

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP & PTNT

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



ĐỒ ĐẮC HẢI

**NGHIÊN CỨU CƠ CHẾ XÂM NHẬP MẶN VÀ ĐỀ XUẤT MỘT SỐ
GIẢI PHÁP KHAI THÁC NƯỚC HỢP LÝ CHO VÙNG CỬA SÔNG
VEN BIỂN ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Thành phố Hồ Chí Minh - Năm 2022

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ NÔNG NGHIỆP VÀ PTNT

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

ĐỒ ĐẮC HẢI

**NGHIÊN CỨU CƠ CHẾ XÂM NHẬP MẶN VÀ ĐỀ XUẤT MỘT SỐ
GIẢI PHÁP KHAI THÁC NƯỚC HỢP LÝ CHO VÙNG CỬA SÔNG
VEN BIỂN ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG**

NGÀNH: KỸ THUẬT TÀI NGUYÊN NƯỚC
MÃ NGÀNH: 9 58 02 12

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

CÁN BỘ HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

1. PGS.TS HUỲNH THANH SƠN
2. GS.TSKH NGUYỄN ÂN NIÊN

Thành phố Hồ Chí Minh - Năm 2022

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu khoa học độc lập của riêng tôi. Các thông tin, số liệu sử dụng phân tích trong luận án có nguồn gốc rõ ràng, được trích dẫn theo đúng quy định. Kết quả nghiên cứu trong luận án do tôi thực hiện, phân tích một cách trung thực, khách quan và phù hợp với thực tiễn của Việt Nam. Các kết quả này chưa từng được công bố trong bất kỳ nghiên cứu nào khác.

Nghiên cứu sinh

Đỗ Đức Hải

LỜI CẢM ƠN

Với lòng kính trọng và biết ơn sâu sắc, lời đầu tiên tác giả xin gửi lời cảm ơn đến hai thầy hướng dẫn là PGS.TS Huỳnh Thanh Sơn và GS.TSKH Nguyễn Ân Niên đã tận tâm hướng dẫn nghiên cứu sinh từ những bước đi đầu tiên xây dựng ý tưởng cũng như trong suốt quá trình nghiên cứu thực hiện và hoàn thiện luận án.

Tác giả xin chân thành cảm ơn Cơ sở đào tạo Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, Trung tâm Nghiên cứu Tài nguyên Nước, Lãnh đạo và đồng nghiệp trong Viện đã luôn động viên và hỗ trợ tạo điều kiện giúp đỡ tác giả để hoàn thành các nghiên cứu của luận án. Đồng thời cũng xin cảm ơn sự giúp đỡ quý báu của các nhà khoa học, các bạn đồng nghiệp ngoài cơ sở đào tạo.

Tác giả cũng xin gửi lời cảm ơn tới PGS.TS Nguyễn Nghĩa Hùng, người đã luôn động viên, giúp đỡ nhiệt tình trong quá trình thực hiện đặc biệt là quá trình khảo sát hiện trường và cung cấp nhiều số liệu, tài liệu giúp nghiên cứu sinh hoàn thành nghiên cứu.

Cuối cùng, tác giả xin gửi lời cảm ơn tới toàn thể gia đình đã luôn động viên, cổ vũ, khích lệ trong suốt quá trình nghiên cứu và hoàn thành luận án.

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU.....	1
1. Tính cấp thiết của đề tài luận án.....	1
2. Mục đích nghiên cứu	4
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	4
4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu.....	4
4.1. Cách tiếp cận.....	4
4.2. Phương pháp nghiên cứu.....	5
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án.....	6
5.1 Ý nghĩa khoa học	6
5.2 Ý nghĩa thực tiễn.....	7
6. Những đóng góp mới của luận án.....	7
7. Cấu trúc luận án.....	7
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU.....	9
1.1. Tổng quan về xâm nhập mặn tại đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL)	9
1.1.1. Các hướng chính xâm nhập mặn vào vùng ĐBSCL [14]	10
1.1.2. Vùng cửa sông Cửu Long [14].....	12
1.1.3. Vùng bán đảo Cà Mau [14]	13
1.1.4. Vùng Tứ giác Long Xuyên (TGLX)	14
1.1.5. Đánh giá chung về diễn biến xâm nhập mặn tại ĐBSCL [14].....	15
1.2. Tổng quan các nghiên cứu ở nước ngoài.....	16
1.2.1. Phân loại cửa sông	17
1.2.1.1. Một số định nghĩa và khái niệm về vùng cửa sông.....	17
1.2.1.2. Phân loại cửa sông theo chế độ dòng chảy (tương tác mặn, ngọt).....	19
1.2.2. Tính chất của nước vùng cửa sông ven biển (phương trình trạng thái) [22].....	21
1.2.3. Các yếu tố chính tác động đến cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông	23
1.2.4. Các nghiên cứu liên quan đến cửa sông phân tầng hoàn toàn.....	25
1.2.4.1. Các đặc tính của cửa sông phân tầng (nêm mặn) [32].....	25
1.2.4.2. Chuyển động khi triều lên trong cửa sông phân tầng (nêm mặn) [32]	26
1.2.4.3. Chuyển động khi triều xuống trong cửa sông phân tầng [18], [32]	27

1.2.4.4. Các nghiên cứu về mặt phân cách tại các cửa sông phân tầng [24], [27], [32], [38]	29
1.2.5. Các nghiên cứu liên quan đến cửa sông phân tầng một phần [25], [32], [40], [42], [43], [44].....	30
1.2.6. Một số nghiên cứu tính toán điển hình về cơ chế xâm nhập mặn.....	33
1.3. Các nghiên cứu trong nước	34
1.3.1. Các nghiên cứu lý thuyết về thủy lực và xâm nhập mặn	35
1.3.2. Các nghiên cứu ứng dụng thực tế về xâm nhập mặn	38
1.3.3. Các nghiên cứu về công trình kiểm soát mặn và hút ngọt.....	43
1.4. Kết luận Chương 1	45
CHƯƠNG 2: CÁC NGHIÊN CỨU CƠ CHẾ PHÂN TẦNG VÙNG CỬA SÔNG VEN BIỂN VÀ KHẢ NĂNG ÁP DỤNG CHO VÙNG ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG.....	47
2.1. Cơ chế cấu tạo chung của nêm mặn vùng cửa sông [17], [19], [20], [23], [34].....	47
2.2. Các tham số kinh nghiệm xác định sự phân tầng cửa sông.....	53
2.3. Ứng dụng các tham số kinh nghiệm sơ bộ xác định cơ chế phân tầng vùng cửa sông ĐBSCL.....	57
2.3.1. Tính toán cho các nhánh sông dựa trên tham số Simmons (η)	58
2.3.1.1. Kết quả tính toán cho các nhánh sông.....	60
2.3.1.2. Đánh giá chung về kết quả tính toán sơ bộ phân tầng theo η trên các nhánh sông Cửu Long.....	62
2.3.2. Tính toán phân tầng theo tham số n	64
2.3.2.1. Kết quả tính toán (n) cho nhánh Định An.....	65
2.3.2.2. Kết quả tính toán (n) cho nhánh Trần Đề.....	68
2.3.2.3. Đánh giá chung cho 2 nhánh sông.....	71
2.3.3. Xác định các tiêu chí phù hợp cho các cửa sông ĐBSCL	71
2.4. Mô hình toán số trong nghiên cứu xâm nhập mặn.....	72
2.4.1. Mô hình 1 chiều (1D)	73
2.4.2. Mô hình 2 chiều (2D)	73
2.4.3. Mô hình ba chiều (3D)	74
2.5. Lựa chọn phương pháp, công cụ nghiên cứu	75

