ triều ở khu vực nghiên cứu lại không có quá nhiều biến động, mực nước lúc chân triều không quá thấp, thời điểm đỉnh triều lại không quá cao nên không tạo ra sự khác biệt.



Hình 3-8. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều cao thời điểm chân triều theo tuyến.

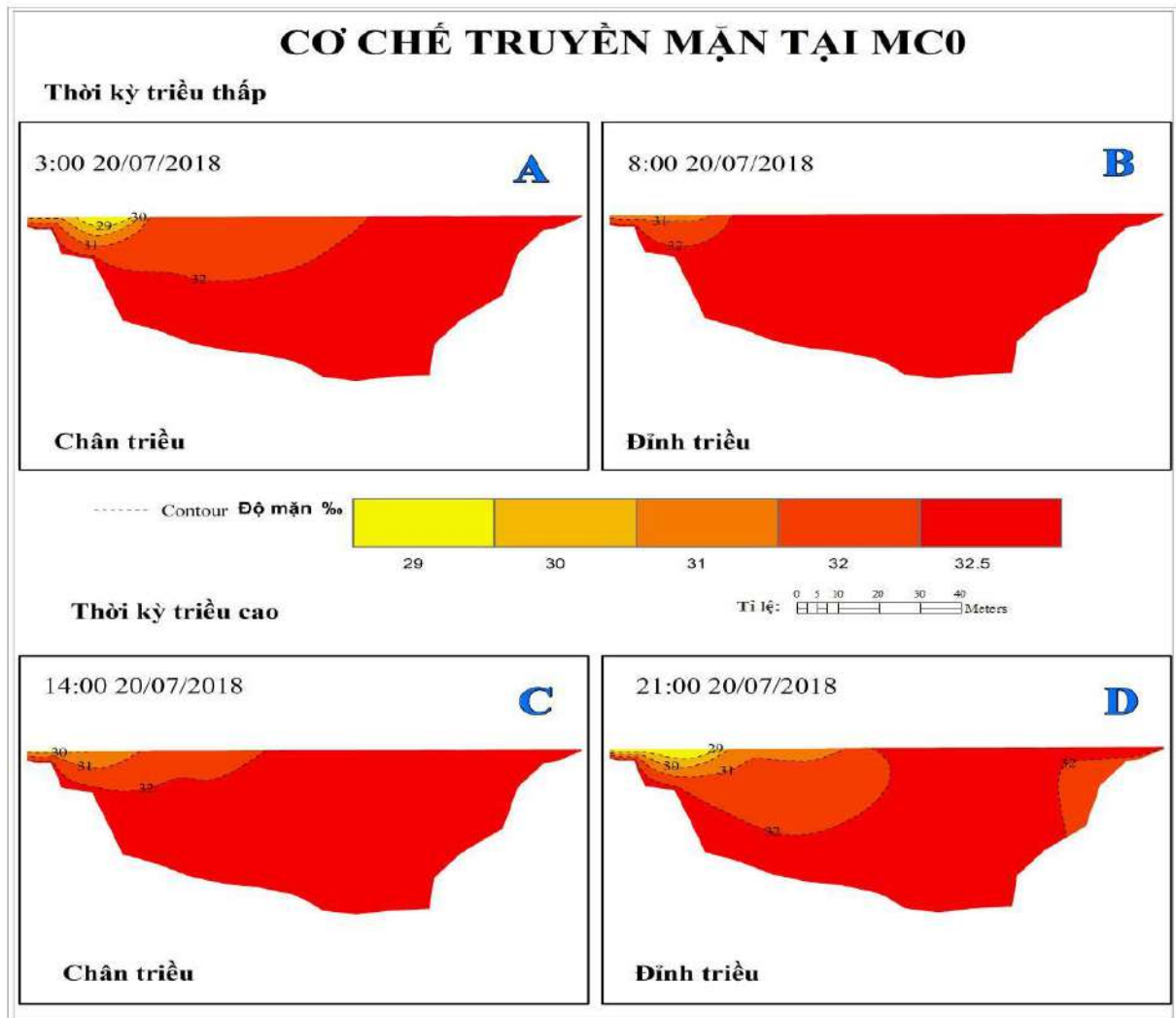
Như vậy sự phân tầng theo thời điểm triều được thể hiện có sự khác nhau. Khi triều lên, nước biển xâm nhập mạnh làm tầng đáy có độ mặn cao. Trong khi đó tầng mặt vẫn có dòng chảy ngọt, tạo mặt phân cách rõ rệt. Lúc triều xuống, dòng chảy ngọt chiếm ưu thế, tầng mặt mở rộng. Trong khi tầng đáy vẫn giữ mặn, phân tầng vẫn tồn tại nhưng nêm mặn thu gọn lại Bảng 3-6.

Bảng 3-6. Xu thế truyền mặn lúc chân triều và đỉnh triều

Thời điểm	Vị trí ngang sông	Tầng mặt (km)	Tầng đáy (km)	Ghi chú
Chân triều	Bờ trái	~1,80	~5,25	Truyền mạnh nhất, lệch về phía trái
	Tim sông	~1,70–1,75	~5,25	Phân tầng sâu, truyền tương đương với phía bờ trái

	Bờ phải	~1,75	~5,00	Truyền yếu hơn, nêm mặn có xu thế thu lại nhẹ.
Đỉnh triều	Bờ trái	~1,80	~5,20	Truyền giảm nhẹ, đường phân cách mặn/ngọt dốc ít hơn
	Tim sông	~1,75	~5,20	Truyền tương đương chân triều
	Bờ phải	~1,75	~5,00	Ít thay đổi so với chân triều

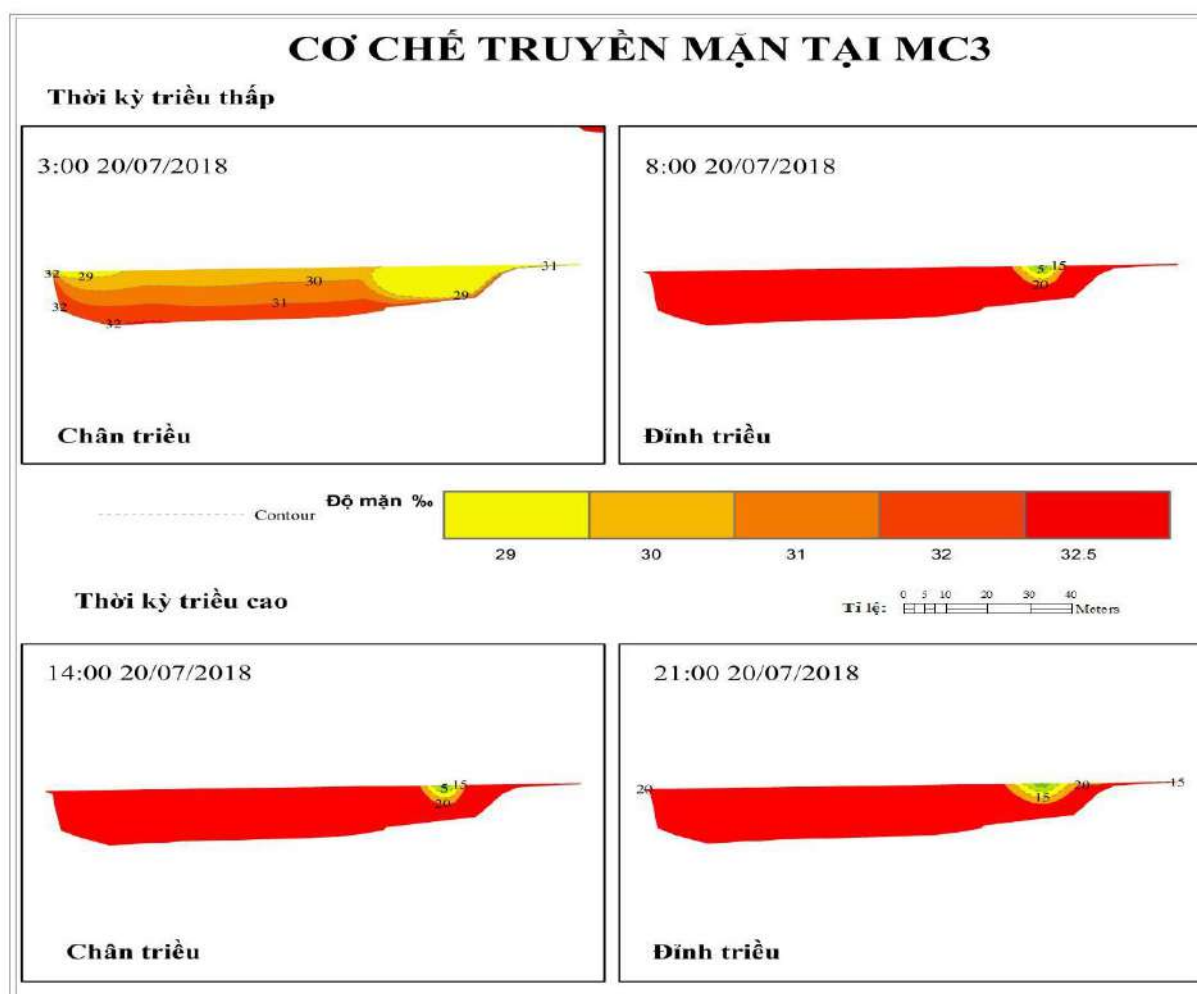
3.2.3. Phân tích truyền mặn theo mặt cắt ngang trong từng thời kỳ



Hình 3-9. Cơ chế truyền mặn theo mặt cắt ngang tại MC0

Tại mặt cắt ngay cửa sông, độ mặn tăng dần từ trái qua phải, các thời điểm chân triều và đỉnh triều của hai thời kỳ triều không có nhiều biến động (Hình 3-9.A - D). Tại lớp nước bề mặt (khoảng 40-50% chiều sâu của mặt cắt) nồng độ mặn phía sát bờ trái có xu thế nhỏ hơn có thể do sự xáo trộn của dòng chảy. Đường đẳng trị mặn không có

xu thế cong theo hình dáng của mặt cắt ngang mà có sự biến động trên bề mặt còn dưới đáy thì ổn định, không bị ảnh hưởng bởi dòng chảy.



Hình 3-10. Cơ chế truyền mặn tại mặt cắt ngang MC3

Tại mặt cắt MC3, độ mặn giảm dần từ trái qua phải, ngược với mặt cắt MC0 (Hình 3-10). Tại vị trí này, phân bố mặn trên mặt cắt ngang có sự khác nhau vào các thời điểm chân triều và đỉnh triều của hai thời kỳ triều. Thời kỳ triều thấp, đường đẳng trị mặn phân tầng cong theo hình dáng mặt cắt ngang (3:00 và 8:00 ngày 20/07/2018). Hình 3-10.a, b. Đến thời kỳ triều cao, độ mặn giảm dần trên bờ phải nhưng vẫn phân tầng theo hình dạng mặt cắt, đỉnh cong hướng xuống đáy (Hình 3-10.c, d). Có thể thấy tại MC3 sự phân tầng mặn phụ thuộc vào mực nước. Ví dụ, chân triều thời kỳ triều thấp (Hình 3-10.a) sự phân tầng rõ rệt do dòng chảy xáo trộn. Tuy nhiên, các thời điểm có mực nước cao hơn, mặn ổn định và hầu như không phân tầng nhiều.

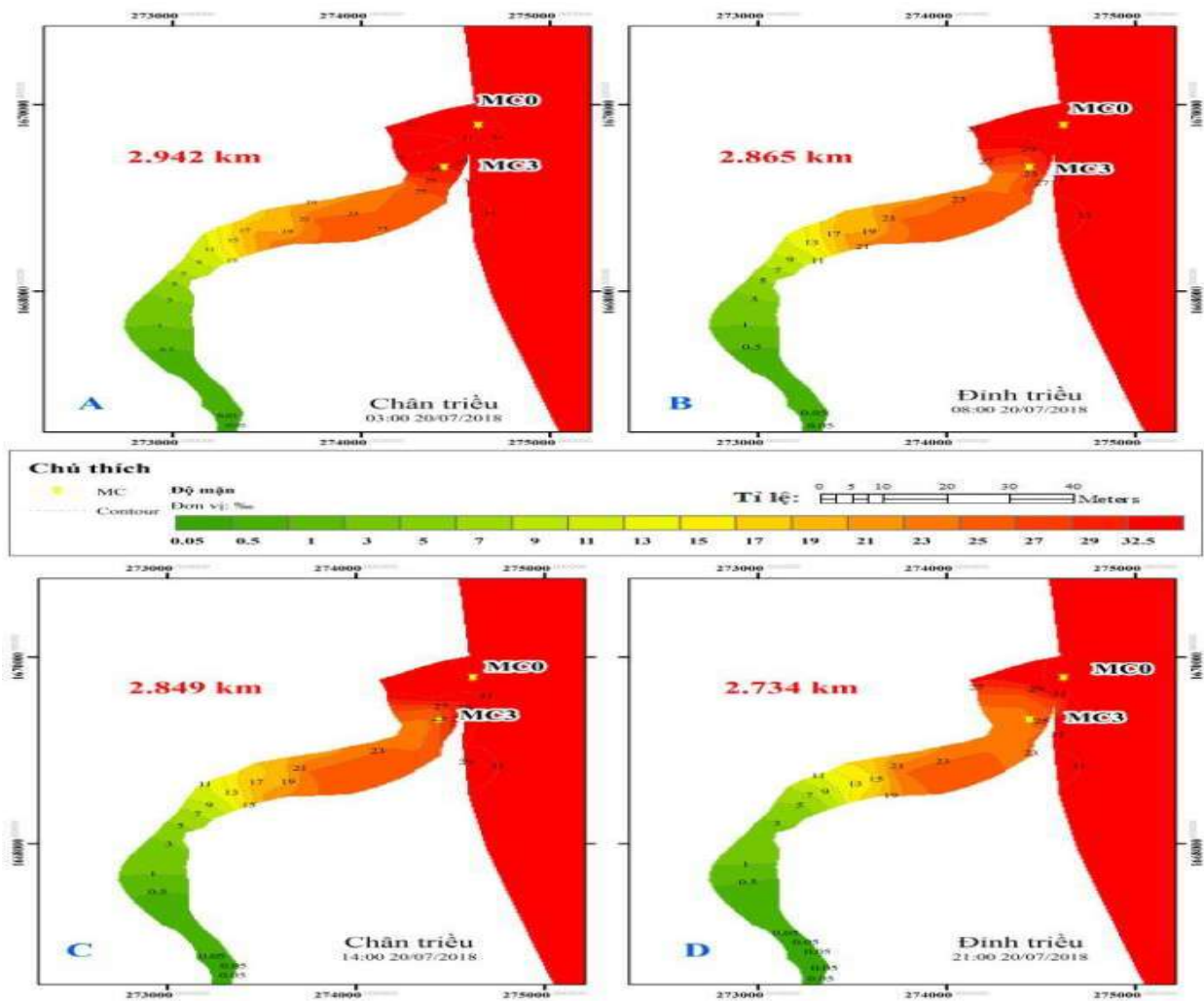
Từ kết quả phân tích trên mặt cắt ngang cho thấy phân tầng trên mặt cắt ngang tương đồng với trục dọc sông. Thời kỳ triều thấp phân tầng mạnh mẽ hơn thời kỳ triều cao, chân triều phân tầng mạnh mẽ hơn đỉnh triều. Tại mặt cắt ngang MC0 mặn tăng dần từ trái qua phải, tại MC3 mặn giảm dần từ trái qua phải.

Bảng 3-7. Xu thế truyền mặn theo mặt cắt ngang lúc triều thấp và triều cao.

Thời kỳ	Thời điểm	Loại triều	Mặt cắt	Xu hướng độ mặn ngang sông	Phân tầng độ mặn	Ghi chú
Triều thấp	03:00	Chân triều	MC0	Tăng từ trái → phải	Tầng mặt biến động, tầng đáy ổn định	Nêm mặn phát triển mạnh nhất
Triều thấp	08:00	Đỉnh triều	MC0	Tăng từ trái → phải	Tầng mặt biến động nhẹ, đáy ổn định	Lan mặn co nhẹ, đường mặn ít cong
Triều cao	14:00	Chân triều	MC0	Tăng từ trái → phải	Tầng mặt biến động, đáy ổn định	Mặn giảm nhẹ so với triều thấp
Triều cao	21:00	Đỉnh triều	MC0	Tăng từ trái → phải	Tầng mặt biến động, đáy ổn định	Lan mặn ngắn nhất trong chu kỳ
Triều thấp	03:00	Chân triều	MC3	Giảm từ trái → phải	Phân tầng rõ, đường mặn cong theo đáy	Mặn lệch trái, tầng đáy giữ mặn cao
Triều thấp	08:00	Đỉnh triều	MC3	Giảm từ trái → phải	Phân tầng nhẹ, mặn ổn định hơn	Đường mặn ít cong, lan mặn giảm
Triều cao	14:00	Chân triều	MC3	Giảm từ trái → phải	Phân tầng nhẹ, đỉnh cong hướng xuống đáy	Mặn lệch phải giảm, tầng mặt giữ ngọt
Triều cao	21:00	Đỉnh triều	MC3	Giảm từ trái → phải	Phân tầng yếu, mặn ổn định	Lan mặn co lại rõ rệt, vùng nước ngọt mở rộng

3.2.4. Phân bố mặn theo mặt bằng trong từng thời kỳ

Trên cơ sở kết quả chạy mô hình, đã tiến hành trích xuất các bản đồ mặn cho thời điểm chân triều, đỉnh triều của hai thời kỳ triều cao và triều thấp để đánh giá sự thay đổi nồng độ mặn từ trên xuống.