2.6. Kết luận Chương 2.....	76
CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN VỀ CƠ CHẾ XÂM NHẬP MẶN TẠI VÙNG CỬA SÔNG HẬU	78
3.1. Lựa chọn mô hình và đối tượng nghiên cứu điển hình	78
3.2. Xây dựng mô hình nghiên cứu tính toán	78
3.2.1. Sơ đồ tính	78
3.2.2. Các số liệu đầu vào	79
3.2.2.1. Số liệu địa hình nền	79
3.2.2.2. Điều kiện biên mô hình.....	80
3.2.2.3. Thiết lập thông số sóng gió.....	84
3.2.2.4. Thiết lập các thông số mô hình	85
3.2.3. Hiệu chỉnh mô hình	86
3.2.3.1. Số liệu hiệu chỉnh mô hình.....	86
3.2.3.2. Kết quả hiệu chỉnh mô hình	89
3.3. Kết quả tính toán và thảo luận	95
3.3.1. Kết quả tính toán và phân tích mặn theo các thời kỳ trong mùa kiệt.....	95
3.3.1.1. Thời kỳ phân tích đánh giá	95
3.3.1.2. Tuyến trích xuất kết quả	96
3.3.1.3. Thời kỳ triều thấp	97
3.3.1.4. Thời kỳ triều cao.....	100
3.3.2. Kết quả tính toán và phân tích mặn dọc theo hai nhánh sông	103
3.3.2.1. Thời điểm phân tích kết quả.....	103
3.3.2.2. Đánh giá diễn biến xâm nhập mặn trong một con triều	105
3.3.2.3. Thời kỳ thủy triều kém từ ngày 2-5/3.....	109
3.3.2.4. Thời kỳ triều trung bình từ ngày 7-8/3	113
3.3.2.5. Thời kỳ triều cao từ ngày 10-13/3	116
3.3.2.6. Đánh giá chung về kết quả tính toán, phân tích dọc theo sông.....	120
3.3.3. Kết quả phân bố mặn trên mặt cắt ngang sông	122
3.3.4. Kết quả phân bố mặn theo mặt bằng theo các lớp chiều sâu.....	126
3.3.5. Kết quả tính toán trong trường hợp nước biển dâng mùa kiệt.....	129

3.3.5.1. Kết quả phân tích đánh giá cho nhánh Định An	129
3.3.5.2. Kết quả phân tích đánh giá cho nhánh Trần Đề	132
3.3.6. Kết quả tính toán cho mùa lũ	134
3.3.7. Đánh giá tác động của yếu tố địa hình tới xâm nhập mặn.....	137
3.4. Kết luận Chương 3	138
CHƯƠNG 4: ĐỊNH HƯỚNG CƠ SỞ ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP KHAI THÁC NƯỚC HỢP LÝ CHO VÙNG CỬA SÔNG VEN BIỂN ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG.....	140
4.1. Khác biệt của kết quả nghiên cứu so với tính toán xâm nhập mặn hiện nay.....	140
4.2. Lựa chọn khả năng lấy nước theo không gian và thời gian.....	141
4.2.1. Lựa chọn thời điểm lấy nước	141
4.2.2. Khả năng lấy nước theo chiều dọc và chiều sâu	142
4.2.3. Lựa chọn vị trí lấy nước trên mặt bằng.....	142
4.2.4. Khả năng lấy nước trên mặt cắt ngang	143
4.3. Ứng dụng vào trong thiết kế, vận hành công trình	144
4.3.1. Ứng dụng vào thiết kế, nâng cấp vận hành cống kiểm soát mặn.....	144
4.3.2. Ứng dụng vào thiết kế trạm bơm lấy nước phục vụ sản xuất.....	145
4.4. Kết luận Chương 4.....	146
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	147
1. Kết luận.....	147
2. Kiến nghị	148
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ.....	150
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO	151
PHẦN PHỤ LỤC	156

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1-1: Chiều sâu xâm nhập mặn lớn nhất năm 2016, 2020 và TBNN [14]	15
Bảng 2-1: Một số tiêu chí xác định khả năng phân tầng mặn vùng cửa sông	57
Bảng 2-2: Các nhánh sông phân tích tính toán	60
Bảng 2-3: Tổng hợp so sánh hệ số η trên các nhánh sông Cửu Long.....	63
Bảng 2-4: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Định An (ngày 31/3/2016) khi triều lên (HWS)	65
Bảng 2-5: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Định An (ngày 01/4/2016) khi triều lên (HWS)	66
Bảng 2-6: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Định An (ngày 31/3/2016) khi triều xuống (LWS)	67
Bảng 2-7: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Định An (ngày 01/4/2016) khi triều xuống (LWS)	67
Bảng 2-8: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Trần Đề (ngày 31/3/2016) khi triều lên (HWS)	68
Bảng 2-9: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Trần Đề (ngày 01/4/2016) khi triều lên (HWS)	69
Bảng 2-10: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Trần Đề (ngày 31/3/2016) khi triều xuống (LWS)	69
Bảng 2-11: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Trần Đề (ngày 01/4/2016) khi triều xuống (LWS)	70
Bảng 3-1: Tổng hợp thông số thiết lập mô hình 3 chiều.....	86
Bảng 3-2: Kết quả tính toán tương quan R^2 và NSE trong hiệu chỉnh mô hình	95
Bảng 3-3: Các thời điểm trích kết quả trong mùa kiệt	96
Bảng 3-4: Các thời điểm trích kết quả trong mùa kiệt.....	104
Bảng 3-5: Một số tóm tắt kết quả về phân tầng mặn theo chiều dọc sông	121

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1: Bản đồ xâm nhập mặn ĐBSCL mùa khô 2015-2016	2
Hình 1-1: Vùng ảnh hưởng mặn và phân vùng giám sát mặn [14].....	10
Hình 1- 2: Hướng xâm nhập mặn tại các cửa sông vùng ĐBSCL [14]	11
Hình 1-3: Phạm vi xâm nhập mặn (4g/l) lớn nhất vùng cửa sông Cửu Long [14] ...	12
Hình 1-4: Phạm vi xâm nhập mặn (4g/l) lớn nhất vùng Bán đảo Cà Mau [14].....	14
Hình 1-5: Phạm vi xâm nhập mặn (4g/l) lớn nhất vùng Tứ Giác Long Xuyên [14]	15
Hình 1-6: Biểu đồ xâm nhập mặn (4g/l) tại các cửa sông ĐBSCL [14]	16
Hình 1-7: Minh họa phân loại cửa sông dựa trên chế độ dòng chảy tuần hoàn [39]	18
Hình 1-8: Sơ họa cửa sông phân tầng mạnh	20
Hình 1-9: Sơ họa cửa sông hỗn hợp một phần.....	20
Hình 1-10: Sơ họa cửa sông hỗn hợp toàn phần	21
Hình 1-11: Sơ họa cấu trúc độ mặn theo phương đứng	21
Hình 1-12: Mối quan hệ giữa mật độ, độ mặn và nhiệt độ [22].....	22
Hình 1-13: Hình dạng đặc trưng của cửa sông phân tầng [32]	26
Hình 1-14: Thực nghiệm thiết lập để khảo sát xâm nhập mặn (Simpson, 1987) [36]...	27
Hình 1-15: Những phân bố trong các cửa sông Fraser khi triều xuống [32]	28
Hình 1- 16: Hình thành những lớp mỏng tại vị trí của một front [32].....	30
Hình 1-17: Sự hình thành một mặt phân cách xâm nhập thủy triều [32], [37]	30
Hình 1-18: Sự biến đổi theo thời gian trong phân bố độ mặn tại một vị trí cửa sông Tees [25]	32
Hình 1-19: Đập ngầm ngăn mặn trên sông Mississippi - Hoa Kỳ	34
Hình 1-20: Phân bố nồng độ mặn dọc sông Hậu ngày 01/4/2016 - khi triều xuống	42
Hình 2-1: Hệ thống hai lớp, dựa trên Schijf và Schönfeld (1953) [34]	47
Hình 2-2: Hình nêm mặn được phát triển bởi Schijf và Schonfeld [34].....	49
Hình 2-3: Hình dạng và cấu trúc bên trong nêm mặn [17]	52
Hình 2-4: So sánh chiều dài nêm mặn tính toán L_0/H_0 , trong phòng thí nghiệm và quan sát thực địa dưới dạng hàm số Reynolds R và số Froude F_0 ;	53
Hình 2-5: Minh họa lưu lượng dòng chảy sông (Q_+) và dòng chảy triều (Q_-)	58
Hình 2-6: Bản đồ các cửa sông Cửu Long.....	59

Hình 2-7: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh cửa Tiểu.....	60
Hình 2-8: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh Cửa Đại.....	60
Hình 2-9: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh Hàm Luông.....	61
Hình 2-10: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh Cổ Chiên.....	61
Hình 2-11: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh Cung Hầu.....	61
Hình 2-12: Kết quả tính toán η tại một số vị trí dọc sông Hậu - Định An.....	61
Hình 2-13: Kết quả tính toán η tại một số vị trí dọc sông Hậu - Trần Đề	62
Hình 2-14: Minh họa xu thế của hệ số η trong các thời kỳ triều	63
Hình 2-15: So sánh các giá trị η lớn nhất và nhỏ nhất trên các nhánh sông Mê Công..	64
Hình 2-16: Sơ đồ bố trí các điểm khảo sát dọc sông Hậu.....	65
Hình 2-17: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Định An ngày 31/3/2016 (khi HWS)	66
Hình 2-18: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Định An ngày 01/4/2016 (khi HWS)	66
Hình 2-19: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Định An ngày 31/3/2016 (khi LWS).....	67
Hình 2-20: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Định An ngày 01/4/2016 (khi LWS	68
Hình 2-21: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Trần Đề ngày 31/3/2016 (khi HWS)	69
Hình 2-22: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Trần Đề ngày 01/4/2016 (khi HWS)	69
Hình 2-23: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Trần Đề ngày 31/3/2016 (khi LWS).....	70
Hình 2-24: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Trần Đề ngày 01/4/2019 (khi LWS).....	70
Hình 3-1: Phạm vi và chia lưới tính toán cho vùng nghiên cứu	79
Hình 3-2: Địa hình khu vực nghiên cứu.....	80
Hình 3-3: Sơ họa các biên tính toán trong mô hình tính.....	81
Hình 3-4: Biên lưu lượng cho mô hình	81
Hình 3-5: Định dạng kiểu biên mực nước trong mô hình.....	82
Hình 3-6: Biên mực nước code 3	82
Hình 3-7: Biên mực nước code 4	82
Hình 3-8: Biên mặn trong mô hình	83
Hình 3-9: Giá trị nồng độ mặn vùng biển phía nam Việt Nam.....	84
Hình 3- 10: Trường gió theo phương U , V lúc 0 giờ (GMT) ngày 1/4/2016 được thu thập từ CFSR.....	85
Hình 3-11: Trường gió trong mô hình tính toán	85

Hình 3-12: Sơ đồ bố trí các điểm khảo sát dọc sông Hậu.....	87
Hình 3-13: Một số kết quả đo mặn theo chiều sâu dọc sông Hậu - Định An	87
Hình 3-14: Một số kết quả đo mặn theo chiều sâu dọc sông Hậu - Trần Đề.....	88
Hình 3-15: Phân bố nồng độ mặn dọc sông Hậu ngày 31/3/2016 - khi triều lên.....	88
Hình 3-16: Phân bố nồng độ mặn dọc sông Hậu 01/4/2016 - khi triều xuống	88
Hình 3-17: Một số vị trí đo mặn dùng để hiệu chỉnh mô hình.....	89
Hình 3-18: Mực nước thực đo mà mô phỏng tại trạm Mỹ Thanh	89
Hình 3-19: Mực nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T1	90
Hình 3-20: Mực nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T2	90
Hình 3-21: Mực nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T3	90
Hình 3-22: Mực nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T4	90
Hình 3-23: Mực nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T5	91
Hình 3-24: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại Đại Ngãi.....	91
Hình 3-25: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T1	91
Hình 3-26: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T2	92
Hình 3-27: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T3	92
Hình 3-28: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T4	93
Hình 3-29: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T5	93
Hình 3-30: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T6	94
Hình 3-31: Sơ họa tuyến trích kết quả dọc nhánh Định An, Trần Đề	96
Hình 3-32: Phân bố mặn dọc sông thời điểm chân triều (kỳ triều thấp).....	98
Hình 3-33: Phân bố mặn dọc sông thời điểm đỉnh triều (kỳ triều thấp)	100
Hình 3-34: Phân bố mặn dọc sông thời điểm chân triều (kỳ triều cao)	102
Hình 3-35: Phân bố mặn dọc sông thời điểm đỉnh triều (kỳ triều cao).....	103
Hình 3-36: Thủy triều trong tháng 3/2016 tại vùng cửa sông Hậu	105
Hình 3-37: Kết quả xâm nhập mặn trong ngày 4/3/2016- Nhánh Định An.....	107
Hình 3-38: Kết quả xâm nhập mặn trong ngày 4/3/2016- Nhánh Trần Đề	109
Hình 3-39: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 05h, 4/3/2016 (chân triều thấp)	109
Hình 3-40: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 13h, 4/3/2016 (đỉnh triều).....	110
Hình 3-41: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 17h, 4/3/2016 (chân triều cao).....	110