Hình 3-11. Phạm vi truyền mặn thời điểm đỉnh triều thời kỳ triều cao

Phạm vi truyền mặn lớn nhất rơi vào 2 thời điểm chân triều và đỉnh triều của thời kỳ triều thấp (Hình 3-11.a, Hình 3-11.c), phạm vi truyền mặn nhỏ nhất rơi vào thời điểm đỉnh triều của thời kỳ triều cao (Hình 3-11.b, Hình 3-11.d).

Để làm rõ sự phân tầng và hình dạng nêm mặn, trong nghiên cứu chia chiều sâu lớp nước tính toán là 8 tầng. Các tầng độ sâu sẽ được đánh số bắt đầu từ đáy sông tầng 1 đến bề mặt là tầng 8.

Sự phân bố mặn theo các lớp chiều sâu có sự khác nhau khá rõ. Các tầng đáy (tầng 1, tầng 2) có sự đồng nhất (tầng 1, 2), đến tầng 3 bắt đầu xuất hiện các vết loang và đốm loang không chỉ ở cửa sông mà ngay tại nhánh sông, có xu hướng hướng ra biển, chứng tỏ sự xáo trộn giữa các lớp dòng chảy. Thời điểm chân triều của thời kỳ triều thấp, phạm vi xâm nhập mặn dao động trong khoảng 1,89 – 5,16 km. Thời điểm

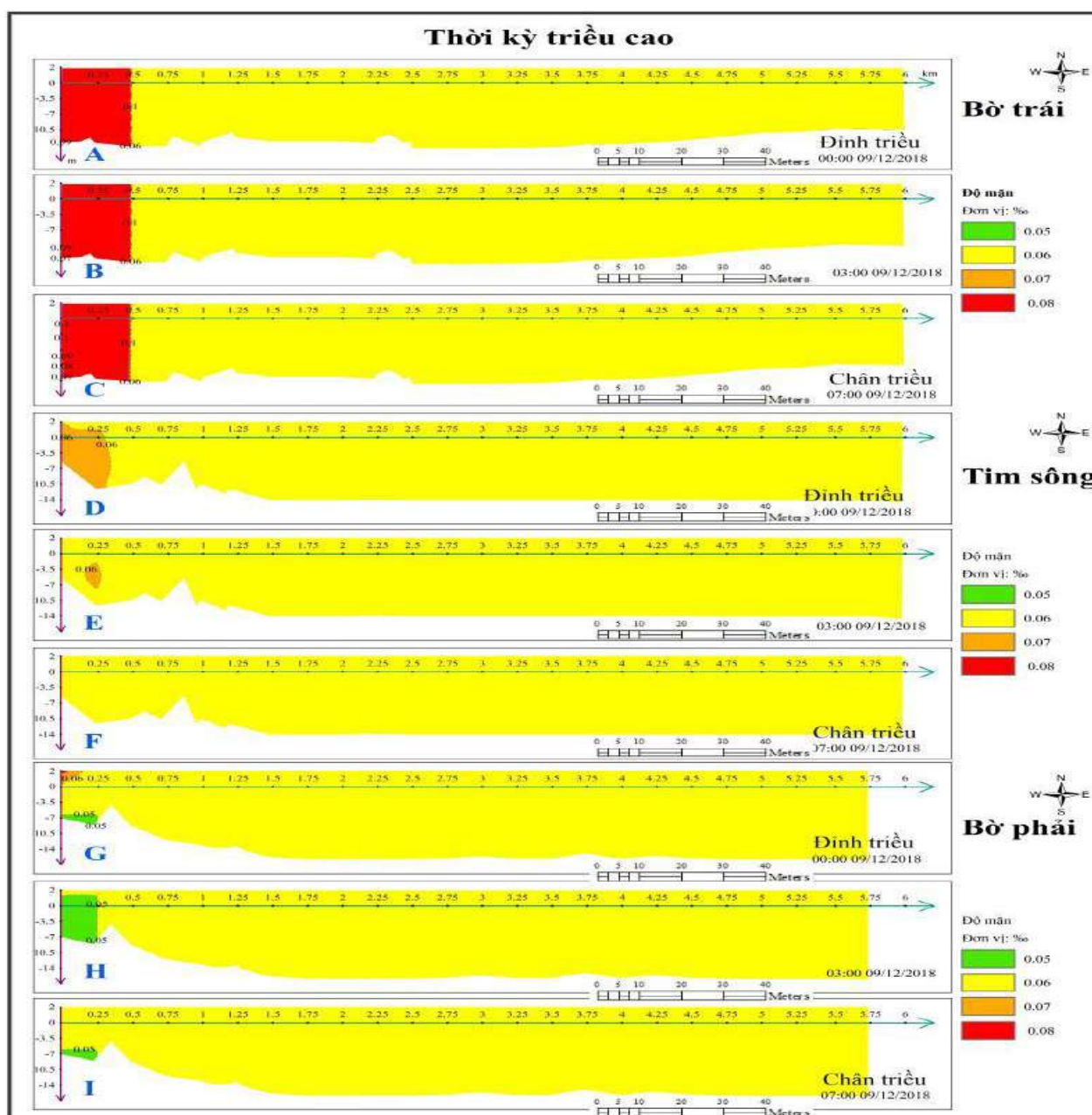
đỉnh triều của thời kỳ triều thấp, phạm vi xâm nhập mặn ở các tầng dao động trong khoảng 1,83 – 5,05 km. Thời điểm chân triều của thời kỳ triều cao, phạm vi xâm nhập mặn dao động trong khoảng 1,63 – 4,99 km. Thời điểm đỉnh triều của thời kỳ triều cao, phạm vi xâm nhập mặn dao động trong khoảng 1,48 – 4,85 km.

Theo phương ngang, xu thế phân cách trên các tầng có sự khác nhau rõ rệt, phạm vi truyền mặn giảm dần trên từng lớp độ sâu. Vùng cửa sông các lớp tầng đáy và tầng giữa, độ mặn biến động nhẹ, các tầng phía bề mặt bắt đầu biến động mạnh do sự xáo trộn dòng chảy từ sông và biển. Phạm vi truyền mặn giữa các tầng trên và đáy có sự chênh lệch đáng kể.

Thời kỳ triều thấp mùa lũ

Ngày diễn hình 9/12/2018 được chọn để phân tích phạm vi, mức độ truyền mặn cho mùa mưa, đây là ngày có lưu lượng lớn nhất trong mùa mưa. Hai thời điểm chân triều và đỉnh triều trong thời kỳ triều thấp vào mùa lũ năm 2018, các đường đẳng trị mặn rất ít, đường đẳng trị mặn của nêm mặn có xu hướng dốc và các nêm mặn ở thời điểm này chủ yếu được hình thành do sự xáo trộn giữa hai dòng chảy sông và biển (Hình 3-12). Tuy nhiên, các đường nêm mặn này có nồng độ mặn rất nhỏ.

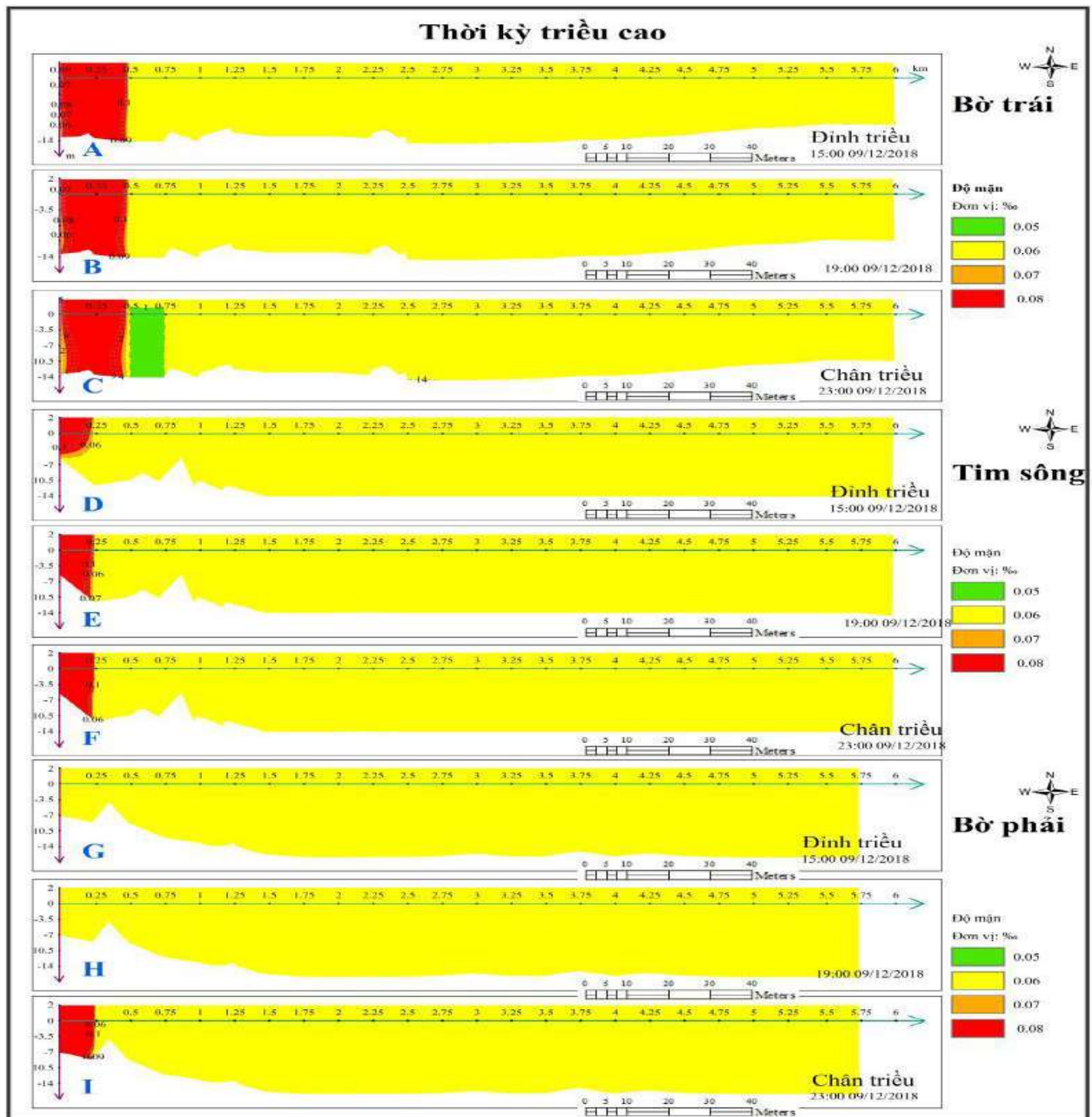
Thời điểm chân triều thời kỳ triều thấp, tính theo mốc 1‰, mặn vẫn chưa xâm nhập vào cửa sông, nêm mặn bờ trái xuất hiện rõ hơn, và giảm dần khi xuống đáy Hình 3-12.c,f,i.



Hình 3-12. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều thấp theo tuyến.

Thời điểm đỉnh triều của thời kỳ triều thấp, bờ trái tiếp tục xuất hiện nêm mặn. Đường đẳng trị mặn dốc, bờ trái mặn truyền vào 400m, còn bờ phải và tim sông mặn chưa truyền vào sông Hình 3-12.a,d,g.

Thời kỳ triều cao mùa lũ



Hình 3-13. Bản đồ truyền mặn thời kỳ triều cao theo mặt cắt dọc sông

Bức tranh lan truyền mặn mùa lũ trong thời kỳ triều cao không khác biệt so với thời kỳ triều thấp, mặn vẫn chưa truyền vào sông, không xuất hiện các đường đẳng trị mặn. Đặc biệt, thời kỳ triều cao hầu như không xuất hiện các nêm mặn bất thường.

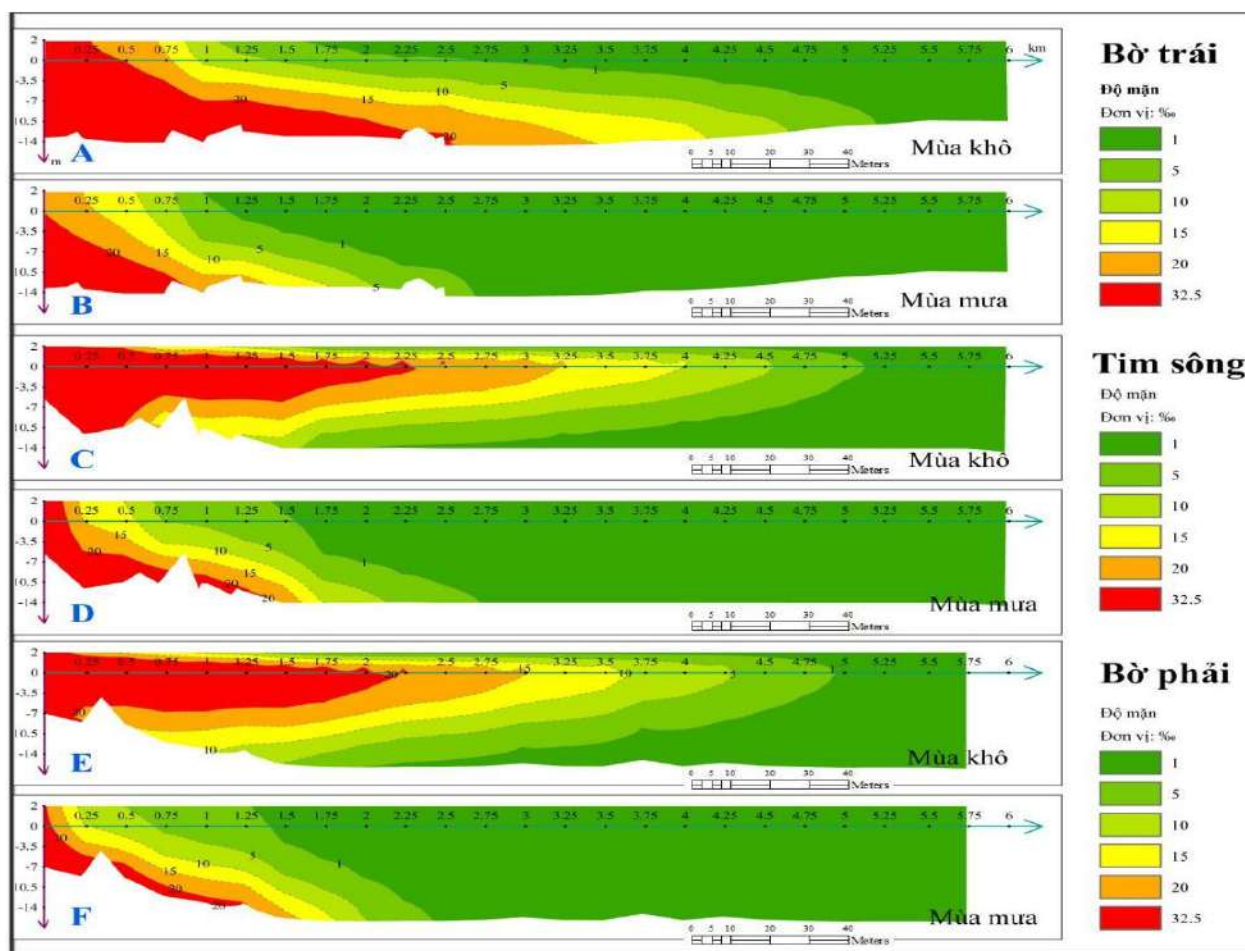
Thời điểm chân triều của thời kỳ triều cao rơi vào 23:00 cuối ngày, tại tim sông và bờ phải mặn truyền vào tới 250m, đây là thời điểm mặn truyền sâu nhất trong ngày Hình 3-13. Kết quả chạy mô hình Mike 3 được thể hiện trên Bảng 3-8.