Hình 3-42: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 22h, 4/3/2016 (đỉnh triều).....	111
Hình 3-43: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 06h, 5/3/2016 (chân triều thấp)	111
Hình 3-44: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 09h, 7/3/2016 (chân triều thấp)	113
Hình 3-45: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 15h, 7/3/2016 (đỉnh triều).....	113
Hình 3-46: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 20h, 7/3/2016 (chân triều cao).....	114
Hình 3-47: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 02h, 8/3/2016 (đỉnh triều).....	114
Hình 3-48: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 10h, 8/3/2016 (chân triều thấp)	115
Hình 3-49: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 12h, 10/3/2016 (chân triều thấp) ..	116
Hình 3-50: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 17h, 10/3/2016 (đỉnh triều).....	117
Hình 3-51: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 0h, 11/3/2016 (chân triều cao).....	117
Hình 3-52: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 05h, 11/3/2016 (đỉnh triều).....	118
Hình 3-53: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 10h, 11/3/2016 (chân triều thấp) ..	118
Hình 3-54: Sơ họa tuyến cắt ngang.....	122
Hình 3-55: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Định An (triều thấp)	123
Hình 3-56: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Trần Đề (triều thấp)	124
Hình 3-57: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Định An (triều trung bình).....	124
Hình 3-58: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Trần Đề (triều trung bình)	125
Hình 3-59: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Định An (triều cao).....	125
Hình 3-60: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Trần Đề (triều cao)	125
Hình 3-61: Phân bố theo các lớp chiều sâu thời điểm chân triều (thấp).....	127
Hình 3-62: Phân bố theo các lớp chiều sâu thời điểm triều lên (nhánh cao)	127
Hình 3-63: Phân bố theo các lớp chiều sâu thời điểm đỉnh triều	128
Hình 3-64: Phân bố theo các lớp chiều sâu thời điểm triều xuống (nhánh cao)	128
Hình 3-65: So sánh phân bố mặn nhánh Định An - 09h, 7/3/2016 (chân triều thấp) ..	130
Hình 3-66: So sánh phân bố mặn nhánh Định An - 11h, 7/3/2016 (triều lên).....	130
Hình 3-67: So sánh phân bố mặn nhánh Định An -15h, 7/3/2016 (đỉnh triều).....	131
Hình 3-68: So sánh phân bố mặn nhánh Định An - 05h, 8/3/2016 (triều xuống)...131	
Hình 3-69: So sánh phân bố mặn nhánh Trần Đề - 09h, 7/3/2016 (chân triều thấp)... 132	
Hình 3-70: So sánh phân bố mặn nhánh Trần Đề - 11h, 7/3/2016 (triều lên)	133
Hình 3-71: So sánh phân bố mặn nhánh Trần Đề -15h, 7/3/2016 (đỉnh triều)	133

Hình 3-72: So sánh phân bố mặn nhánh Trần Đề - 05h, 8/3/2016 (triều xuống) ...	134
Hình 3-73: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 15h, 21/10/2015 (chân triều thấp)	135
Hình 3-74: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 22h, 21/10/2015 (đỉnh triều).....	136
Hình 3-75: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông, 04h - 22/10/2015 (chân triều cao)..	136
Hình 3-76: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 08h, 22/10/2015 (đỉnh triều).....	137
Hình 3-77: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 16h, 22/10/2015 (chân triều thấp)	137
Hình 4-1: Minh họa phạm vi lấy nước nồng độ mặn <4g/l khi sử dụng mô hình 3D .	142
Hình 4-2: Minh họa nồng độ mặn trên mặt bằng theo các tầng sâu	143
Hình 4-3: Minh họa nồng độ mặn trên mặt cắt ngang sông.....	143
Hình 4-4: Minh họa về phân tầng mặn và bố trí cao độ đáy lấy nước.....	144
Hình 4-5: Minh họa cửa van nhiều lớp và cửa van mẹ bông con	145
Hình 4-6: Trạm bơm nổi, di động Xuân Hòa, tỉnh Tiền Giang	146

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

BĐCM	Bán đảo Cà Mau
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
ĐBSCL	Đồng bằng sông Cửu Long
ĐN-SG	Đồng Nai - Sài Gòn
GIS	Hệ thống thông tin địa lý
HWS	Thời điểm nước ngưng khi đỉnh triều
LWS	Thời điểm nước ngưng khi chân triều
NBD	Nước biển dâng
NCS	Nghiên cứu sinh
TGLX	Tứ giác Long Xuyên
VCS	Vùng cửa sông
1D	Một chiều
2D	Hai chiều
3D	Ba chiều

BẢNG KÝ HIỆU KHOA HỌC CHỦ YẾU TRONG LUẬN ÁN

Ký hiệu	Đơn vị	Tên gọi của ký hiệu
S	g/l; ‰	Độ mặn
n	-	Tham số phân tầng theo D. Pritchard
S _m	g/l	Độ mặn trung bình
S _{bot}	g/l	Độ mặn tại tầng đáy
S _{surf}	g/l	Độ mặn tại tầng mặt
ΔS	g/l	Chênh lệch nồng độ mặn theo chiều đứng
α	-	Tham số phân tầng theo Simmons
Q _m	m ³ /s	Dòng chảy của sông trong thời kỳ triều xuống
W	m ³	Thể tích của dòng chảy từ sông trong một chu kỳ thủy triều
τ	s	Thời gian thủy triều xuống
P _t	m ³	Thể tích lắng trụ thủy triều
η	-	Tham số phân tầng Simmons cải tiến của GS.TSKH Nguyễn Ân Niên
W ⁺	m ³	Lượng dòng chảy sông trong một pha triều xuống
W ⁻	m ³	Lượng dòng chảy ngược (dòng triều) trong pha triều lên
Fr _p	-	Số Froude mật độ
V	m/s	Vận tốc dòng chảy
ρ	kg/m ³	Khối lượng riêng
E _p	-	Hệ số cửa sông được đề xuất bởi D. Harman và G. Abraham
R		Số Reynold
Ri _L	-	Hệ số cửa sông Richardson
T	h	Chu kỳ triều
R ²	-	Hệ số tương quan
NSE	-	Hệ số Nash-Sutcliffe
L	m	Chiều dài
H, h	m	Chiều sâu dòng chảy
B	m	Chiều rộng dòng chảy
g	m/s ²	Gia tốc trọng trường

MỞ ĐẦU

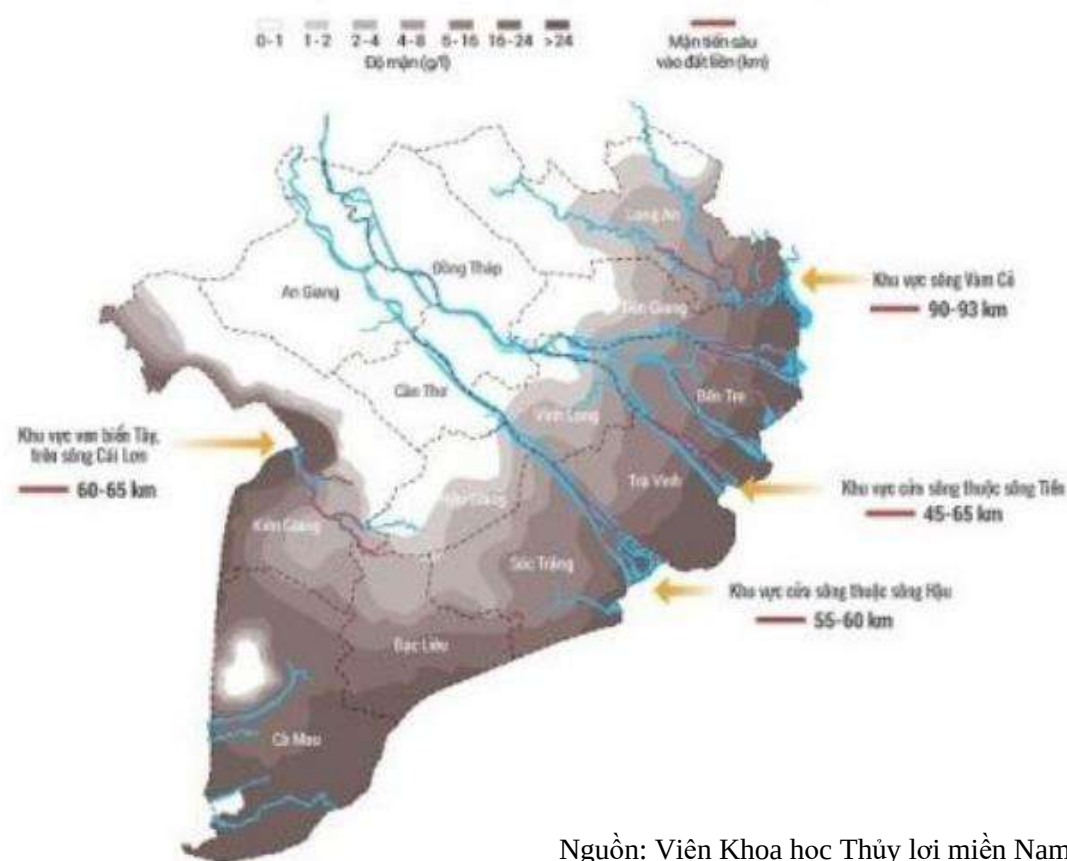
1. Tính cấp thiết của đề tài luận án

Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) có một vị trí quan trọng trong phát triển kinh tế xã hội và là chìa khóa trong chiến lược an ninh lương thực quốc gia và thế giới. Với tiềm năng nông nghiệp, thủy sản to lớn trong những năm qua, ĐBSCL đã luôn đóng góp khoảng 53% tổng sản lượng lương thực, 65% sản lượng thủy sản nuôi trồng và 70% trái cây của cả nước. Từ năm 2005 đến nay, ĐBSCL luôn đạt trên 19 triệu tấn lúa và lượng xuất khẩu hằng năm từ 4-5 triệu tấn.

Tuy nhiên, do vị trí địa lý ĐBSCL nằm ở hạ nguồn sông Mê Công luôn chịu ảnh hưởng của thủy triều biển Đông và biển Tây, kết hợp với địa hình tự nhiên thấp trũng do đó ĐBSCL luôn phải đối mặt với những tác động tiêu cực của điều kiện tự nhiên đến sự phát triển kinh tế xã hội. Các tác động tiêu cực của điều kiện tự nhiên đến ĐBSCL bao gồm: tác động do lũ và ngập lụt với diện tích khoảng 1,9 triệu ha vùng đầu nguồn; xâm nhập mặn vùng ven biển khoảng 1,4 triệu ha; đất phèn và sự lan truyền nước chua khoảng 1,2 triệu ha ở vùng trũng thấp; thiếu nước ngọt cho sản xuất nông nghiệp, thủy sản và sinh hoạt cho khoảng 2,1 triệu ha tại những vùng cửa sông ven biển, vùng xa sông gần biển (bán đảo Cà Mau); xói lở bờ sông rạch, ô nhiễm nguồn nước kể cả nước mặn và nước ngầm,... Đối với vùng cửa sông ven biển từ Tiền Giang đến Sóc Trăng và vùng bán đảo Cà Mau luôn chịu tác động của xâm nhập mặn. Diễn biến mặn trong khu vực khá phức tạp, độ mặn lớn nhất thường xuất hiện chủ yếu vào tháng III, IV hoặc tháng V do ảnh hưởng của thủy triều ở biển Đông, biển Tây hoặc cả hai. Ngoài ra, do lưu lượng dòng chảy từ thượng nguồn sông Mê Công đổ về ĐBSCL ngày càng có xu hướng thay đổi cũng là nhân tố chính ảnh hưởng đến tình hình xâm nhập mặn ở vùng cửa sông ven biển của ĐBSCL. Thủy triều là yếu tố động lực, mang nước biển kèm theo độ mặn đi sâu vào đất liền, ngày càng có xu thế gia tăng do nước biển dâng (NBD), trong khi lượng nước từ thượng lưu về bị tác động bởi nhiều yếu tố liên quan đến khai thác nước phía thượng nguồn và ngày càng có những thay đổi bất thường. Bên cạnh đó, trước diễn biến của biến đổi khí hậu lượng mưa có xu thế giảm, lượng nước bị bốc hơi tăng cũng là những yếu tố ảnh hưởng đến quá trình xâm nhập mặn. Ngoài những yếu tố tự nhiên thì yếu tố con người cũng góp

phần không nhỏ gây ra xâm nhập mặn như khai thác và sử dụng nước ngầm quá mức để đáp ứng nhu cầu phát triển, sản xuất và đời sống ở địa phương, thay đổi mục đích sử dụng đất cũng có ảnh hưởng nhất định đến tình hình xâm nhập mặn.

Xâm nhập mặn gây ra những hậu quả hết sức nặng nề, ảnh hưởng đến đời sống sinh hoạt, sản xuất của cả vùng ĐBSCL. Đặc biệt, năm 2016, 2020, diễn biến xâm nhập mặn tại ĐBSCL được đánh giá nặng nề nhất trong vòng 100 năm qua. Độ mặn có xu thế đến sớm hơn, ngay từ tháng II, độ mặn đã duy trì ở mức cao và nghiêm trọng. Trên sông Tiền và sông Hậu, độ mặn là trên 4,5‰, xâm nhập sâu tới 70 km tính từ cửa sông, thậm chí có nơi lên đến 85 km (trong khi theo Trung tâm phòng tránh và giảm nhẹ thiên tai thì độ mặn bằng 4,0‰ đã được coi là bị xâm nhập mặn).