Bảng 3-8. Phân bố mặn theo mặt bằng trong từng thời kỳ triều

Thời kỳ triều	Thời điểm	Loại triều	Tầng sâu	Phạm vi truyền mặn (km)	Ghi chú
Triều thấp	03:00	Chân triều	Tầng 1–2	~5,16 – 5,25	Đồng nhất, mặn truyền sâu nhất
			Tầng 3–4	~4,80 – 5,10	Bắt đầu có vết loang, chuyển tiếp
			Tầng 5–6	~4,10 – 4,80	Vùng loang mặn hẹp dần
			Tầng 7–8	~1,89 – 3,50	Tầng mặt, vùng nước ngọt chiếm ưu thế
Triều thấp	08:00	Đỉnh triều	Tầng 1–2	~5,05 – 5,20	Truyền mặn giảm nhẹ
			Tầng 3–4	~4,60 – 4,95	Phạm vi loang co lại
			Tầng 5–6	~3,90 – 4,60	Tầng giữa thu hẹp rõ hơn
			Tầng 7–8	~1,83 – 3,20	Tầng mặt, mặn truyền yếu hơn chân triều
Triều cao	14:00	Chân triều	Tầng 1–2	~4,80 – 4,99	Nêm mặn yếu hơn so với triều thấp
			Tầng 3–4	~4,20 – 4,70	Vết loang ngắn hơn
			Tầng 5–6	~3,40 – 4,20	Tầng giữa co lại
			Tầng 7–8	~1,63 – 2,80	Tầng mặt ít bị ảnh hưởng
Triều cao	21:00	Đỉnh triều	Tầng 1–2	~4,70 – 4,85	Phạm vi truyền mặn ngắn nhất
			Tầng 3–4	~4,00 – 4,50	Vết loang hẹp, ranh giới rõ hơn
			Tầng 5–6	~3,20 – 4,00	Mặn ở tầng giữa giảm mạnh
			Tầng 7–8	~1,48 – 2,50	Nước mặt phần lớn giữ ngọt

3.3 Kết quả phân tích sự phân tầng mặn cho kịch bản BDKH

a) Phân tích mặn theo theo kịch bản BDKH



Hình 3-14. Bản đồ truyền mặn theo mùa năm 2035 theo mặt cắt dọc sông

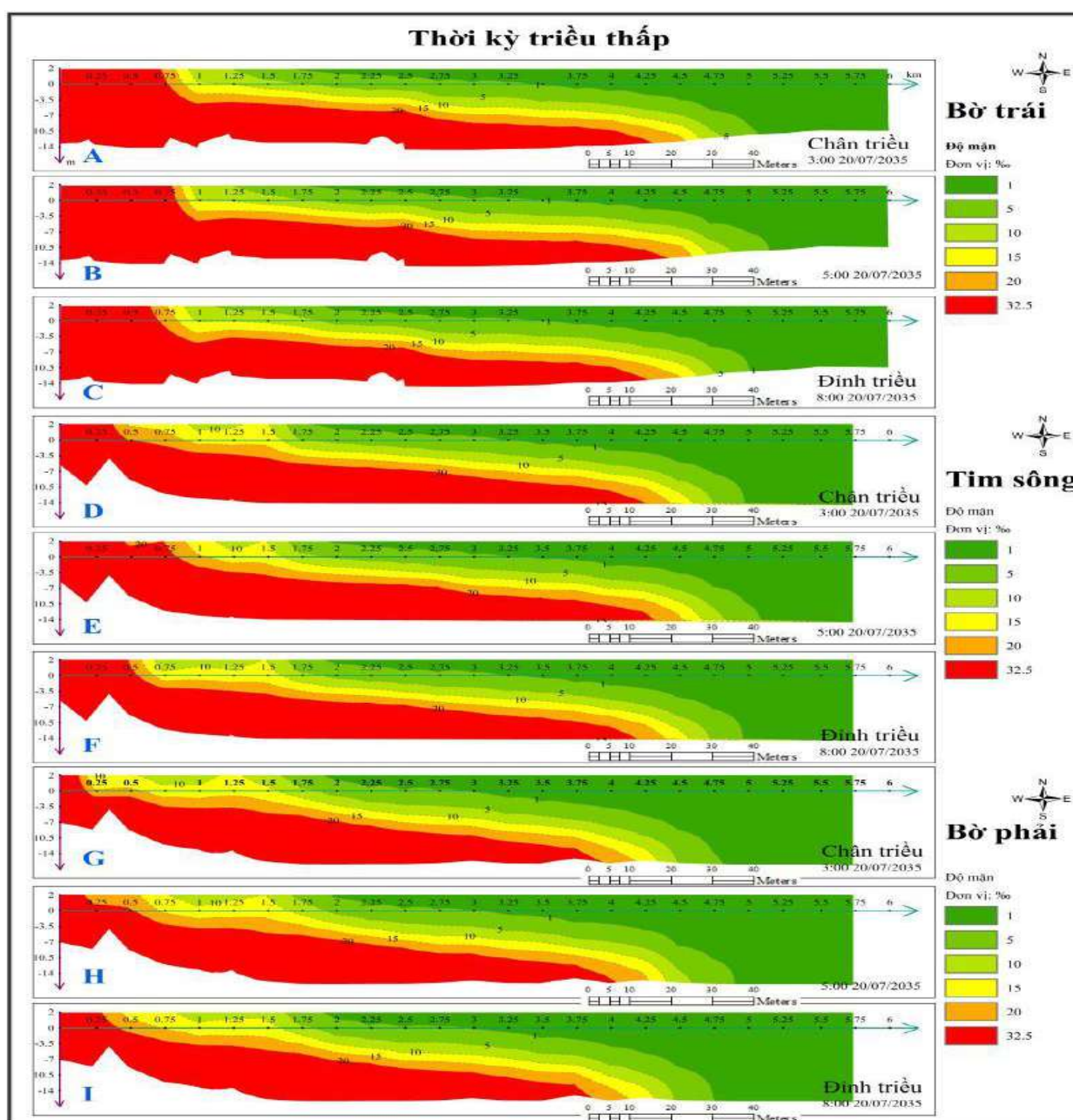
Cơ chế xâm nhập mặn vào mùa khô năm 2035 được thể hiện trên Hình 3-14.a, c, e. Dựa trên kết quả chạy mô hình cho tháng 7 (tháng kiệt nhất theo kịch bản hiện trạng), bản đồ truyền mặn được xây dựng. Mặn vào mùa khô xâm nhập vào nhánh sông theo cơ chế từ đáy lên. Theo từng độ sâu, độ mặn có sự chênh lệch. Đường đẳng trị mặn ở tim sông và bờ phải có xu hướng dốc hơn so với bờ trái ở vị trí 250m tính từ cửa sông, vì vậy, mặn có xu hướng tăng dần từ bờ trái sang bờ phải tính từ bề mặt, phía dưới đáy thì ngược lại. Tính theo mốc 1‰, trên bề mặt bờ trái mặn truyền được 1,65 km nhưng ở đáy mặn truyền được 5,25km (Hình 3-14.a). Tương tự, trên bề mặt tim sông mặn truyền được 1,75 km nhưng mặn ở đáy truyền vào 5,25km (Hình 3-14.c); Bờ phải của sông Vệ cũng ra kết quả tương tự, trên bề mặt mặn truyền được 1,8 km thì còn 1‰, nhưng dưới đáy đến 4,95km (Hình 3-14.e). Phạm vi truyền mặn với bờ trái, tim sông và bờ phải vào mùa khô chênh lệch không đáng kể, dao động trong khoảng 200-250m, nhưng mặn ở bờ trái truyền sâu hơn vào đất liền so với bờ phải và tim sông. Có thể nói, vào mùa khô, phạm vi truyền mặn giảm dần từ bờ trái qua bờ phải.

Dữ liệu của năm 2035 cho thấy tháng 11 có lượng mưa lớn nhất (tháng mưa nhiều nhất và có lưu lượng lớn nhất trong năm 2035) được dùng để xây dựng bản đồ xâm nhập mặn mùa mưa năm 2035. Vào mùa mưa, mặn truyền tương tự như mùa khô, từ dưới đáy đi vào sông, độ mặn phân tầng và có sự chênh lệch đáng kể theo độ sâu. Phạm vi truyền mặn tính từ bề mặt và dưới đáy có phạm vi ít chênh lệch hơn so với mùa khô. Tính theo mốc 1‰, trên bề mặt bờ trái mặn truyền được 1km, dưới đáy thì truyền tới 2,75km (Hình 3-14.b); Tương tự, trên bề mặt tim sông mặn truyền được 1,5km, mặn tiếp tục truyền phía đáy sông đến 2,75km (Hình 3-14.d); Bờ phải của sông Vệ cũng ra kết quả tương tự, trên bề mặt mặn truyền được 1,25 km thì còn 1‰, còn dưới đáy truyền đến 2,5km (Hình 3-14. f). Sự chênh lệch giữa phạm vi truyền mặn với bờ trái, tim sông và bờ phải vào mùa mưa lớn hơn so với mùa khô, dao động trong khoảng 200-500m. Đường đẳng trị mặn của năm mặn của tương tự mùa khô năm 2035, dốc hơn ở tim sông và phải, bờ trái thoải và năm mặn mỏng hơn.

b) Phân tích mặn theo thời kỳ dọc theo tuyến sông

Ngày 20/7/2035 được lựa chọn để đánh giá phạm vi, mức độ truyền mặn. Để có thể so sánh phạm vi lan truyền mặn với kịch bản hiện trạng năm 2018.

Thời kỳ triều thấp



Hình 3-15. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều thấp theo tuyến.

Hai thời điểm chân triều và đỉnh triều trong thời kỳ triều thấp, đường đẳng trị mặn của nêm mặn có xu hướng thoải hơn ở bờ trái và tim sông, bờ phải dốc ở khoảng 200m tính từ cửa sông. Đường đẳng trị của nêm mặn càng dốc, thì mặn ở bề mặt sẽ truyền càng sâu, còn phía đáy sẽ có xu hướng giảm nhẹ. Cụ thể, thời điểm chân triều lúc 3 giờ, tính từ bề mặt sông bờ trái mặn truyền vào 1,6km (Hình 3-15.a), tim sông truyền được 1,8km (Hình 3-15.d) và bờ phải truyền được 1,85km (Hình 3-15.g); tính từ đáy phạm vi truyền mặn lần lượt là 5,05 km, 5 km, 5km;

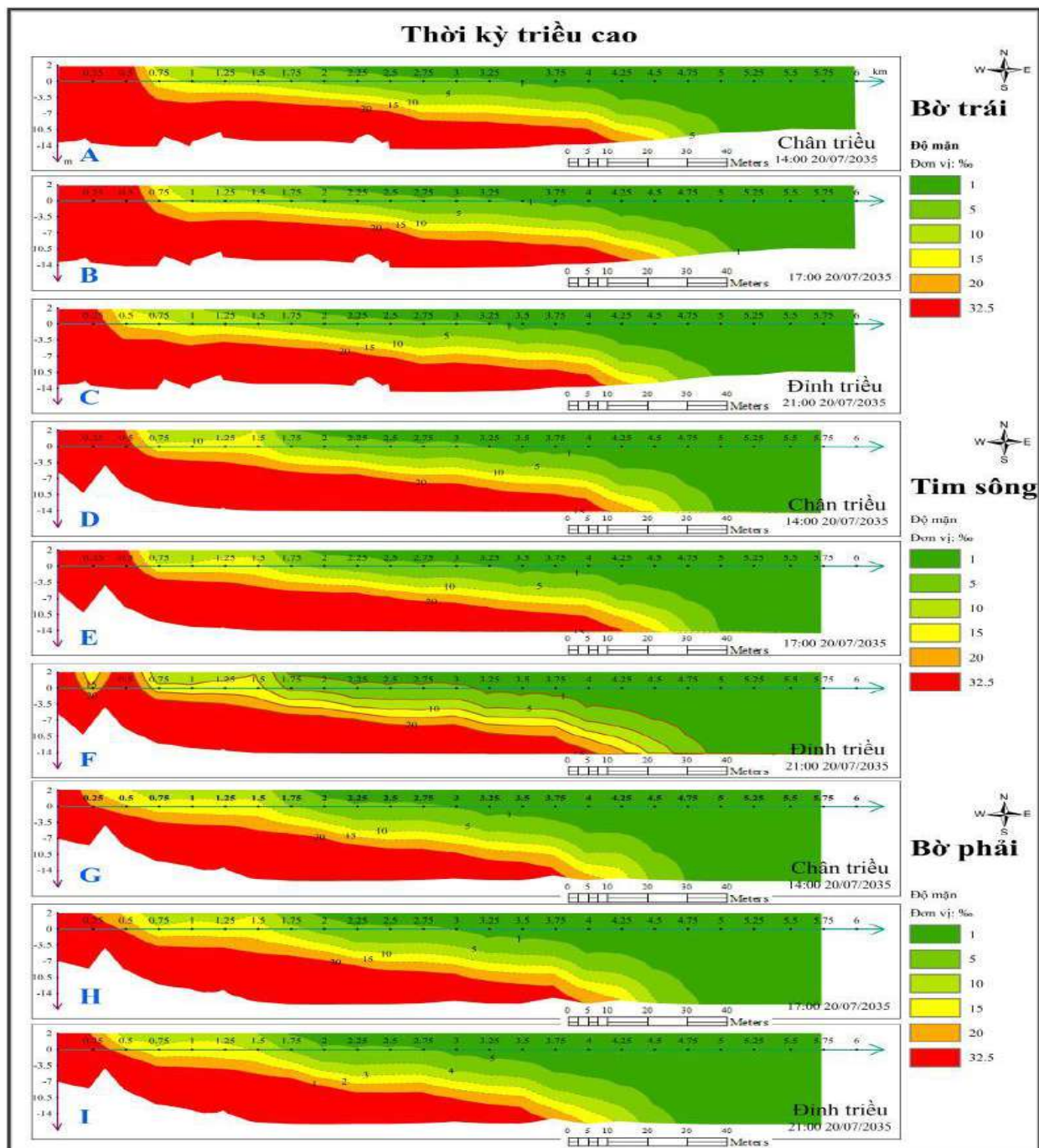
Thời điểm đỉnh triều của thời kỳ triều thấp trong ngày 20/07/2035 rơi vào lúc 8 giờ. Hình dáng các đường đẳng trị mặn của nêm mặn tương tự với thời điểm chân triều nhưng có xu hướng thoải hơn. Vì vậy, mặn truyền từ bề mặt sẽ sâu hơn so với thời điểm chân triều, và phía đáy sẽ thấp hơn. Cụ thể, tính từ bề mặt sông bờ trái mặn truyền vào 1,8km (Hình 3-13.c), tim sông truyền được 2km (Hình 3-13.f) và bờ phải truyền được 2km (Hình 3-13.f); tính từ đáy phạm vi truyền mặn lần lượt là 5 km, 5 km, 4,75km;

Thời kỳ triều cao

Vào thời kỳ triều cao, các đường đẳng trị của nêm mặn có sự thay đổi, có xu hướng dốc hơn ở cửa sông, đặc biệt là phía bờ trái. Tại bề mặt phía bờ trái mặn truyền được 1,8km (Hình 3-16.a); mặn truyền được 1,7km ở tim sông (Hình 3-16.d); trên bề mặt bờ phải thì tăng lên 1,8km (Hình 3-16.g). Tính từ đáy phạm vi truyền mặn lần lượt là 5km; 5km; 4,75km. Tương tự với thời điểm chân triều của thời kỳ triều thấp, thời điểm chân triều của thời kỳ triều cao mặn vẫn giảm dần từ bờ trái qua bờ phải.

Độ dốc của đường đẳng trị mặn phản ánh phạm vi truyền mặn của từng vị trí trên nhánh sông, càng dốc thì phạm vi truyền mặn càng lớn. Nêm mặn xuất hiện từ bờ trái, rõ rệt ở tim sông và biến mất ở bờ phải.

Tương tự thời điểm chân triều, dòng chảy đẩy mặn ra khỏi sông ở tim sông ngày càng tăng, làm rõ rệt các nêm mặn bất thường, đây là thời điểm thấy rõ nêm mặn nhất. Tại lớp bề mặt thời điểm đỉnh triều thời kỳ triều cao tại bờ trái truyền được 1,75km (Hình 3-16.c); đến tim sông còn 1,7km (Hình 3-16.f); bờ phải đã tăng lên 1,75km (Hình 3-16.i); Kết quả lần lượt cho tầng đáy là 5km; 4,9km; 4,75km.



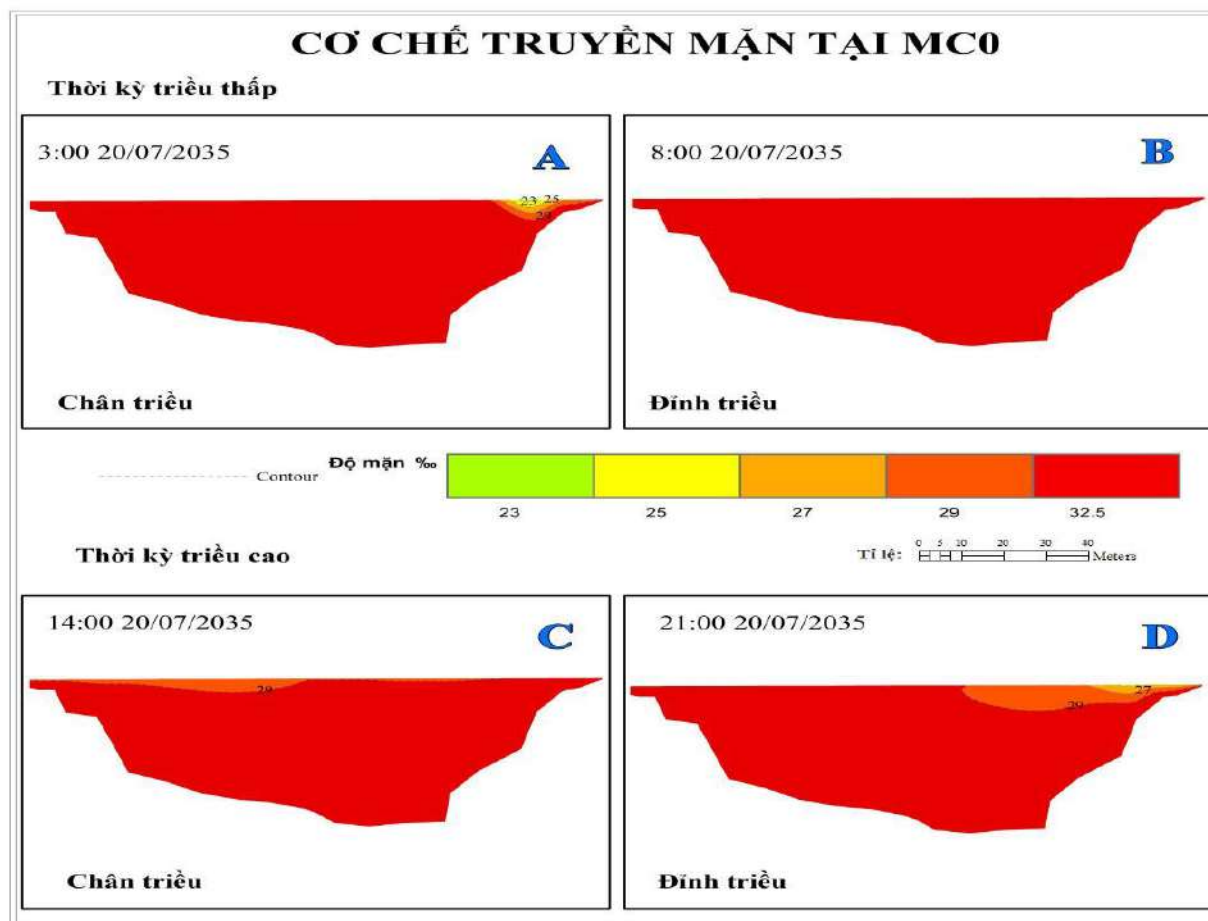
Hình 3-16. Cơ chế truyền mặn thời kỳ triều cao theo tuyến.