Hình 1: Bản đồ xâm nhập mặn ĐBSCL mùa khô 2015-2016

Xâm nhập mặn tại vùng cửa sông có quan hệ mật thiết với chế độ thủy động lực học. Các pha truyền mặn trong sông biểu thị sự cân bằng giữa hai dòng chảy ngược chiều nhau, với một bên là lượng nước ngọt từ đất liền đẩy mặn thoát ra cửa sông và một bên là thủy triều từ biển đưa mặn vào cùng với sự khuếch tán của nước mặn từ

nơi có nồng độ mặn cao tới nơi có nồng độ mặn thấp, tạo thành một đường quan hệ độ mặn dọc sông có dạng hàm mũ, tắt dần khi vào phía trong sông. Xâm nhập mặn cũng có dao động lên xuống ngày hai lần theo sức đẩy trôi lên xuống của dòng chảy, sóng lưu lượng triều. Khi truyền vào trong sông, hiện tượng khuếch tán đóng một vai trò quan trọng trong việc đưa mặn vào sông xa hơn và tỏa ra toàn mặt cắt sông theo không gian và thời gian. Về lý thuyết, nếu dòng chảy êm, dòng chảy phân tầng, mặn sẽ ít bị xáo trộn mà tạo thành nêm mặn theo chiều dọc sông. Lúc này độ mặn trên một số mặt cắt bị phân tầng rõ rệt giữa trên mặt và dưới sâu, giữa dòng sông và hai bờ. Một số đo đạc cho thấy, trên các nhánh sông Cửu Long có xuất hiện sự phân tầng mặn vào một số thời điểm trong mùa kiệt. [28]

Xâm nhập mặn đối với ĐBSCL là một thách thức đối với phát triển kinh tế xã hội đặc biệt là phát triển nông nghiệp. Để phục vụ khai thác và phát triển ĐBSCL, đến thời điểm hiện tại đã có nhiều nghiên cứu về xâm nhập mặn cho vùng cửa sông ven biển. Các nghiên cứu đã được thực hiện khá sớm, ngay sau ngày thống nhất đất nước, từ những nghiên cứu ban đầu đơn giản bằng cách đo đạc, lấy mẫu giám sát đến những nghiên cứu chuyên sâu với những thiết bị, phương pháp nghiên cứu hiện đại hiện nay. Các nghiên cứu đã được ứng dụng vào thực tế sản xuất, trong công tác quy hoạch, phân vùng sản xuất, thiết kế xây dựng các công trình thủy lợi, kiểm soát xâm nhập mặn. Nghiên cứu về xâm nhập mặn được thực hiện khá nhiều và thường xuyên, tuy nhiên các nghiên cứu chuyên sâu về cơ chế xâm nhập mặn, sự xáo trộn hay phân tầng cho vùng cửa sông ven biển ĐBSCL thì còn rất hạn chế.

Với mục đích đóng góp, làm phong phú và hoàn thiện hơn các nghiên cứu về mặn cho vùng cửa sông ven biển ven biển ĐBSCL, trong nghiên cứu này, nghiên cứu sinh đã tập trung nghiên cứu sâu về cơ chế xâm nhập mặn, sự hình thành phân tầng mặn (nêm mặn) tại các cửa sông Cửu Long. Các kết quả nghiên cứu đã đánh giá được các đặc điểm của cơ chế xâm nhập mặn hoàn chỉnh hơn so với các nghiên cứu đã có và ứng dụng hiệu quả hơn trong thực tế sản xuất. Từ kết quả nghiên cứu đã đề xuất một số giải pháp khai thác nước hợp lý cho vùng cửa sông ven biển ĐBSCL. Đồng thời, với kết quả nghiên cứu này và phát triển nghiên cứu sâu hơn nữa sẽ là tiền đề để đưa ra các giải pháp hạn chế xâm nhập mặn cho hiện tại cũng như trong tương lai khi

xét thêm yếu tố NBD bằng các giải pháp công trình như công trình ngăn sông kiểm soát mặn, đập ngầm ngăn mặn, hồ trữ mặn, công trình lấy nước cho nông nghiệp, thủy sản...và các giải pháp phi công trình như vận hành hệ thống cửa kiểm soát mặn, hút nước ngọt phía trên cho nông nghiệp hay lấy nước mặn tầng sâu cho nuôi thủy sản...Đồng thời các kết quả nghiên cứu của đề tài có thể hỗ trợ cho các nghiên cứu có liên quan về môi trường, hệ sinh thái, lắng đọng phù sa, bồi tụ...tại vùng cửa sông ven biển.

2. Mục đích nghiên cứu

- Xác định được cơ chế xâm nhập mặn, sự hình thành phân tầng, cấu trúc, tồn tại và hoạt động của nêm mặn vùng cửa sông ven biển ĐBSCL trong điều kiện hiện tại và nước biển dâng do biến đổi khí hậu.

- Sử dụng kết quả nghiên cứu trong việc khai thác nguồn nước, dự báo nguồn nước, gia tăng khả năng lấy nước theo yêu cầu về nồng độ mặn khác nhau theo không gian (mặt bằng, chiều dọc, ngang và chiều sâu của sông), theo thời gian để chủ động phục vụ các hoạt động sản xuất liên quan tới nước và là tiền đề để đề xuất các giải pháp công trình kiểm soát mặn phù hợp cho vùng nghiên cứu.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- Đối tượng nghiên cứu: các cửa sông ven biển bị xâm nhập mặn.
- Phạm vi nghiên cứu: các cửa sông Mê Công vùng ven biển (tập trung nghiên cứu chi tiết cho cửa sông Hậu (02 nhánh Định An và Trần Đề).
- Thời gian nghiên cứu: Hiện tại và tương lai trong điều kiện nước biển dâng do biến đổi khí hậu.

4. Cách tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

4.1. Cách tiếp cận

- Tiếp cận tổng hợp: Xem khu vực nghiên cứu là một thể thống nhất trong đó các điều kiện cấu thành hệ thống gồm: điều kiện tự nhiên, địa hình, khí hậu, nước, con người, phương thức quản lý, công trình, khai thác sử dụng nguồn nước.v.v..., là các thành phần của hệ tương tác có quan hệ ràng buộc, tác động lẫn nhau. Để đạt được mục tiêu của luận án đòi hỏi phải xem xét tổng hợp để đưa ra các cơ sở khoa học phục vụ cho mục đích của luận án.