Phạm vi truyền mặn trong thời kỳ triều cao dao động trong khoảng 1,5 - 1,75 km trên lớp bề mặt và 4,75 – 5,2km lớp đáy. Kết quả này cho thấy không chênh lệch đáng kể so với thời kỳ triều thấp tại khu vực nghiên cứu.

c) Phân tích mặn theo mặt cắt sông theo từng thời kỳ

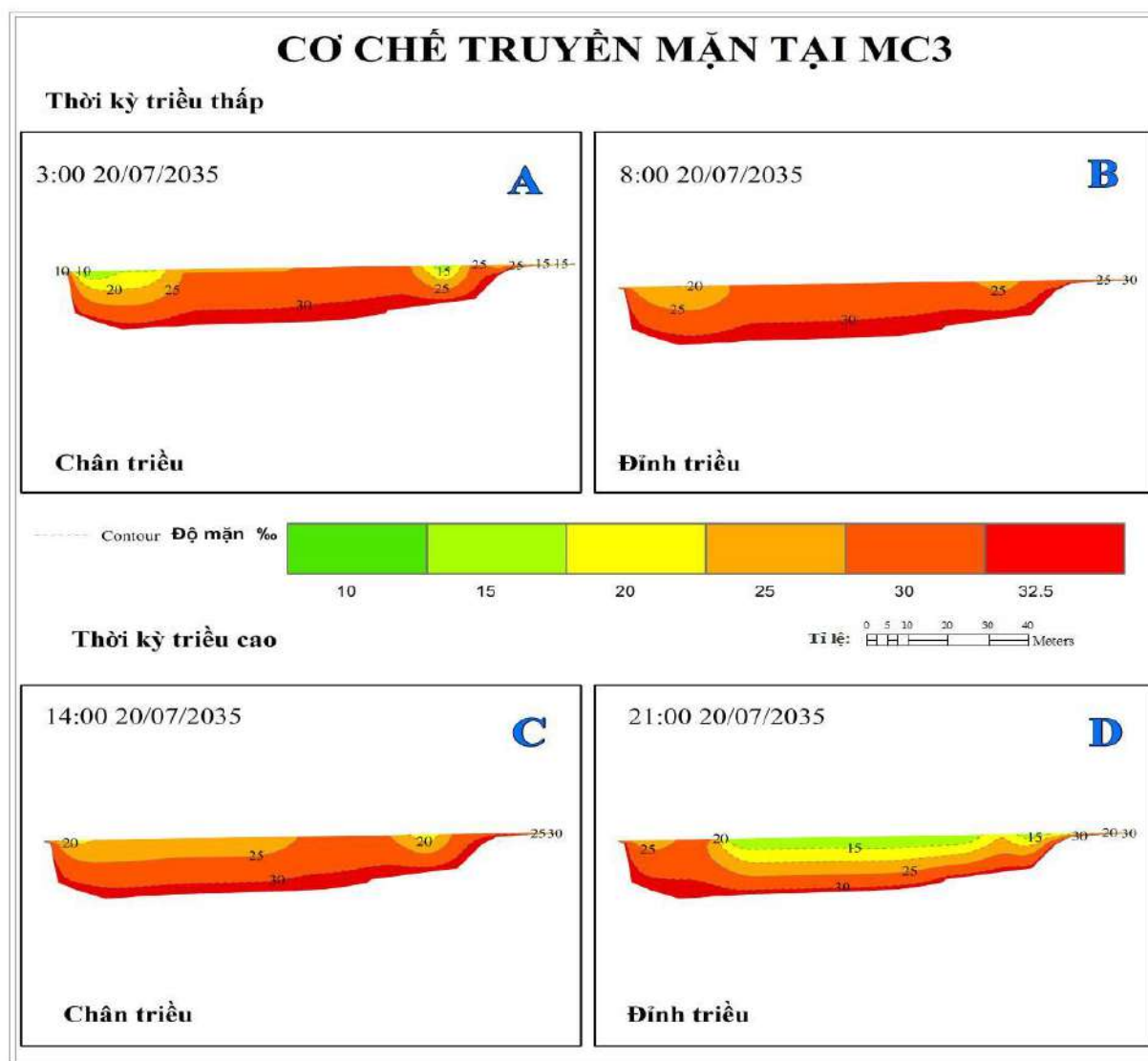
Tại mặt cắt ngay cửa sông vào năm 2035, độ mặn tại MC0 gần như không có biến động nhiều như năm 2018. Các đường đẳng trị mặn của nê-mặn ít và có xu hướng

dốc ở bờ phải (Hình 3-17). Tuy nhiên, ở cửa sông không phân tầng mạnh mẽ và mặn duy trì ở mức 32,5 ‰. Có các thời điểm như đỉnh triều thời kỳ triều thấp (Hình 3.17b) không phân tầng, các thời điểm còn lại (Hình 3-17.a, c, d) phân tầng trên bề mặt rất ít.



Hình 3-17. Cơ chế truyền mặn theo mặt cắt ngang tại MC0

Tại mặt cắt MC3, độ mặn biến động nhiều ở bề mặt hai bờ trái và bờ phải, sau đó lan dần ra phía dưới đáy. Tại vị trí này, phân bố mặn trên mặt cắt ngang có sự khác nhau vào các thời điểm chân triều và đỉnh triều của hai thời kỳ triều. Đường đẳng trị mặn phân tầng không cong theo hình dáng mặt cắt trong thời kỳ triều thấp, đến thời kỳ triều cao, đường đẳng trị mặn cong theo hình dáng mặt cắt ở phía dưới đáy sông, trên bề mặt vẫn có nhiều biến động (Hình 3-18). Nhìn chung, cơ chế truyền mặn tại MC3 vào năm 2035 biến động rất nhiều so với năm 2018.



Hình 3-18. Cơ chế truyền mặn tại mặt cắt ngang MC3

Từ kết quả phân tích trên mặt cắt ngang cho thấy phân tầng trên mặt cắt ngang tương đồng với trục dọc sông. Thời kỳ triều thấp phân tầng mạnh mẽ hơn thời kỳ triều cao, chân triều phân tầng mạnh mẽ hơn đỉnh triều.

d) Phân tích mặn theo mặt bằng trong từng thời kỳ

Sự phân bố mặn theo các lớp chiều sâu có sự khác nhau khá rõ. Khác với năm 2018 (đến tầng 3 đã bắt đầu xuất hiện những vết loang và đốm loang), năm 2035 đến tầng 5 mới bắt đầu xuất hiện những vết loang này, các tầng đáy (tầng 1-tầng 4) mặn đồng nhất và gần như không có sự xuất hiện của các nê-mặn tại cửa sông. Điều này chứng tỏ, lưu lượng chưa tác động được những tầng này.

Về phạm vi xâm nhập mặn cũng như các thời điểm trước đó, ở phía đáy mặn truyền vào sâu hơn so với bề mặt, dao động trong khoảng 1,675 – 4,809 km.

Theo phương ngang, xu thế phân cách trên các tầng có sự khác nhau rõ rệt, phạm vi truyền mặn giảm dần theo từng lớp độ sâu. Vùng cửa sông các lớp tầng đáy và tầng giữa, độ mặn biến động nhẹ, các tầng phía bề mặt bắt đầu biến động mạnh do sự xáo trộn dòng chảy từ sông và biển. Phạm vi truyền mặn giữa các tầng trên và đáy có sự chênh lệch đáng kể.

3.4. Đánh giá sự khác biệt kịch bản hiện trạng và BĐKH

3.4.1. Hình dáng và độ dày nêm mặn

Theo kịch bản hiện trạng 2018: đường đẳng trị mặn dốc, nêm mặn dày nhất tại tim sông và bờ phải, mỏng nhất ở bờ trái. Khi lên triều, nêm mặn có xu thế mỏng hơn so với lúc triều thấp. Kịch bản BĐKH 2035 đường đẳng trị mặn thoải hơn, nêm mặn mỏng hơn 2018 nhưng dày thêm vào thời kỳ đỉnh triều. Sự khác biệt hình dáng nêm mặn giữa các thời điểm (chân triều và đỉnh triều) rõ nét hơn. Sự giống nhau ở 2 kịch bản ở chỗ, tốc độ phát triển mặn lớp mặt nhanh hơn lớp đáy là nguyên nhân biến đổi hình dạng nêm mặn theo thời gian.

3.4.2. Phạm vi xâm nhập mặn

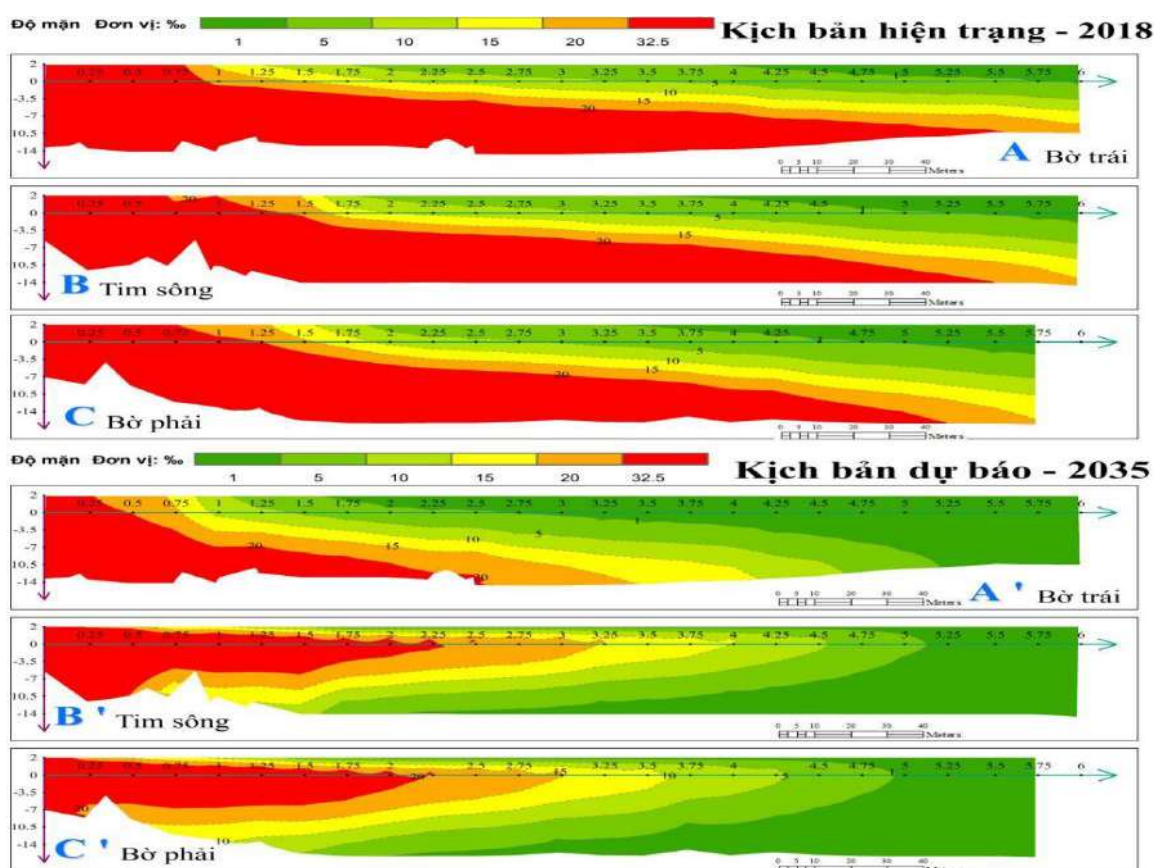
Trung bình mùa khô, 2018 có phạm vi xâm nhập sâu hơn 2035 khoảng 100–300 m. Tuy nhiên cơ chế truyền mặn (xâm nhập từ đáy mạnh hơn mặt) giữ ổn định ở cả hai kịch bản và hai mùa. Riêng vào mùa mưa 2035 mặn xâm nhập mặn sâu hơn 2018 do lượng mưa giảm và bốc hơi tăng – hệ quả của BĐKH.

3.4.3. Mức độ phân tầng mặn

Cả hai kịch bản đều cho thấy tầng mặn mạnh mẽ, nhưng tại chân triều phân tầng giảm nhẹ hơn so với đỉnh triều. Kịch bản BĐKH 2035 có xu hướng giảm nhẹ độ phân tầng tại chân triều so với 2018, nhất là ở tim sông và bờ phải Bảng 3-9.

Qua các kết quả tính toán cho các thời điểm của thời kỳ triều cao và triều thấp trong mùa kiệt có thể rút ra một số kết luận chung về phân tầng mặn và nê-m mặn như sau:

- Hình dáng nê-m mặn có xu thế dày ở tim sông và bờ phải, mỏng hơn ở bờ trái bởi vì tim sông (5,028m) và bờ phải (7,07m) nông hơn so với bờ trái (10,332m) ở tại cửa sông. Sự biến hình của nê-m mặn không rõ ràng giữa các thời điểm, sự biến đổi ở khu vực sông Vệ chỉ rõ ràng ở việc xuất hiện nê-m mặn rồi biến mất, nê-m mặn chủ yếu xuất hiện ở bờ trái và tim sông ở thời kỳ triều thấp sau đó biến mất khi quan thời kỳ triều cao.
- Tốc độ phát triển của nê-m mặn không đều nhau giữa lớp mặt và lớp đáy, lớp trên mặn nhanh hơn lớp đáy là nguyên nhân thay đổi hình dáng nê-m mặn.



Hình 3-19. So sánh cơ chế truyền mặn mùa khô giữa kịch bản hiện trạng và kịch bản BDKH 2035: a/ Bờ trái; b/ Tim sông; c/ Bờ phải

Bảng 3-9. So sánh phân tầng mặn theo kịch bản hiện trạng và BĐKH

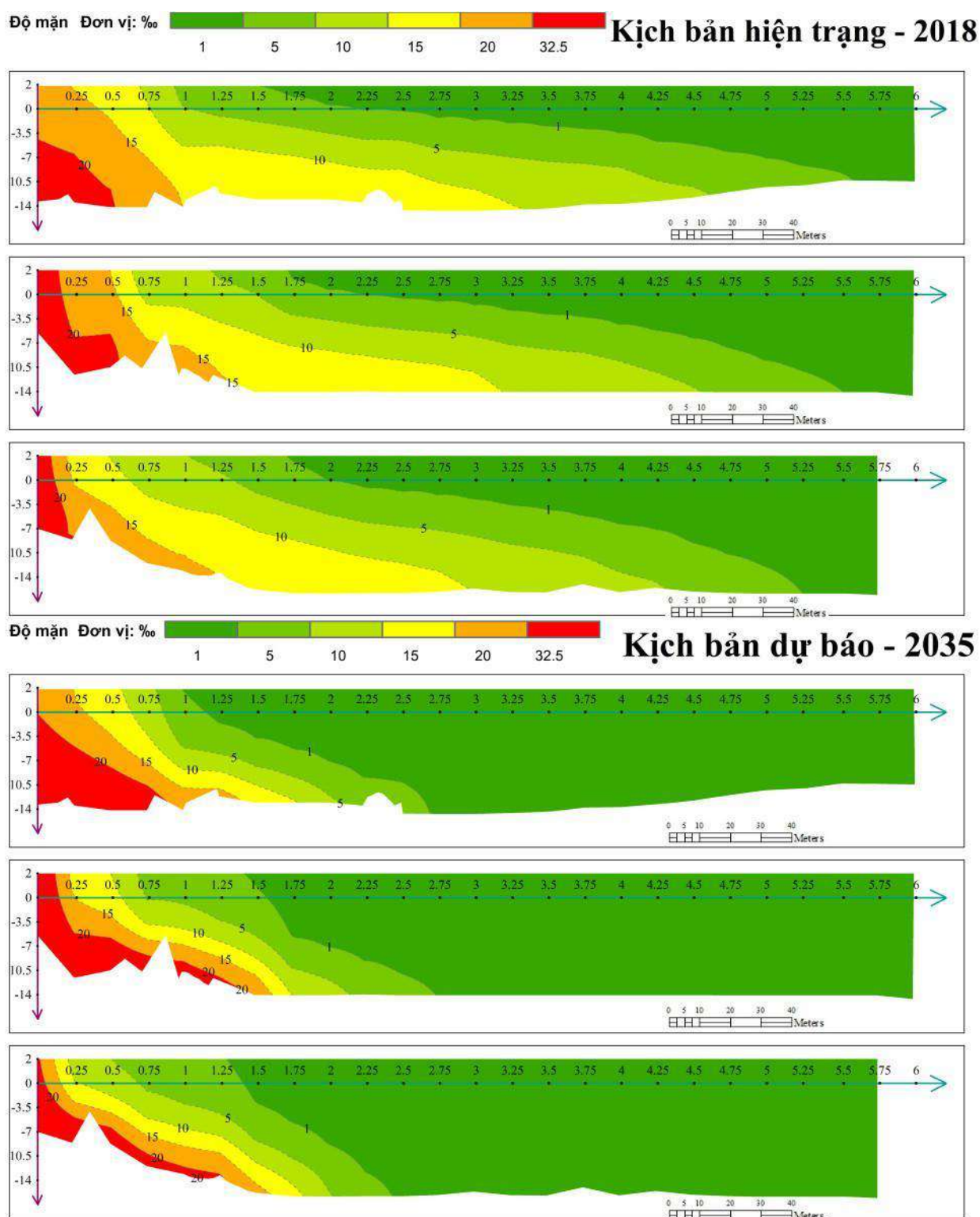
Time		Kịch bản hiện trạng (km)			Kịch bản BĐKH (km)		
	Vị trí	Hình dáng nêm mặn	Mặt	Đáy	Hình dáng nêm mặn	Mặt	Đáy
I. Thời kỳ triều thấp							
Chân triều (3:00 20/07)	Bờ trái	Dốc	1,8	5,25	Thoải	1,6	5,05
	Tim sông	Dốc	1,7	5,25	Thoải	1,8	5
	Bờ phải	Dốc	1,75	5	Thoải	1,85	5
Đỉnh triều (8:00 20/07)	Bờ trái	Dốc	1,8	5,2	Thoải	1,8	5
	Tim sông	Dốc	1,75	5,2	Thoải	2	5
	Bờ phải	Dốc	1,75	5	Thoải	2	4,75
II. Thời kỳ triều cao							
Chân triều (14:00 20/07)	Bờ trái	Thoải	1,7	5,2	Thoải	1,8	5
	Tim sông	Dốc	1,7	5,1	Dốc	1,7	5
	Bờ phải	Dốc	1,75	4,9	Dốc	1,8	4,75
Đỉnh triều (21:00 20/07)	Bờ trái	Thoải	1,5	5	Thoải	1,75	5
	Tim sông	Dốc	1,6	5	Thoải	1,7	4,9
	Bờ phải	Dốc	1,75	4,75	Thoải	1,75	4,75
III. Theo mùa							
Mùa khô	Bờ trái	Thoải	1,75	6	Thoải	1,65	5,25
	Tim sông	Dốc	2	5,8	Dốc	1,75	5,25
	Bờ phải	Dốc	2	5,5	Dốc	1,8	4,75
Mùa mưa	Bờ trái	Dốc	0	0,9	Dốc	1	2,75
	Tim sông	Dốc	0,7	1,2	Dốc	1,5	2,75
	Bờ phải	Dốc	0,6	0,6	Dốc	1,25	2,5

3.4.4. Mùa khô

- Về hình dáng nêm mặn, hai kịch bản có hình dáng đường đẳng trị mặn của nêm mặn tương tự nhau, nhưng năm 2035 có xu hướng dốc và dày hơn.
- Về cơ chế xâm nhập mặn, vào năm 2035 mặn vẫn xâm nhập từ đáy. Ở cả hai kịch bản đều phân tầng mạnh mẽ.
- Về phạm vi truyền mặn, như kết quả trên từng thời điểm, kết quả xâm nhập mặn trung bình mùa khô năm 2018 và năm 2035 chỉ chênh lệch rất ít, khoảng 100-300m, kịch bản hiện trạng có phạm vi truyền mặn sâu hơn. (Hình 3-19), tỷ lệ giống Hình 3-14.

Như vậy do lưu lượng nước ngọt trên thượng nguồn giảm mạnh dẫn tới triều và nước biển xâm nhập sâu. Tầng đáy giữ mặn cao, tầng mặt vẫn có dòng chảy ngọt dẫn tới sự phân tầng rõ rệt. Hình thành nêm mặn kéo dài từ cửa sông có xu hướng xâm nhập vào phía nội địa.

3.4.5. Phân tầng vào mùa mưa



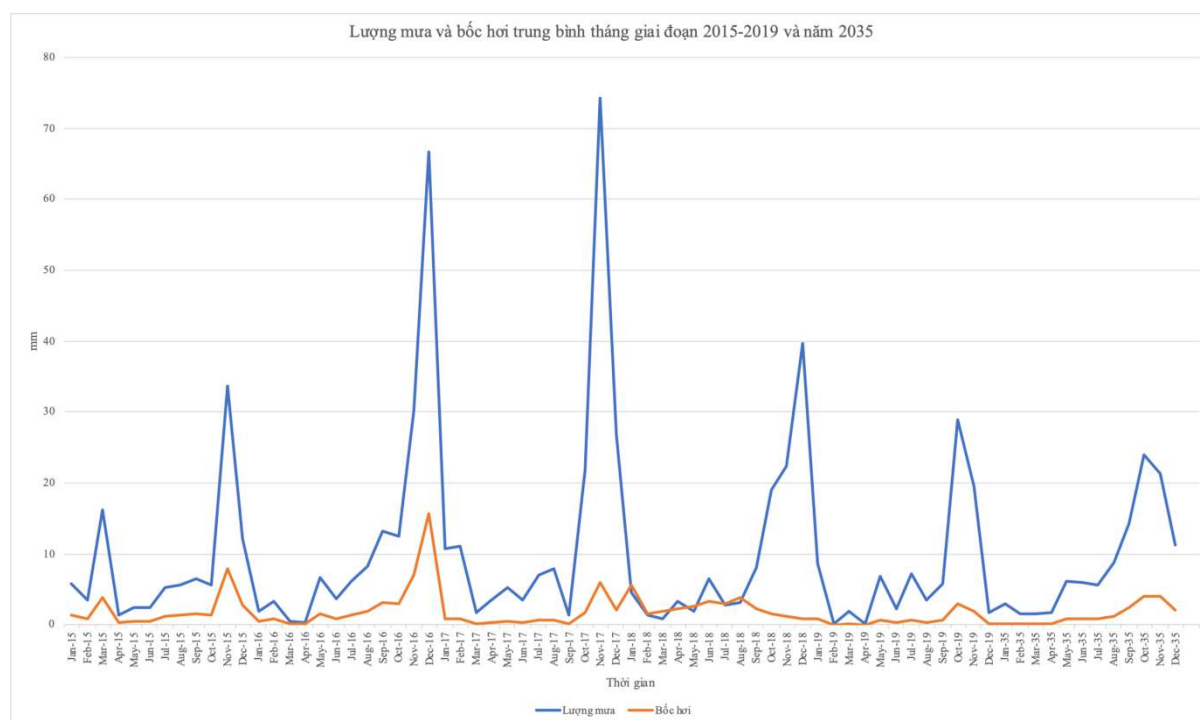
Hình 3-20. So sánh cơ chế truyền mặn mùa mưa giữa kịch bản hiện trạng và kịch bản BĐKH 2035: a/ Bờ trái; b/ Tim sông; c/ Bờ phải

Bức tranh truyền mặn mùa mưa theo kịch bản BĐKH có sự chuyển biến khác thường so với các kết quả kịch bản hiện trạng. Vào mùa mưa năm 2035 mặn truyền vào sâu hơn so với mùa mưa 2018. Theo tính toán, lượng mưa theo kịch bản BĐKH vào mùa mưa giảm so với năm 2018, trong khi lượng bốc hơi tăng đáng kể (Hình 3-20), tỷ lệ giống Hình 3-14.

Hình dáng đường đẳng trị mặn của nê-m mặn cũng khác nhau, năm 2018 đường đẳng trị mặn thẳng đứng, đến năm 2035 bắt đầu có hình dạng như các thời điểm trước đó đã biện luận. Tuy nhiên, điểm không thay đổi vẫn là cơ chế truyền mặn, cụ thể mặn vẫn truyền từ phía dưới đáy mạnh hơn phía bề mặt Hình 3-20.

Vào mùa lũ lưu lượng nước ngọt từ thượng nguồn sông Vệ lớn dẫn tới dòng chảy mạnh ra biển, nước mặn bị đẩy lùi, phân tầng yếu hoặc không xảy ra. Điều này dẫn tới độ mặn tầng đáy giảm, tầng mặt gần như ngọt hoàn toàn.

3.4.6. Thảo luận



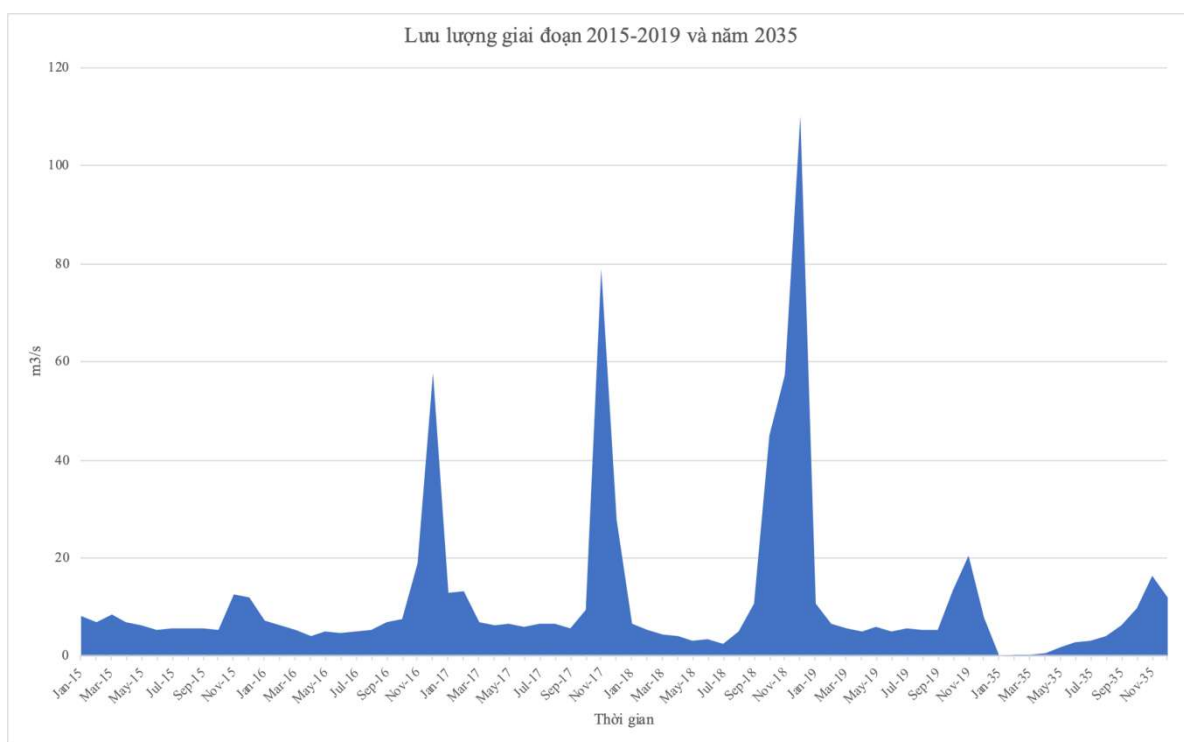
Hình 3-21. Biểu đồ lượng mưa, bốc hơi 2015-2019, 2035

Có thể thấy, lượng mưa năm 2035 giảm rõ rệt so với giai đoạn năm 2015-2019, cụ thể, trong giai đoạn năm 2035 lượng mưa giao động trong khoảng 0,16 – 74,32 mm, lượng mưa lớn nhất rơi vào tháng 11 năm 2017 và lượng mưa nhỏ nhất rơi vào tháng

12 năm 2019. Theo như kịch bản BĐKH, lượng mưa tính toán được trong năm 2035 giao động trong khoảng 1,47 – 23,94 mm, lượng mưa lớn nhất rơi vào tháng 10 và nhỏ nhất rơi vào tháng 3 (Hình 3-21).

Biểu đồ của lượng mưa và bốc hơi biến trình tương tự nhau trong giai đoạn năm 2015-2017, năm 2019 và năm 2035, riêng năm 2018, bốc hơi không theo tiến trình với lượng mưa mà có xu hướng giảm nhiều. Cụ thể, trong giai đoạn năm 2015-2019, bốc hơi giao động trong khoảng 0,016 – 15,69 mm, bốc hơi lớn nhất rơi vào tháng 1 năm 2016, nhỏ nhất rơi vào tháng 12 năm 2019. Đến năm 2035, bốc hơi tăng tăng trong mùa khô và giảm trong mùa mưa, giao động trong khoảng 0,095 – 4,03 mm, lớn nhất rơi vào tháng 11 và nhỏ nhất rơi vào tháng 3 năm 2035.

Theo kịch bản BĐKH, năm 2035 có lượng mưa giảm nhưng bốc hơi lại tăng, từ đó tác động mạnh mẽ đến lưu lượng của năm 2035 so với giai đoạn 2014-2019 như Hình 3-20.



Hình 3-22. Biểu đồ lưu lượng 2015-2019 và năm 2035 theo kịch bản BĐKH

Lưu lượng năm 2035 giảm rất nhiều so với giai đoạn năm 2014-2019, cụ thể, trong năm 2014-2019, lưu lượng giao động trong khoảng 2,63 – 110,18 m³/s, lưu lượng cao nhất rơi vào tháng 12 năm 2018, nhỏ nhất rơi vào tháng 7 năm 2018. Đến năm 2035,

lưu lượng giảm chỉ còn 0,062 – 16,42 m³/s, rơi vào tháng 11 là có lưu lượng lớn nhất, tháng nhỏ nhất rơi vào tháng 1 năm 2035 (vẫn còn là tháng của mùa mưa) (Hình 3-22). Như vậy quy luật BĐKH diễn ra rất phức tạp, cần những nghiên cứu bổ sung.

Tương quan giữa xâm nhập mặn và các yếu tố tác động:

Các kết quả trình bày trong 3.1 – 3.4 đặt ra câu hỏi về sự phụ thuộc của cơ chế, phạm vi, mức độ xâm nhập mặn vào yếu tố tác động, như thủy văn (dòng chảy từ biển - chế độ triều và dòng chảy từ sông - lưu lượng thượng nguồn), địa hình khu vực (độ sâu), các yếu tố khí tượng (lượng mưa, bốc hơi). Trong mục này, phân tích hồi quy tuyến tính với từng yếu tố được thực hiện. Các yếu tố tác động đến xâm nhập mặn được chia làm 3 nhóm chính: khí tượng (lượng mưa và bốc hơi), yếu tố thủy văn (lưu lượng thượng nguồn, mực nước - yếu tố triều), địa hình (độ sâu).

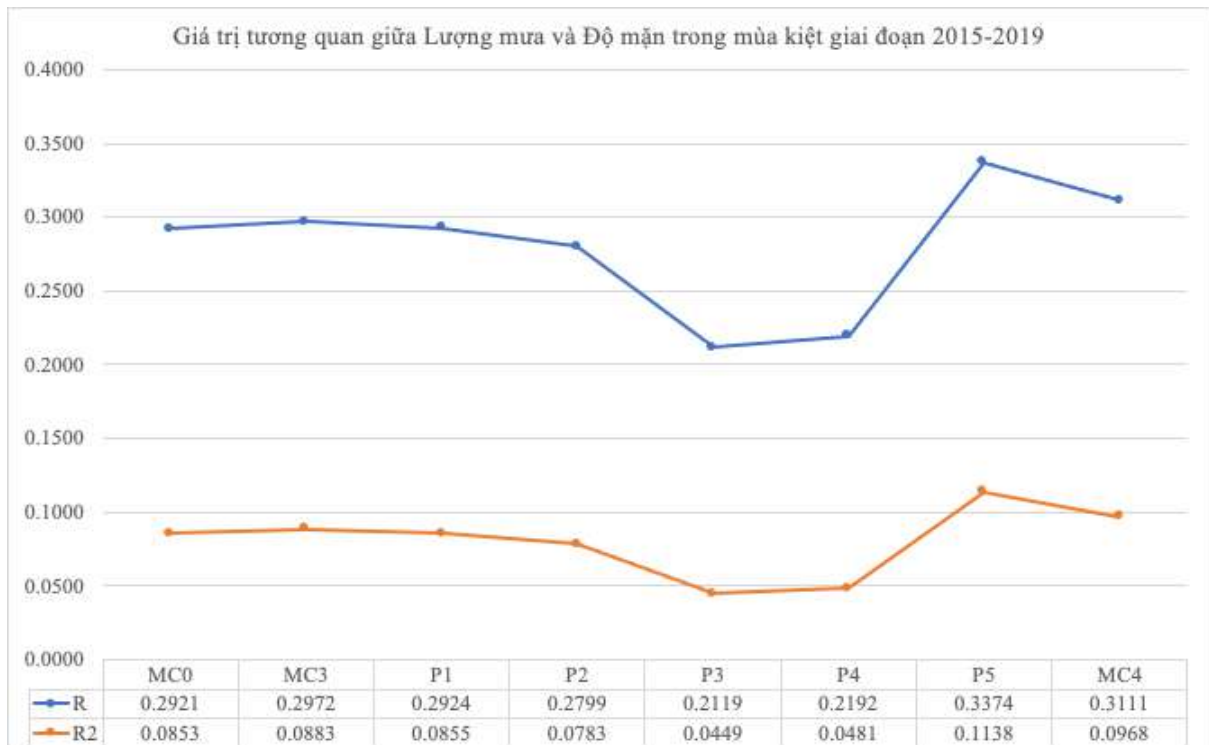
3.4.7. Yếu tố khí tượng

a) Mối tương quan giữa độ mặn và lượng mưa

Mối quan hệ giá trị độ mặn theo thời gian t tại các vị trí trên Bảng 2-8 ($S_{t,V_i \text{ trí}}, y_1$) được đặt trong mối liên hệ với các giá trị lượng mưa, mm (P, x_1); và bốc hơi, mm (E, x_2) theo mô hình hồi quy tuyến tính thực nghiệm đơn biến (3.2) như sau:

$$y_1 = \alpha + \beta_1 x_1 + \varepsilon, \quad y_2 = \alpha + \beta_2 x_2 + \varepsilon \quad (3.2)$$

Trong đó, α là điểm cắt trên trục tung; β là độ dốc hay còn gọi là các hệ số hồi quy (các tham số); và ε là biến ngẫu nhiên (số hạng sai số).