- Tiếp cận thực tế: Việc điều tra thực địa, khảo sát bổ sung càng chi tiết càng nắm bắt rõ hơn, chính xác hơn đặc điểm địa hình, thủy văn từ đó xác định quy luật và diễn biến thủy lực, xâm nhập mặn các môi tương tác giữa thủy văn và xâm nhập mặn...Đối với yêu cầu nghiên cứu của đề tài các đo đạc khảo sát thực tế rất quan trọng đặc biệt là đo đạc các yếu tố về nồng độ mặn và thủy văn.

- Tiếp cận tích hợp thông tin: Để nghiên cứu tính toán đạt các kết quả tốt thì trong nghiên cứu sẽ tích hợp thông tin từ nhiều nguồn như: số liệu thực đo, các kết quả nghiên cứu, các hình ảnh viễn thám (nếu có), các thông tin thực tế thu thập thực tế từ trong cộng đồng dân cư khu vực nghiên cứu.

- Tiếp cận các công nghệ tiên tiến: Trong quá trình thực hiện nghiên cứu sử dụng phương pháp đo mặn phù hợp (đo và phân tích theo chiều sâu, theo sự lên xuống của thủy triều...). Kết hợp với sử dụng các mô hình thủy lực 1 chiều, 2 chiều, 3 chiều để làm cơ sở cho việc đưa ra những chứng minh, nhận định, những đề xuất phù hợp trong nghiên cứu.

- Tiếp cận kế thừa, phát triển các kết quả nghiên cứu: Tiếp cận và kế thừa các nghiên cứu trước đây và hiện tại trong nước và trên thế giới trong các vấn đề: lý thuyết, thực nghiệm và cả kinh nghiệm kiểm soát mặn. Trên cơ sở kế thừa đánh giá các nghiên cứu trên thế giới và trong nước, luận án sẽ tập trung phân tích, chọn lọc và bổ sung những kết quả đã nghiên cứu để sử dụng, tạo nền tảng, điểm xuất phát thực hiện những phương pháp phân tích và mô hình toán phù hợp. Thông qua việc học tập, kinh nghiệm của các chuyên gia đầu ngành thông qua trao đổi và các hội thảo để lấy ý kiến các chuyên gia tăng tính khả thi và thực tiễn sản phẩm của nghiên cứu.

4.2. Phương pháp nghiên cứu

- Phương pháp kế thừa: tham khảo tài liệu, số liệu và các nghiên cứu đã có, mặt đạt và mặt còn hạn chế của các nghiên cứu đã có;

- Phương pháp tổng hợp và thu thập: thu thập và tổng hợp số liệu về địa hình, địa mạo, thủy văn, số liệu đo mặn... các số liệu quan trắc hiện trường, phân tích định tính, định lượng, phân tích tương quan;

- Phương pháp đo đạc thực tế tại hiện trường: Trong nghiên cứu đã đo thực tế

xâm nhập mặn theo chiều sâu dòng chảy tại hiện trường với thiết bị hiện đại và phương pháp đo phù hợp cho mục đích nghiên cứu của đề tài.

- Phương pháp phân tích: sử dụng phương pháp phân tích để thống kê phân tích các tài liệu, số liệu đồng thời tổng hợp số liệu theo định hướng của luận án nghiên cứu;

- Phương pháp mô hình toán, ứng dụng các tiến bộ khoa học trong công nghệ thông tin, ứng dụng các mô hình MIKE11, MIKE3 để mô phỏng đánh giá chế độ thủy lực và xâm nhập mặn cho các cửa sông vùng nghiên cứu;

- Phương pháp so sánh liên hệ thực tiễn: các kết quả phân tích đánh giá về xâm nhập mặn sẽ được so sánh với thực tế đã xảy ra hay các hiện tượng tự nhiên để minh chứng các kết quả nghiên cứu là phù hợp;

- Ứng dụng các tiến bộ khoa học trong phân tích, xử lý kết quả theo không gian và thời gian để tiết kiệm thời gian, góp nâng cao độ tin cậy và tính phong phú của các kết quả nghiên cứu.

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

5.1 Ý nghĩa khoa học

Nghiên cứu và tính toán xâm nhập mặn tại vùng ĐBSCL nói chung và các cửa sông ven biển nói riêng đã được thực hiện trong thời gian khá dài và liên tục bởi các cơ quan nghiên cứu, các nhà khoa học. Các kết quả nghiên cứu đã tính toán xác định được xâm nhập mặn theo không gian địa lý và thời gian xâm nhập mặn để phục vụ phát triển kinh tế xã hội, sản xuất nông nghiệp, thủy sản...và cấp nước sinh hoạt. Nghiên cứu, tính toán đánh giá xâm nhập mặn tại ĐBSCL hiện nay chủ yếu từ các tài liệu thực đo kết hợp với mô hình thủy lực, truyền chất một chiều cho được kết quả tính toán mặn tại các vị trí là tại trung bình mặt cắt, vì vậy chưa phản ánh hết cơ chế xâm nhập mặn của vùng cửa sông ven biển.

Hiểu biết về cơ chế xâm nhập mặn ở vùng cửa sông ven biển nói chung và vùng ĐBSCL nói riêng luôn là vấn đề tự nhiên rất phức tạp và khó giải quyết một cách trọn vẹn ở trình độ khoa học trong nước và thế giới hiện nay, do quá trình hòa trộn, pha loãng của hai nguồn nước (ngọt) và (mặn) dưới sự biến động của dòng chảy (sông) và thủy triều (biển). Kết quả nghiên cứu của luận án có ý nghĩa làm rõ hơn cơ chế

xâm nhập mặn, biến động của phân tầng, nêm mặn theo không gian và thời gian ở vùng cửa sông ven biển hệ thống sông Cửu Long.

Nghiên cứu đã áp dụng mô hình toán 3 chiều (MIKE 3) để mô phỏng quá trình lan truyền mặn vùng cửa sông, mô hình được cân chỉnh, kiểm định với các tài liệu thực đo, bộ tham số mô hình là cơ sở cho những nghiên cứu tiếp theo.

5.2 Ý nghĩa thực tiễn

Sau khi xác định được cơ chế xâm nhập mặn, khả năng phân tầng, biến động của nêm mặn sẽ sử dụng trong việc khai thác nguồn nước nhằm chủ động hoạt động sản xuất, gia tăng thời gian và không gian lấy nước về phía hạ lưu so với các tính toán thông thường hiện nay.

Kết quả cũng chỉ ra được khả năng lấy nước theo yêu cầu về nồng độ mặn khác nhau theo không gian (mặt bằng, chiều dọc, ngang và chiều sâu của sông), theo thời gian để phục vụ các yêu cầu dùng nước khác nhau.

Ngoài ra, nghiên cứu định hướng cơ sở đề xuất giải pháp khai thác nước hợp lý cho vùng cửa sông ven biển ĐBSCL (ý tưởng thiết kế, nâng cấp, hướng điều chỉnh cách thức vận hành công trình theo yêu cầu nồng độ mặn phù hợp với yêu cầu sản xuất khác nhau tại vùng cửa sông ĐBSCL)...