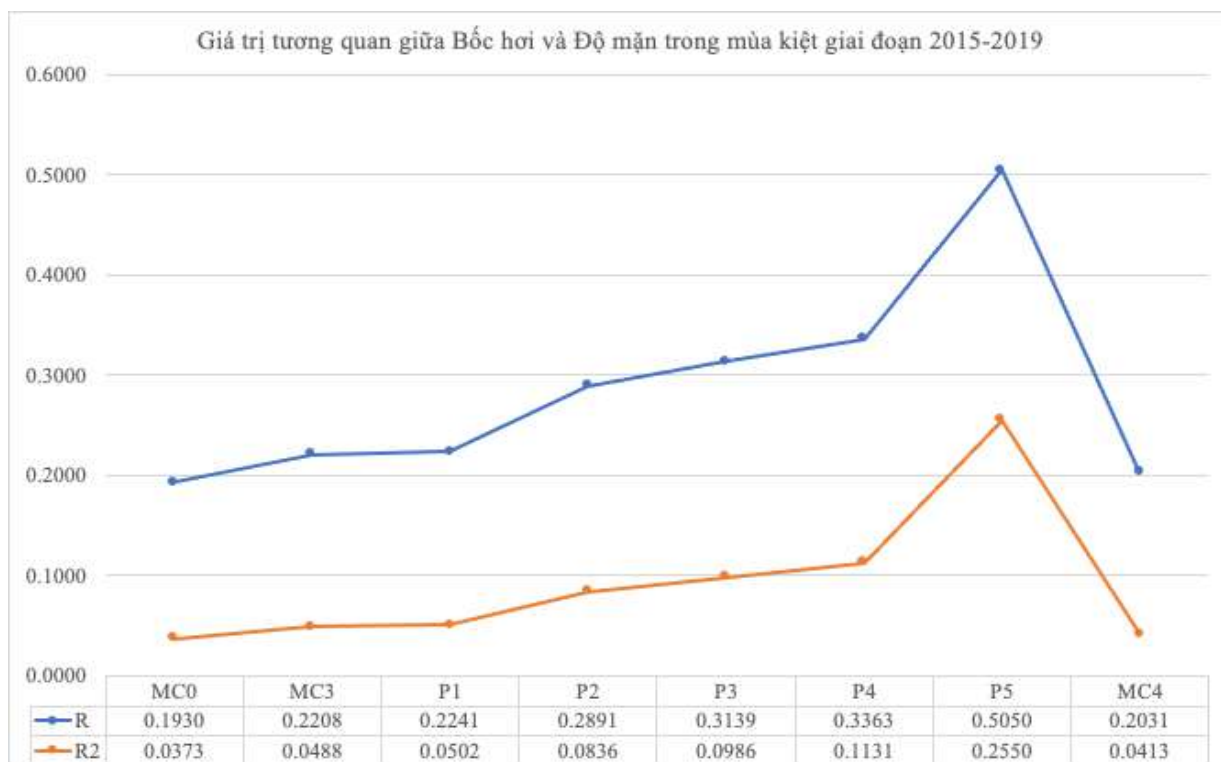


Hình 3-23. Tương quan giữa độ mặn và lượng mưa mùa kiệt giai đoạn 2015-2019

Kết quả phân tích hồi quy tuyến tính sự phụ thuộc độ mặn vào lượng mưa mùa kiệt giai đoạn 2015-2019 thể hiện trên Hình 3-21 cùng các giá trị R và R^2 . Mối tương quan giữa độ mặn và lượng mưa không cao trong mùa kiệt được giải thích bởi gần như lượng mưa rất ít (giai đoạn trong khoảng 0-44mm), dù vẫn có ảnh hưởng nhất định đến độ mặn tại khu vực nghiên cứu. Lượng mưa sẽ ảnh hưởng trực tiếp lên lưu lượng, gián tiếp lên độ mặn tại các vị trí phân tích. Càng vào sâu vào đất liền, mức độ ảnh hưởng lượng mưa sẽ càng tăng (giá trị tương quan ở MC4 cao hơn hẳn các vị trí khác). Ở các vị trí cửa sông (MC0, MC3 và P1), mức độ tương quan giữa lượng mưa và độ mặn gần như không chênh lệch với hệ số tương quan chung khoảng 0,29.

b) Mối tương quan giữa độ mặn và bốc hơi

Lượng mưa (0-44mm) và bốc hơi (0-47,93mm) cho giai đoạn 2015 – 2019, không chênh lệch nhiều. Tuy nhiên, bốc hơi vẫn tác động đến độ mặn. Các giá trị tương quan giữa bốc hơi và độ mặn tăng dần từ MC0 đến P5. Tuy nhiên, giá trị tương quan tại MC4 lại giảm đáng kể so với các vị trí khác. Điều này khác biệt so với sự tương quan của lượng mưa.



Hình 3-24. Tương quan giữa độ mặn và bốc hơi mùa kiệt, 2015- 2019.

3.4.8. Yếu tố thủy văn

a) Mối tương quan giữa độ mặn và lưu lượng

Lưu lượng ảnh hưởng rất lớn tới độ mặn, các vị trí MC0, MC3, P1 và MC4 có mức độ tương quan rất tốt (cao nhất tại MC0 có hệ số tương quan chung đến 0,9445 giải thích được 89,21% sự thay đổi của độ mặn theo thời gian t tại thời kỳ phân tích đánh giá; thấp nhất tại P5 với hệ số tương quan chung là 0,309 chỉ giải thích được 9,55% sự thay đổi của độ mặn. Có thể thấy, lưu lượng là một trong những yếu tố tác động mạnh mẽ đến độ mặn cũng như phạm vi, nê m mặn xâm nhập mặn vùng sông Vệ (Hình 3-25)



Hình 3-25 Tương quan giữa độ mặn và lưu lượng mùa kiệt giai đoạn 2014-2019.

b) Mối tương quan giữa độ mặn và mực nước



Hình 3-26. Tương quan giữa độ mặn và mực nước vào mùa kiệt, 2015-2019.

Kết quả phân tích cho thấy, mực nước tác động không cao tới độ mặn. Các giá trị tương quan giữa các vị trí cũng không đều, tăng giảm không theo quy luật nhất định, nhưng các giá trị này không quá chênh lệch, giao động trong khoảng 0,01 – 0,07 đối với R và 0,001 – 0,007 đối với R^2 . Mực nước cũng chỉ giải thích được khoảng 0,03% - 0,8% sự thay đổi của độ mặn theo thời gian t trong thời kỳ phân tích đánh giá (Hình 3-26)

3.4.9. Yếu tố địa hình



Hình 3-27. Tương quan giữa độ mặn và độ sâu vào năm 2015 – 2019.

Các giá trị tương quan này đạt mức chấp nhận (hệ số tương quan chung là 0,5198) cho thấy độ sâu có tác động đáng kể tới độ mặn tại khu vực nghiên cứu. Yếu tố địa hình giải thích được 27,02% sự thay đổi của độ mặn theo thời gian t trong thời kỳ phân tích đánh giá. Vì vậy, có thể giải thích tại sao mặn ở sông Vệ lại truyền ít hơn so với các khu vực khác vì địa hình khu vực này khá cao. Đây chính là yếu tố thứ 3 trong ba yếu tố chi phối độ mặn cũng như xâm nhập mặn vùng sông Vệ (Hình 3-27).

3.5 Đề xuất giải pháp khai thác nước tại vùng cửa sông Vệ

3.5.1. Lựa chọn khả năng sử dụng nước theo không gian và thời gian

Hai bờ sông Vệ thuộc phạm vi mặn có thể truyền xa thuộc địa phận 2 huyện của Quảng Ngãi là Tư Nghĩa và Mộ Đức, đặc biệt là các thôn An Chuẩn, An Mô, xã Đức Lợi, huyện Mộ Đức; thôn Đại Bình, Thố Bình, Đồng Viên, Đông Mỹ, xã Nghĩa Hiệp, huyện Tư Nghĩa. Với thực tiễn sản xuất các địa phương này thì khả năng ứng dụng tốt nhất dự báo truyền mặn là khả năng lấy được nước ngọt phù hợp cho nuôi trồng thủy sản tại các mốc thời gian khác nhau trong mùa kiệt, thậm chí theo giờ trong ngày. Kết quả tính toán từ luận án này cho phép lên kế hoạch lấy nước ngọt trong mùa kiệt dọc theo sông. Dưới đây trình bày kết quả lấy nước dọc theo chiều dọc và độ sâu:

Vào mùa kiệt nhất (tháng 7), có thể lấy nước ngọt ở tầng trên (1.4 m) từ vị trí 4,75 km, tại khoảng cách này, nồng độ mặn chỉ đạt 0,5 ‰. Nếu yêu cầu độ mặn trong khoảng 1 ‰ – 0,5 ‰, có thể lấy trên tầng mặt ở mốc 3,75 km. Đây là kết quả có ý nghĩa thực tiễn đối với địa phương này. Điều này cho thấy kết quả của luận án có tính mới cho khu vực này và nếu sử dụng mô hình 1,2 chiều sẽ không thể cho ra kết quả như vậy.

Tại địa phương, trong thời gian qua đã phát triển nghề nuôi trồng thủy sản việc lấy nước lợ với độ mặn < 5‰ hoàn toàn có thể thực hiện trong phạm vi km, 2 tới km số 2,25 ở tầng mặn nước tới tầng cách mặt nước 4 – 5 m tùy vào vị trí lấy mẫu trên bờ, có thể lấy tới km số 6. Vật nuôi đòi hỏi độ mặn khác nhau tùy theo thời gian sinh trưởng nên việc lấy nước ngọt hay nước lợ có thể lựa chọn theo thời gian trong ngày (ví dụ lúc triều xuống, tại thời điểm chân triều).

3.5.2. Lựa chọn vị trí xây công trình cấp nước

Nguồn nước được sử dụng trên lưu vực sông Vệ được cung cấp từ hai nguồn chính là nước sông hồ và nước giếng. Vì vậy, khi xảy ra mặn sẽ ảnh hưởng trực tiếp và nhanh nhất tới tình hình nông nghiệp của vùng. Việc xây dựng mới cơ sở hạ tầng phục vụ cấp nước sản xuất nông nghiệp là vô cùng cần thiết, đáp ứng kịp thời và liên tục nhu cầu nước cho sản xuất, đặc biệt là vào mùa khô.

Hiện nay, khu vực cửa sông Vệ đã có công trình đê ngăn mặn hoạt động khá hiệu quả, nước trên đê được sử dụng phần lớn cho cấp nước nông nghiệp. Các kết quả từ nghiên cứu này có thể hỗ trợ cho các nhiệm vụ sau:

Đặc điểm hạ nguồn vùng cửa sông Vệ, hạn và xâm nhập mặn và mùa khô và lũ vào mùa mưa. Cần có hệ thống dẫn ngọt vào mùa khô thông qua các công trình nạo vét kênh rạch, tạo dòng chảy phổ cập nước ngọt và các hệ thống công thoát lũ để ngăn ngừa và giải quyết nhanh chóng vấn đề ngập lụt, giảm thiệt hại đến con người và cây trồng. Kết quả cho thấy, phụ thuộc vào mùa, xâm nhập mặn sẽ có diễn biến khác nhau. Từ kết quả tính toán cho mùa kiệt, có thể lựa chọn vị trí xây dựng công ngăn mặn, nếu chọn mốc 1‰ nên xây dựng công ngăn mặn tại km, 4, tính từ MC0. Nếu chọn mốc 0.5 ‰ có thể chọn mốc km 4.75. Kết quả trên vào cho phép thiết kế công để lấy được mặn ở mức độ cho phép đồng thời tối ưu được công trình xây dựng.

3.5.3. Lựa chọn vị trí hệ thống giám sát mặn tự động

Để xây dựng hệ thống giám sát mặn tự động để tránh nước mặn tràn vào, quản lý vận hành đóng mở công khi cần thiết, dựa trên kết quả luận án có thể đặt các thiết bị giám sát mặn ứng với mốc 1‰, cách cửa sông 4km với tầng mặt (đặt cách mặt nước - 1.5 m), mốc 0.5 ‰, cách cửa sông 5 km. Theo kết quả tính toán cho thời điểm kiệt nhất, mặn truyền tới trên tầng mặt.

3.5.4. Ứng dụng thiết kế trạm bơm

Kết quả của luận án mô phỏng 3D cho thấy xâm nhập mặn trên sông phụ thuộc vào chế độ thủy triều (cùng với đó là lưu lượng phía trên thượng nguồn). Cụ thể là nồng độ mặn thay đổi dọc theo sông, theo vị trí mặt cắt ngang, theo các lớp độ sâu. Do vậy để lấy được nước theo độ mặn cần thiết có thể xây dựng trạm bơm nổi di động. Theo kết quả tính toán theo 5 năm khí tượng, thủy văn, xây dựng được bản đồ nồng độ cho từng thời điểm và mốc thời gian để xây dựng kế hoạch cho trạm bơm di động. Cùng với việc di chuyển trạm bơm thì việc đặt ống hút nước cũng có thể xác định dựa trên kết quả của luận án.

Hai thời điểm chân triều và đỉnh triều trong thời kỳ triều thấp, đường đẳng trị mặn của năm mặn năm 2035 khác so hiện trạng. Đường đẳng trị mặn có xu hướng thoải và phân tầng rõ ràng theo độ sâu. Phạm vi truyền mặn sâu đáng kể, thời điểm chân triều lúc 3 giờ, trên lớp bề mặt sông, mặn truyền vào sâu 1,75km, lớp đáy sông thì mặn truyền sâu 5,25 km. Phạm vi truyền mặn tại khu vực nghiên cứu thời kỳ triều thấp ngày 20/07/2035 dao động trong khoảng 1,65 – 1,8 km tính từ bề mặt, 4,95 – 5,25 km tính từ đáy. Điều này cho thấy việc xây dựng công ngăn mặn, hay các giải pháp xây dựng công trình cấp nước, thiết kế trạm bơm là cấp thiết. Việc lựa chọn thời điểm cấp nước cần dựa trên kết quả khoa học. Đặc biệt, thời điểm mặn truyền sâu cần phải cho vận hành công ngăn mặn. Đây có thể coi là đóng góp mang tính thực tiễn của luận án này.

Kết luận chương

Các kết luận chương:

- Luận án đã tính toán tham số phân tầng dọc theo sông dựa trên số liệu thực đo vùng cửa sông Vệ. Từ kết quả tính toán cho thấy tại cửa sông Vệ diễn ra hiện tượng phân tầng mạnh. Đến vị trí MC4, cách cửa sông 6km, mặn không còn phân tầng và ổn định. Kết quả tính hệ số phân tầng phản ánh đúng bản chất về mặt lý thuyết là khi triều xuống dòng chảy sông mạnh sẽ làm hiện tượng phân tầng diễn ra mạnh hơn. Đồng thời, hiện tượng phân tầng ở MC3 diễn ra mạnh mẽ hơn MC0 do mặt cắt MC3 chịu tác động nhiều hơn của dòng chảy sông.
- Luận án đã sử dụng mô hình 3 chiều làm rõ cơ chế truyền mặn cho kịch bản hiện trạng, lấy 5 năm 2015 – 2019 khí tượng thủy văn thực hiện. Mô hình đã được hiệu chỉnh và kiểm định về mặt thủy lực, sử dụng số liệu thực đo tại trạm An Chi và sông Vệ, hiệu chỉnh mô hình truyền mặn dựa trên chuỗi số liệu đo mặn liên tục. Kết quả từ mô hình 3 chiều cho thấy năm mặn xuất hiện tại cửa sông Vệ trong cả 2 mùa nhưng thể hiện rõ nét hơn vào mùa khô.
- Kết quả chạy mô hình 3 chiều đã làm rõ cơ chế truyền mặn vào tháng kiệt và tháng mưa lũ. Kết quả cho thấy vào mùa kiệt, phạm vi truyền mặn có xu hướng giảm từ bờ trái qua bờ phải (theo hướng từ biển vào đất liền). Các năm mặn hình thành khá rõ nét, phía trên bề mặt nước, mặn truyền trong phạm vi (1.7 – 1.8

km), trong khi đó ở lớp đáy truyền đạt phạm vi (5 km – 5.25 km) phụ thuộc phía bờ trái, tim hay bờ phải. Trong khi đó vào mùa lũ, mặn hầu như không truyền sâu hơn mốc 400 m theo cả bờ trái, tim hay bờ phải.

- Kết quả chạy mô hình 3 chiều cũng cho phép phân tích xu thế truyền mặn theo mặt cắt ngang vào mùa kiệt. Kết quả đã phát hiện ra rằng thời kỳ triều thấp sự phân tầng diễn ra mạnh hơn thời kỳ triều cao. Tại cửa sông (mặt cắt MC0) mặn tăng dần từ trái qua phải, càng vào trong, tại MC3 mặn giảm dần từ trái qua phải.
- Luận án đã thực hiện phân tích xu thế truyền mặn theo mặt bằng các lớp chiều sâu. Đã phát hiện ra rằng, phạm vi truyền mặn lớn nhất rơi vào 2 thời điểm chân triều và đỉnh triều của thời kỳ triều thấp, phạm vi truyền mặn nhỏ nhất rơi vào thời điểm đỉnh triều của thời kỳ triều cao.
- Luận án đã thực hiện đánh giá cơ chế truyền mặn cho kịch bản biến đổi khí hậu. Kết quả chạy mô hình 3 chiều cho thấy cũng như giai đoạn 2015 - 2019, mặn năm 2035 truyền tương đối đồng bộ vào các bờ trái, tim sông và bờ phải. Tuy nhiên, phạm vi xâm nhập mặn năm 2035 vào mùa khô không có sự khác biệt nhiều so với năm 2018. Tuy nhiên, vào mùa mưa 2035 mặn truyền sâu vào 2.75 km, trong khi vào năm 2018 mặn chưa truyền tới MC0. Nguyên nhân là do lượng mưa năm 2035 giảm so với các năm 2015 - 2019, làm suy giảm dòng chảy thượng nguồn cho nên dòng chảy sông không đủ lớn để đẩy mặn, kết hợp với nước biển dâng nên cũng không đủ lớn để gây sự xáo trộn tạo ra các nêm mặn rõ nét như các năm 2015 - 2019.
- Luận án đã xây dựng mối liên hệ giữa độ mặn và 3 yếu tố: khí tượng, thủy văn và địa hình, trong 5 năm 2015 – 2019. Kết quả cho phép đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố như sau: địa hình, thủy văn và cuối cùng là khí tượng. Nói cách khác, xâm nhập mặn (phạm vi, mức độ mặn) tại sông Vệ phụ thuộc vào cả 3 yếu tố nhưng yếu tố địa hình đứng đầu tiên về sự tương quan.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Luận án thực hiện các nội dung được hội đồng đào tạo thông qua tại bảo vệ đề cương. Nghiên cứu sinh đã tiếp thu nghiêm túc, chỉnh sửa, bổ sung, làm rõ kết quả đạt được dựa trên đóng góp ý kiến từ các thành viên hội đồng hội thảo cũng như hội đồng bảo vệ cấp bộ môn. Trong những năm gần đây, xâm nhập mặn đang trở thành thách thức với các vùng duyên hải miền Trung, khi đi sâu vào nội địa đã ảnh hưởng tới sản xuất nông nghiệp, sinh hoạt của người dân. Cùng với đó, những diễn biến thất thường của biến đổi khí hậu có thể gia tăng theo xu thế trầm trọng vấn đề xâm nhập mặn. Do vậy, việc nghiên cứu dự báo xâm nhập mặn theo kịch bản BĐKH là cần thiết. So với các nghiên cứu trước đây, sử dụng mô hình 1 chiều không cho phép làm rõ cấu trúc truyền mặn vùng cửa sông. Hiện chưa có nghiên cứu nào được thực hiện có sử dụng mô hình 3 chiều. Do vậy, nghiên cứu sinh đã lựa chọn mô hình 3 chiều với mong muốn tìm ra kết quả mới cho các con sông thuộc miền Trung. Kết quả của nghiên cứu sinh sẽ giúp các nhà quản lý có được cơ sở khoa học và để áp dụng vào thực tiễn được luận chứng hơn. Luận án này là sự nỗ lực của nghiên cứu sinh trong 7 năm qua (2016 – 2023) vẫn còn nhiều tồn tại, hạn chế, đặc biệt là ở khâu thu thập số liệu. Những kết quả chính và đóng góp của nghiên cứu sinh thể hiện như sau:

1. Thiết lập được mô hình toán học tính toán mô phỏng xâm nhập mặn vùng cửa sông Vệ - một con sông đặc thù cho miền Trung. Đã làm rõ cơ chế truyền mặn, cũng như sự hình thành các nêm mặn, sự phát triển của nêm mặn tại vùng cửa sông Vệ. Đã lựa chọn ba phương án phân tích, gồm theo tuyến, theo mặt cắt ngang và theo tầng. Để làm rõ hiện trạng xâm nhập mặn, đã lựa chọn xuất kết quả theo mùa: khô và mưa, bên cạnh đó đã phân tích theo tháng kiệt nhất để làm rõ phạm vi truyền mặn.
2. Trong quá trình phân tích sự hình thành và phát triển nêm mặn trong giai đoạn 2015 – 2019 đã phát hiện ra rằng trong hai thời điểm chân triều và đỉnh triều của thời kỳ triều thấp đều xuất hiện nêm mặn cách cửa sông 200-300m, các nêm mặn này xuất hiện rõ nét ở thời điểm chân triều sau. Các nêm mặn vẫn tiếp tục xuất

hiện trong thời điểm chân triều của thời kỳ triều cao. Dòng chảy sông mạnh làm xáo trộn với dòng chảy biển tạo nên các “lỗ trùng” gây xuất hiện các nê m mặn.

3. Đã phân tích sự hình thành các nê m mặn trong kịch bản BĐKH cho năm 2035. Đã phân tích sự khác nhau về truyền mặn năm 2035 so với giai đoạn hiện trạng 2015 - 2019. Theo kịch bản BĐKH, lượng mưa giảm, bốc hơi tăng làm cho lưu lượng thường nguồn giảm đáng kể nên dòng chảy sông giảm. Mặc khác, theo kịch bản biến đổi khí hậu, mực nước tăng 15cm nên dòng chảy biển đẩy mặn mạnh hơn so với giai đoạn 2015 - 2019.
4. Yếu tố địa hình tác động mạnh mẽ đến xâm nhập mặn vùng cửa sông Vệ. Khu vực cửa sông Vệ dốc và nông chính là “đập” ngăn mặn truyền sâu vào nhánh sông. Yếu tố thủy văn cũng tác động trực tiếp đến phạm vi truyền mặn, mức độ tác động của yếu tố lưu lượng và mực nước tỉ lệ nghịch với nhau, vào mùa khô, mực nước tác động nhiều hơn, đến mùa mưa thì lưu lượng tác động đáng kể hơn. Yếu tố khí tượng gián tiếp tác động đến xâm nhập mặn của khu vực nghiên cứu. Các yếu tố lượng mưa và bốc hơi gây tác động đến lưu lượng, từ đó dẫn đến sự thay đổi bức tranh truyền mặn.

Kiến nghị

Trong luận án, các mô hình thủy văn, thủy lực và truyền mặn được sử dụng. Đây là các mô hình động lực được nhiều tác giả nghiên cứu nên có cơ sở vững chắc, có độ tin cậy cao và giúp giải quyết các nhiệm vụ mô phỏng truyền mặn trong trường hợp BĐKH.

Vai trò của bộ số liệu thực đo tại An Chỉ (thủy văn), Ba Tơ (khí tượng), sông Vệ (mực nước), Quảng Ngãi (khí tượng) rất quan trọng, giúp các bước hiệu chỉnh, kiểm định mô hình thủy văn. Bộ số liệu thực đo này cần được tiếp tục thu thập để hiệu chỉnh và kiểm định tiếp tục kết quả chạy mô hình. Có như vậy mới có thể đánh giá bổ sung tác động của BĐKH tại lưu vực sông Vệ.

Việc đo đạc mặn, cần tiếp tục thực hiện các đợt đo đạc mới để kiểm định phạm vi, mức độ truyền mặn tại vùng cửa sông Vệ. Trong luận án, đã nỗ lực thực hiện 1 đợt đo cho năm 2018, chuỗi số liệu nhận được đóng vai trò quan trọng giúp hiệu chỉnh mô hình thủy lực, kiểm định mô hình truyền mặn đảm bảo độ tin cậy kết quả luận án.

Tác giả kiến nghị xem trường hợp khí hậu cực đoan trong tương lai khi lượng mưa giảm sâu, kết hợp với bốc hơi mạnh sẽ dẫn tới lưu lượng phía trên thượng nguồn có thể xuống thấp nhất gần bằng 0, dẫn tới mặn có thể truyền sâu vào đất liền.

Tác giả kiến nghị thực hiện điều tra khảo sát thực địa để thực tế hóa, cụ thể hóa các giải pháp thích ứng với BĐKH.

Tác giả kiến nghị thiết lập CSDL cho lưu vực sông Vệ nhằm rút ngắn thời gian thu thập và xử lý số liệu cho các nghiên cứu tiếp theo.

DANH MỤC CÁC CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

Bài đăng tạp chí

- [1] Lê Thị Mỹ Diệp, Bùi Huỳnh Anh, 2019. Ứng dụng mô hình diễn toán SWAT/NAM/MIKE xây dựng bộ thông số thủy văn và thủy lực phục vụ cho tính toán dòng chảy - trường hợp sông Vệ, Quảng Ngãi. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, vol. 700, no. 6, pp. 1–12, 2019.
- [2] Le Thi My Diep, 2020. Application of Mike/Swat for simulation of salt intrusion – a case study in Ve river, Quang Ngai province. *Lowland Technology International Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 258–267, 2020 (Scopus – 2020).
- [3] Lê Thị Mỹ Diệp, 2021. Mô phỏng sự phụ thuộc xâm nhập mặn và các yếu tố thủy văn bằng MIKE 3 – Trường hợp cửa sông Vệ, Quảng Ngãi. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, vol. 2021, no. 725, pp. 1–16, 2021, doi: 10.36335/VNHM.2021(725).1-16.
- [4] Le Thi My Diep, 2021. Linking hydrological, hydrodynamic models for saline intrusion assessment – applying for Ve river estuary as a case study. *Vietnam J. Hydrometeorology*. Vol. 9, 2021, pp. 87 – 101. 9/2021.

Bài đăng kỷ yếu hội thảo

- [5] Lê Thị Mỹ Diệp, Đặng Khả Nhi, Nguyễn Châu Mỹ Duyên, 2016. Đánh giá sự thay đổi tài nguyên môi trường nước mặt vùng duyên hải miền Trung do tác động của biến đổi khí hậu – Trường hợp Tỉnh Quảng Ngãi. The 3rd Scientific Conference: "Effective Management of Natural Resources and Environment for Green growth" - (SEMREGG 2016). 10 trang.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] Quốc hội Việt Nam (2013), *Luật phòng, chống thiên tai*, Văn phòng Chính phủ Việt Nam.
- [2] Thủ tướng Chính phủ (2021), *Quyết định quy định về dự báo, cảnh báo, truyền tin thiên tai và cấp độ rủi ro thiên tai*, Văn phòng Chính phủ Việt Nam.
- [3] Trần Thục, Nguyễn Xuân Hiền và Trần Hồng Thái (2010), “Nghiên cứu ảnh hưởng của mực nước biển dâng do biến đổi khí hậu đến xâm nhập mặn khu vực đồng bằng sông Hồng, sông Thái Bình”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 01, Tr 7–13.
- [4] Hoàng Văn Đại, Nguyễn Thị Hiền, Trần Duy Hiền và Nguyễn Quốc Khánh (2014), “Đánh giá độ nhạy một số tham số trong mô hình mô phỏng xâm nhập mặn hệ thống sông Mã”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 07, Tr 24–28.
- [5] Lã Thanh Hà, Dương Văn Khảm và Lê Huy Hà (2012), “Áp dụng mô hình thủy lực MIKE 11 để đánh giá nguy cơ xâm nhập mặn theo kịch bản nước biển dâng tỉnh Nam Định”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 01, Tr 30–38.
- [6] Hoàng Ngọc Quang (2016), “Mô phỏng xâm nhập mặn trên sông Trà Lý theo kịch bản biến đổi khí hậu”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 12, Tr 13–19.
- [7] Tô Văn Trường, Bùi Nam Sách, Nguyễn Văn Tuấn và Lê Viết Sơn (2019), “Đánh giá xâm nhập mặn vùng ven biển Bắc Bộ ứng với các kịch bản cấp nước thời kỳ đồ ải vụ Đông Xuân trên sông Hồng và đề xuất tiết kiệm nguồn nước từ các hồ chứa”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số 704, Tr 33–48.
- [8] TTKTTV tỉnh Quảng Ngãi (2018), *Báo cáo kết quả quan trắc khí tượng - thủy văn năm 2018*, Thành phố Quảng Ngãi, Việt Nam.
- [9] Ngô Mạnh Hà và Nguyễn Văn Nghĩa (2013), “Xu thế thay đổi của các yếu tố ảnh hưởng đến xâm nhập mặn ở Đồng bằng Sông Cửu Long”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 11, Tr 31–34.
- [10] Lê Thị Mỹ Diệp, Bùi Huỳnh Anh và Bùi Tá Long (2019), “Ứng dụng mô hình diễn toán SWAT/NAM/MIKE xây dựng bộ thông số thủy văn và thủy lực phục vụ cho tính toán dòng chảy – trường hợp sông Vệ, Quảng Ngãi”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 06, Tr 1–12.

- [11] Đỗ Đắc Hải (2020), “Đánh giá đặc tính phân tầng mặn vùng cửa sông Hậu qua số liệu thực đo và công thức thực nghiệm”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi Việt Nam*, Số 59, Tr 34–46.
- [12] Nguyễn Quang Hưng và Hoàng Anh Huy (2016), “Đánh giá mức độ xâm nhập mặn hạ lưu sông Cửu Long dưới tác động biến đổi khí hậu”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 03, Tr 48–55.
- [13] Lê Đức Thường và Huỳnh Thị Lan Hương (2013), “Đánh giá tác động của nước biển dâng đến xâm nhập mặn vùng hạ lưu sông Ba”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 01, Tr 38–46.
- [14] Đặng Thị Kim Nhung, Đặng Vi Nghiêm và Nguyễn Đức Hoàng (2015), “Đánh giá và dự báo hình thái xâm nhập mặn vùng hạ lưu sông Trà Khúc – sông Vệ”, *Tạp chí khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, Số 50, Tr 119–126.
- [15] Hoàng Văn Đại và Trần Hồng Thái (2014), “Nghiên cứu mô hình thủy động lực 1-2 chiều để dự báo xâm nhập mặn hạ lưu sông Mã”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 09, Tr 1–6.
- [16] Đinh Phùng Bảo (2017), “Xây dựng công nghệ dự báo dòng chảy cạn, xâm nhập mặn cho hệ thống sông Vu Gia - Thu Bồn”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 03, Tr 48–55.
- [17] Hoàng Thanh Sơn, Vũ Thị Thu Lan và Hoàng Ngọc Tuấn (2018), “Diễn biến xâm nhập mặn vùng hạ lưu hệ thống sông Vu Gia - Thu Bồn”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 02, Tr 37–45.
- [18] Trần Tuấn Hoàng, Võ Thị Thảo Vi, Phạm Thanh Long và Trần Thanh Tùng (2016), “Ảnh hưởng xâm nhập mặn đến quá trình lấy nước của nhà máy nước Tân Hiệp”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 06, Tr 15–20.
- [19] Nguyễn Kỳ Phùng, Nguyễn Thị Bảy, Trần Thị Kim và Lê Ngọc Tuấn (2017), “Nguy cơ xâm nhập mặn các sông chính tỉnh Đồng Nai trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 06, Tr 18–28.
- [20] Đặng Văn Dũng, Trần Đình Phương, Lê Thị Oanh và Trần Thành Công (2018), “Khai thác mô hình MIKE 11 trong dự báo, cảnh báo xâm nhập mặn vùng Đồng bằng sông Cửu Long”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 09, Tr 48–58.
- [21] Đoàn Quang Trí (2016), “Ứng dụng mô hình MIKE 11 mô phỏng và tính toán xâm

- nhập mặn cho khu vực Nam Bộ”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 11, Tr 39–46.
- [22] Lê Thị Phụng, Nguyễn Kỳ Phùng, Bùi Chí Nam, Trần Xuân Hoàng và Lê Ngọc Tuấn (2017), “Ảnh hưởng của biến đổi khí hậu Đến xâm nhập mặn ở tỉnh Vĩnh Long”, *Tạp chí Khoa học Biến đổi khí hậu*, Số 2, Tr 61–69.
- [23] Nguyễn Văn Đào và Phạm Thị Thanh Bình (2019), “Đánh giá thực trạng và tác động của biến đổi khí hậu đến xâm nhập mặn tỉnh Bến Tre”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 04, Tr 12–22.
- [24] Châu Trần Vĩnh (2013), “Xâm nhập mặn ở đồng bằng sông Cửu long dưới tác động của biến đổi khí hậu và đề xuất các giải pháp giảm thiểu”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 10, Tr 21–24.
- [25] Lương Văn Việt (2016), “Ảnh hưởng của ENSO đến khô hạn và xâm nhập mặn ở Đồng bằng sông Cửu Long”, *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Số tháng 05, Tr 12–18.
- [26] Viện quy hoạch thủy lợi. “*Quy hoạch phòng chống lũ và chỉnh trị sông Vệ (đoạn từ xã Hành Tín đến Cửu Lở) đến năm 2025, định hướng đến năm 2030*”. Báo cáo tổng hợp, 235 trang.
- [27] TTTN, Trung tâm Quy hoạch và Điều tra tài nguyên nước miền Trung. (2022). *Nghiên cứu quản lý tài nguyên nước lưu vực sông Vệ phục vụ phát triển bền vững nông nghiệp tỉnh Quảng Ngãi*. Báo cáo kết quả đề tài.

Tiếng Anh

- [28] H. Blanco and R. Lal, *Soil and Water Management*, Cham: Springer, 2023, ch. 6.
- [29] D. R. Cahoon et al., “How Plants Influence Resilience of Salt Marsh and Mangrove Wetlands to Sea-Level Rise,” *Estuaries and Coasts*, vol. 43, pp. 1–15, Mar. 2020. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12237-020-00834-w>
- [30] A. H. Elshorbagy and W. A. Al-Rawabdeh, *Coastal Aquifer Management: Monitoring, Modeling, and Case Studies*, Cham: Springer, 2023
- [31] Simpson, J.H., Brown, J., Matthews, J. and Allen, G., (1990), “Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification”, *Estuaries*,

- Vol 13, No 2, pp 125–132.
- [32] Alcérreca-Huerta, J.C., Callejas-Jiménez, M.E., Carrillo, L. and Castillo, M.M., (2019), “Dam implications on salt-water intrusion and land use within a tropical estuarine environment of the Gulf of Mexico”, *Science of The Total Environment*, Vol 652, pp 1102–1112.
 - [33] Unno, T., Kim, J., Kim, Y., Nguyen, S.G., Guevarra, R.B., Kim, G.P., Lee, J.H. and Sadowsky, M.J., (2015), “Influence of seawater intrusion on microbial communities in groundwater”, *Science of The Total Environment*, Vol 532, pp 337–343.
 - [34] Volkmar, K.M., Hu, Y. and Steppuhn, H., (1998), “Physiological responses of plants to salinity: A review”, *Canadian Journal of Plant Science*, Vol 78, No 1, pp 19–27.
 - [35] Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E.A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T. and Barry, D.A., (2013), “Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges”, *Advances in Water Resources*, Vol 51, pp 3–26.
 - [36] Pritchard, D.W., (1989), “Estuarine Classification – A Help or a Hindrance”, in *Estuarine Circulation*, B. J. Neilson, A. Kuo, and J. Brubaker, Eds. Totowa, NJ: Humana Press, pp 1–38.
 - [37] Largier, J.L., (1993), “Estuarine fronts: How important are they?”, *Estuaries*, Vol 16, No 1, pp 1–11.
 - [38] Geyer, W.R. and MacCready, P., (2014), “The estuarine circulation”, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol 46, No August, pp 175–197.
 - [39] Prandle, D., (1985), “On salinity regimes and the vertical structure of residual flows in narrow tidal estuaries”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol 20, No 5, pp 615–635.
 - [40] Liu, B., Peng, S., Liao, Y. and Wang, H., (2019), “The characteristics and causes of increasingly severe saltwater intrusion in Pearl River Estuary”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol 220, pp 54–63.
 - [41] Bowen, M.M., (2003), “Salt transport and the time-dependent salt balance of a partially stratified estuary”, *Journal of Geophysical Research*, Vol 108, No C5, pp 1–15.

- [42] Monismith, S.G., Kimmerer, W., Burau, J.R. and Stacey, M.T., (2002), “Structure and Flow-Induced Variability of the Subtidal Salinity Field in Northern San Francisco Bay”, *Journal of Physical Oceanography*, Vol 32, No 11, pp 3003–3019.
- [43] Prandle, D., (2006), “Dynamical controls on estuarine bathymetry: Assessment against UK database”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol 68, No 1, pp 282–288.
- [44] Rice, K.C., Hong, B. and Shen, J., (2012), “Assessment of salinity intrusion in the James and Chickahominy Rivers as a result of simulated sea-level rise in Chesapeake Bay, East Coast, USA”, *Journal of Environmental Management*, Vol 111, pp 61–69.
- [45] Andrews, S.W., Gross, E.S. and Hutton, P.H., (2017), “Modeling salt intrusion in the San Francisco Estuary prior to anthropogenic influence”, *Continental Shelf Research*, Vol 146, pp 58–81.
- [46] North, E.W., Chao, S.Y., Sanford, L.P. and Hood, R.R., (2004), “The influence of wind and river pulses on an estuarine turbidity maximum: Numerical studies and field observations in Chesapeake Bay”, *Estuaries*, Vol 27, No 1, pp 132–146.
- [47] Office of Naval Research, (1980), “Technical Report – A Compilation of Articles Reporting Research,” Seattle, Washington.
- [48] Scully, M.E., Friedrichs, C. and Brubaker, J., (2005), “Control of estuarine stratification and mixing by wind-induced straining of the estuarine density field”, *Estuaries*, Vol 28, No 3, pp 321–326.
- [49] Prandle, D. and Lane, A., (2015), “Sensitivity of estuaries to sea level rise: Vulnerability indices”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol 160, pp 60–68.
- [50] Chen, Q., Zhu, J., Lyu, H., Pan, S. and Chen, S., (2019), “Impacts of topography change on saltwater intrusion over the past decade in the Changjiang Estuary”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol 231, No January, p 106469.
- [51] Savenije, H.H.G., (1993), “Composition and driving mechanisms of longitudinal tidal average salinity dispersion in estuaries”, *Journal of Hydrology*, Vol 144, pp 127–141.
- [52] Festa, J.F. and Hansen, D.V., (1976), “A Two-dimensional Numerical Model of Estuarine Circulation: The Effects of Altering Depth and River Discharge”,

- Estuarine and Coastal Marine Science*, Vol 4, No 3, pp 309–323.
- [53] Kuijper, K. and Van Rijn, L.C., (2011), “Analytical and numerical analysis of tides and salinities in estuaries ; part II : salinity distributions in prismatic and convergent tidal channels”, *Ocean Dynamics*, Vol 61, pp 1743–1765.
 - [54] Lerczak, J.A., Geyer, W.R. and Ralston, D.K., (2009), “The Temporal Response of the Length of a Partially Stratified Estuary to Changes in River Flow and Tidal Amplitude”, *Journal Of Physical Oceanography*, Vol 39, No 4, pp 915–933.
 - [55] Maccready, P., Hetland, R.D. and Geyer, W.R., (2002), “Long-term isohaline salt balance in an estuary”, *Continental Shelf Research*, Vol 22, No 11–13, pp 1591–1601.
 - [56] Le Cozannet, G., Nicholls, R.J., Hinkel, J., Sweet, W.V., McInnes, K.L., Van de Wal, R.S.W., Slangen, A.B.A., Lowe, J.A. and White, K.D., (2017), “Sea level change and coastal climate services: The way forward”, *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol 5, No 4, pp 49.
 - [57] Chang, S.W., Clement, T.P., Simpson, M.J. and Lee, K.K, (2011), “Does sea-level rise have an impact on saltwater intrusion?”, *Advances in Water Resources*, Vol 34, No 10, pp 1283–1291.
 - [58] Neubauer, S.C., (2013), “Ecosystem Responses of a Tidal Freshwater Marsh Experiencing Saltwater Intrusion and Altered Hydrology”, *Estuaries and Coasts*, Vol 36, No 3, pp 491–507.
 - [59] Farmer, H.G., (1952), *On the Nature of Estuarine Circulation*. Woods Hole Oceanographic Institution.
 - [60] Fischer, H.B., (1972), “Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 53, No 4, pp 671–687.
 - [61] Harleman, D.R.F. and Thatcher, M.L., (1974), “Longitudinal Dispersion and Unsteady Salinity Intrusion in Estuaries”, *Houille Blanche*, Vol 29, No 1–2, pp 25–33.
 - [62] Chatwin, P.C., (1976), “Some remarks on the maintenance of the salinity distribution in estuaries”, *Estuarine and Coastal Marine Science*, Vol 4, No 5, pp 555–566.
 - [63] Kranenburg, (1986), “A time scale for Long - term salt intrusion in well - mixed

- estuaries”, *Journal of Physical Oceanography*, Vol 6, No July, pp 1329–1331.
- [64] MacCready, P., (2007), “Estuarine adjustment”, *Journal of Physical Oceanography*, Vol 37, No 8, pp 2133–2145.
- [65] Dijkstra, Y.M. and Schuttelaars, H.M., (2021), “Adjustment and Extension of the Hansen and Rattray Estuarine Classification Diagram”, *Journal of Physical Oceanography*, Vol 51, No 9, pp 2903–2913.
- [66] Ralston, D.K., Geyer, W.R. and Lerczak, J.A., (2008), “Subtidal salinity and velocity in the Hudson River estuary: Observations and modeling”, *Journal of Physical Oceanography*, Vol 38, No 4, pp 753–770.
- [67] DHI. (2013). MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM Advection - Dispersion Module, Scientific Documentation.
- [68] DHI. (2018). MIKE 21 & MIKE 3 flow model FM, Hydrodynamic and Transport Module , Scientific Documentation.
- [69] Mike 11. (2005). Encyclopedia of Hydrological Sciences.
<https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa252>.

PHỤ LỤC

Phụ lục 1. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng

a) Kết quả tính toán tham số n tại MC0

Bảng PL 1. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC0

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 0:00	13,6	0,580	13,020	1,836	III	08/10/2018 0:00	12,2	0,520	11,68	1,836	III
07/10/2018 1:00	15,7	0,870	14,83	1,790	III	08/10/2018 1:00	4,510	0,464	4,046	1,627	III
07/10/2018 2:00	16,6	1,028	15,572	1,767	III	08/10/2018 2:00	3,980	0,446	3,534	1,597	III
07/10/2018 3:00	18,7	1,19	17,51	1,761	III	08/10/2018 3:00	10,2	0,610	9,59	1,774	III
07/10/2018 4:00	19,3	1,18	18,12	1,770	III	08/10/2018 4:00	15,6	0,484	15,116	1,880	III

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 5:00	21,9	0,828	21,072	1,854	III	08/10/2018 5:00	19,8	0,778	19,022	1,849	III
07/10/2018 6:00	21,2	0,590	20,61	1,892	III	08/10/2018 6:00	23,8	0,948	22,852	1,847	III
07/10/2018 7:00	20,1	0,295	19,805	1,942	III	08/10/2018 7:00	23,9	1,090	22,81	1,826	III
07/10/2018 8:00	15,5	0,540	14,96	1,865	III	08/10/2018 8:00	23,3	1,070	22,23	1,824	III
07/10/2018 9:00	21,3	0,270	21,03	1,950	III	08/10/2018 9:00	23,3	1,090	22,21	1,821	III
07/10/2018 10:00	21,2	0,227	20,973	1,958	III	08/10/2018 10:00	23,5	0,765	22,735	1,874	III
07/10/2018 11:00	14,2	0,438	13,762	1,880	III	08/10/2018 11:00	22,0	0,637	21,363	1,887	III

Thời gian	Độ măn đáy	Độ măn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ măn đáy	Độ măn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 12:00	2,480	0,683	1,797	1,136	III	08/10/2018 12:00	20,1	0,749	19,351	1,856	III
07/10/2018 13:00	2,560	0,593	1,967	1,248	III	08/10/2018 13:00	15,6	1,220	14,38	1,710	III
07/10/2018 14:00	2,76	0,653	2,107	1,235	III	08/10/2018 14:00	9,580	1,530	8,05	1,449	III
07/10/2018 15:00	3,08	0,504	2,576	1,438	III	08/10/2018 15:00	9,330	1,640	7,69	1,402	III
07/10/2018 16:00	4,09	0,585	3,505	1,499	III	08/10/2018 16:00	2,530	1,500	1,03	0,511	II

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 17:00	1,96	0,436	1,524	1,272	III	08/10/2018 17:00	5,810	1,390	4,42	1,228	III
07/10/2018 18:00	11,8	0,603	11,197	1,806	III	08/10/2018 18:00	12,2	1,670	10,53	1,518	III
07/10/2018 19:00	12,3	0,808	11,492	1,753	III	08/10/2018 19:00	20,4	1,710	18,69	1,691	III
07/10/2018 20:00	13,6	1,130	12,47	1,693	III	08/10/2018 20:00	17,4	1,700	15,7	1,644	III
07/10/2018 21:00	15,7	2,360	13,34	1,477	III	08/10/2018 21:00	19,9	1,590	18,31	1,704	III

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 22:00	18,7	2,510	16,19	1,527	III	08/10/2018 22:00	21,5	1,800	19,7	1,691	III
07/10/2018 23:00	19,6	0,665	18,935	1,869	III	08/10/2018 23:00	21,2	1,760	19,44	1,693	III

b) Kết quả tính toán tham số n tại MC3

Bảng PL 2. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC3

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 0:00	3,700	1,300	2,4	0,960	II	08/10/2018 0:00	23,0	0,431	22,569	1,926	III
07/10/2018 1:00	23,5	1,478	22,022	1,763	III	08/10/2018 1:00	15,7	0,491	15,209	1,879	III
07/10/2018 2:00	17,1	0,660	16,44	1,851	III	08/10/2018 2:00	17,1	0,660	16,44	1,851	III
07/10/2018 3:00	12,1	0,540	11,56	1,829	III	08/10/2018 3:00	12,1	0,540	11,56	1,829	III
07/10/2018 4:00	27,3	0,602	26,698	1,914	III	08/10/2018 4:00	27,3	0,602	26,698	1,914	III
07/10/2018 5:00	14,1	0,808	13,292	1,783	III	08/10/2018 5:00	14,1	0,808	13,292	1,783	III
07/10/2018 6:00	1,301	0,234	1,067	1,390	III	08/10/2018 6:00	7,210	0,381	6,829	1,799	III

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 7:00	2,880	0,188	2,692	1,755	III	08/10/2018 7:00	20,7	0,304	20,396	1,942	III
07/10/2018 8:00	1,760	0,190	1,57	1,610	III	08/10/2018 8:00	10,3	0,461	9,839	1,829	III
07/10/2018 9:00	1,520	0,220	1,3	1,494	III	08/10/2018 9:00	13,0	0,379	12,621	1,887	III
07/10/2018 10:00	1,968	0,252	1,716	1,546	III	08/10/2018 10:00	21,3	0,551	20,749	1,899	III
07/10/2018 11:00	9,590	0,278	9,312	1,887	III	08/10/2018 11:00	22,4	0,512	21,888	1,911	III
07/10/2018 12:00	20,9	0,199	20,701	1,962	III	08/10/2018 12:00	25,6	0,61	24,99	1,907	III

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 13:00	25,1	0,206	24,894	1,967	III	08/10/2018 13:00	26,4	0,615	25,785	1,909	III
07/10/2018 14:00	25,5	0,191	25,309	1,970	III	08/10/2018 14:00	25,9	0,757	25,143	1,886	III
07/10/2018 15:00	23,5	0,164	23,336	1,972	III	08/10/2018 15:00	26,4	0,735	25,665	1,892	III
07/10/2018 16:00	15,4	0,141	15,259	1,964	III	08/10/2018 16:00	26,0	0,393	25,607	1,940	III
07/10/2018 17:00	0,733	0,291	0,442	0,863	II	08/10/2018 17:00	26,1	0,267	25,833	1,959	III

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 18:00	1,54	0,312	1,228	1,326	III	08/10/2018 18:00	1,540	0,312	1,228	1,326	III
07/10/2018 19:00	1,39	0,604	0,786	0,788	II	08/10/2018 19:00	1,390	0,604	0,786	0,788	II
07/10/2018 20:00	1,18	0,569	0,611	0,699	II	08/10/2018 20:00	2,510	1,150	1,36	0,743	II
07/10/2018 21:00	0,975	0,455	0,52	0,727	II	08/10/2018 21:00	2,070	1,350	0,72	0,421	II
07/10/2018 22:00	0,912	0,62	0,292	0,381	II	08/10/2018 22:00	2,500	1,200	1,3	0,703	II

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 23:00	0,862	0,421	0,441	0,687	II	08/10/2018 23:00	2,450	1,260	1,19	0,642	II

c) Kết quả tính toán tham số n tại MC4

Bảng PL 3. Kết quả đo đạc và tính toán tham số phân tầng n tại MC4

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 0:00	0,041	0,031	0,01	0,278	II	08/10/2018 0:00	0,033	0,034	-0,001	-0,03	I
07/10/2018 1:00	0,035	0,03	0,005	0,154	II	08/10/2018 1:00	0,035	0,033	0,002	0,059	I
07/10/2018 2:00	0,04	0,03	0,01	0,286	II	08/10/2018 2:00	0,034	0,033	0,001	0,030	I
07/10/2018 3:00	0,035	0,03	0,005	0,154	II	08/10/2018 3:00	0,035	0,033	0,002	0,059	I
07/10/2018 4:00	0,033	0,03	0,003	0,095	I	08/10/2018 4:00	0,034	0,033	0,001	0,030	I
07/10/2018 5:00	0,033	0,03	0,003	0,095	I	08/10/2018 5:00	0,034	0,031	0,003	0,092	I
07/10/2018 6:00	0,036	0,031	0,005	0,149	II	08/10/2018 6:00	0,035	0,033	0,002	0,059	I

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 7:00	0,034	0,03	0,004	0,125	II	08/10/2018 7:00	0,033	0,034	-0,001	-0,03	I
07/10/2018 8:00	0,033	0,029	0,004	0,129	II	08/10/2018 8:00	0,034	0,034	0	0,000	I
07/10/2018 9:00	0,035	0,029	0,006	0,188	II	08/10/2018 9:00	0,033	0,033	0	0,000	I
07/10/2018 10:00	0,034	0,03	0,004	0,125	II	08/10/2018 10:00	0,033	0,031	0,002	0,063	I
07/10/2018 11:00	0,035	0,031	0,004	0,121	II	08/10/2018 11:00	0,033	0,032	0,001	0,031	I
07/10/2018 12:00	0,036	0,03	0,006	0,182	II	08/10/2018 12:00	0,034	0,032	0,002	0,061	I

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 13:00	0,035	0,031	0,004	0,121	II	08/10/2018 13:00	0,035	0,032	0,003	0,090	I
07/10/2018 14:00	0,035	0,031	0,004	0,121	II	08/10/2018 14:00	0,036	0,034	0,002	0,057	I
07/10/2018 15:00	0,033	0,032	0,001	0,031	I	08/10/2018 15:00	0,034	0,034	0	0,000	I
07/10/2018 16:00	0,035	0,034	0,001	0,029	I	08/10/2018 16:00	0,036	0,036	0	0,000	I
07/10/2018 17:00	0,035	0,032	0,003	0,090	I	08/10/2018 17:00	0,036	0,036	0	0,000	I

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 18:00	0,035	0,032	0,003	0,090	I	08/10/2018 18:00	0,035	0,035	0	0,000	I
07/10/2018 19:00	0,033	0,031	0,002	0,063	I	08/10/2018 19:00	0,035	0,034	0,001	0,029	I
07/10/2018 20:00	0,033	0,032	0,001	0,031	I	08/10/2018 20:00	0,035	0,034	0,001	0,029	I
07/10/2018 21:00	0,033	0,032	0,001	0,031	I	08/10/2018 21:00	0,035	0,035	0	0,000	I
07/10/2018 22:00	0,033	0,032	0,001	0,031	I	08/10/2018 22:00	0,035	0,035	0	0,000	I

Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại	Thời gian	Độ mặn đáy	Độ mặn mặt	ΔS	n	Phân loại
07/10/2018 23:00	0,862	0,421	0,441	0,687	II	08/10/2018 23:00	2,450	1,260	1,19	0,642	II

Phụ lục 2. Các thiết bị và hình ảnh đo đạc

- Thời gian: Từ ngày 7/10 đến 10/10/2018. Trong đó, đo các yếu tố thủy văn từ 0h ngày 7-10 đến 23h ngày 8-10-2018 và đo mặt cắt ngang và dẫn nổi độ cao từ ngày 9-10 đến 10-10-2018

- Địa điểm đo: Hạ lưu cầu Sông Vệ (tỉnh Quảng Ngãi)

- Trang thiết bị máy móc: Máy đo lưu lượng nước tự động ADCP (Mỹ); Máy thủy chuẩn NA2 Leica, LEICA (TC805), Máy đo sâu hồi âm HONDEX PS-7 (Nhật); máy đo độ mặn; mia địa hình; Máy GPS cầm tay; la bàn.

- Đơn vị thực hiện: Đoàn khảo sát Khí tượng thủy văn II- Liên đoàn khảo sát Khí tượng thủy văn.



Hình PL1. Hình ảnh đo thủy trực và độ mặn



Hình PL2. Hình khảo sát tại Đức Lợi, Tp Quảng Ngãi lúc 11:30 ngày 09/10/2018