6. Những đóng góp mới của luận án

1. Sử dụng được một số tham số kinh nghiệm để sơ bộ đánh giá hiện tượng phân tầng cho 7 nhánh sông Cửu Long theo không gian (dọc sông) và theo thời gian.
2. Thiết lập mô hình toán số 3 chiều (MIKE 3) và mô phỏng được đặc điểm xâm nhập mặn, phân bố mặn, cấu trúc (hình dáng, kích thước, độ dốc), sự hình thành, tồn tại và phát triển của nêm mặn tại hai nhánh của sông Hậu.
3. Dựa trên cơ sở kết quả tính toán mô phỏng xâm nhập mặn, phân tầng mặn đã định hướng cơ sở đề xuất giải pháp khai thác nước hợp lý cho vùng cửa sông ven biển ĐBSCL (ý tưởng thiết kế, nâng cấp, hướng điều chỉnh cách thức vận hành công trình theo yêu cầu nồng độ mặn phù hợp với yêu cầu sản xuất khác nhau tại vùng cửa sông ĐBSCL).

7. Cấu trúc luận án

Ngoài hai phần Mở đầu, Kết luận và kiến nghị, luận án gồm 4 chương:

- Chương 1: Tổng quan về vấn đề nghiên cứu;
- Chương 2: Các nghiên cứu cơ chế phân tầng vùng cửa sông ven biển và khả năng áp dụng cho vùng đồng bằng sông Cửu Long;
- Chương 3: Kết quả nghiên cứu và thảo luận về cơ chế xâm nhập mặn tại vùng cửa sông Hậu;
- Chương 4: Định hướng cơ sở đề xuất giải pháp khai thác nước hợp lý cho vùng cửa sông ven biển đồng bằng sông Cửu Long.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

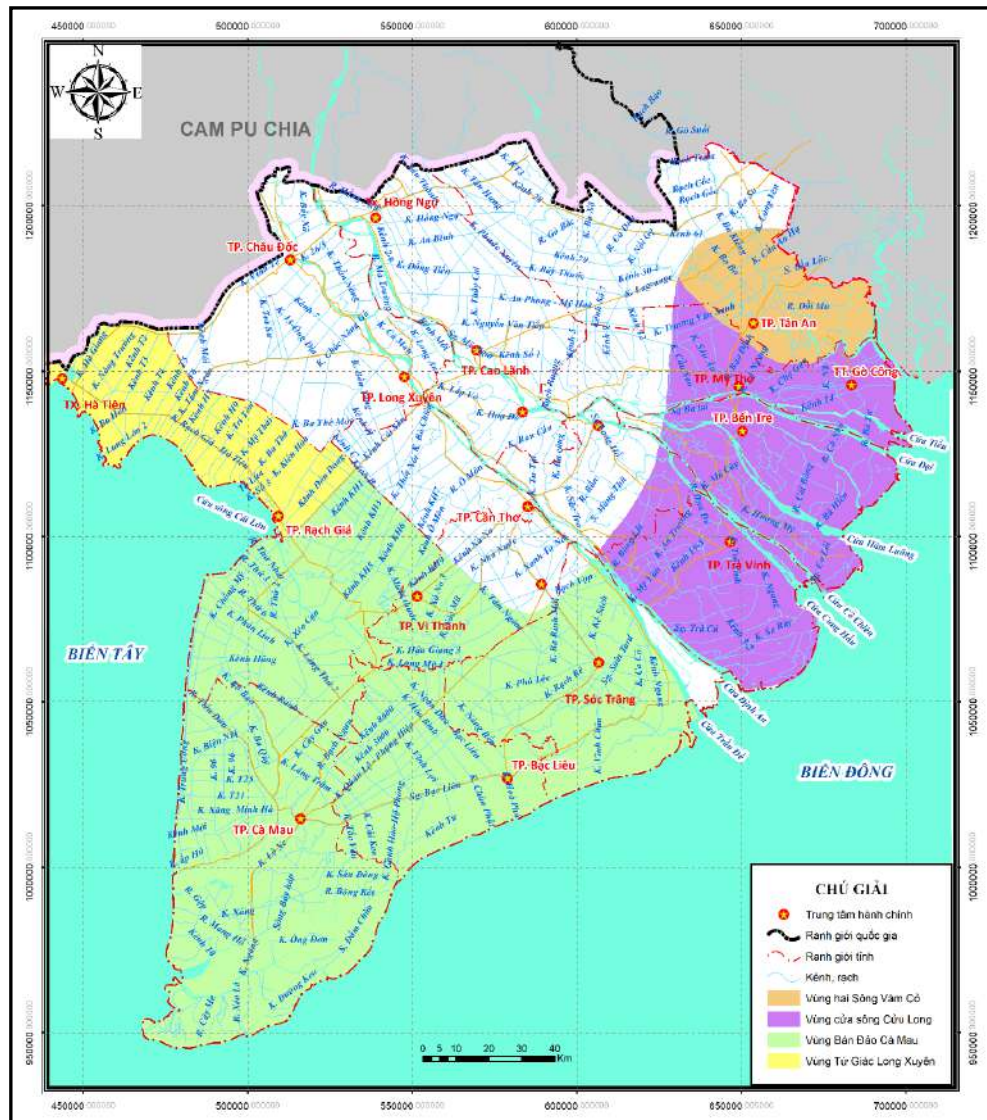
1.1. Tổng quan về xâm nhập mặn tại đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL)

Đồng bằng sông Cửu Long có vị trí quan trọng trong phát triển kinh tế - xã hội của cả nước, đóng góp: 65% sản lượng nuôi trồng thủy sản; 60% sản lượng cá xuất khẩu; 70% sản lượng trái cây; 50% sản lượng lúa; 95% lượng gạo xuất khẩu góp phần bảo đảm an ninh lương thực quốc gia và xuất khẩu. Toàn vùng có tổng diện tích đất tự nhiên khoảng 4 triệu ha; trong đó vùng có khả năng ảnh hưởng ngập lũ và xâm nhập mặn đều khoảng 2 triệu ha, dao động hàng năm tùy thuộc nguồn nước về đồng bằng ĐBSCL có hai phía giáp biển Đông và biển Tây với chiều dài bờ biển hơn 700km với địa hình bằng phẳng hầu hết cao độ thấp hơn mực nước đỉnh triều do đó chịu tác động của thủy triều và xâm nhập mặn, đặc biệt là mùa khô.

Theo hệ thống sông chính sông Tiền (Cửa Đại, Cửa Tiểu, Ba Lai, Hàm Luông, Cổ Chiên, Cung Hầu), sông Hậu (Định An, Trần Đề), sông Mỹ Thanh, sông Gành Hào, hệ thống sông Cái Lớn - Cái Bé, sông Giang Thành và hàng loạt các kênh rạch thông ra biển mặn xâm nhập sâu vào nội địa. Trong mùa mưa nhờ có lưu lượng ngọt phong phú do mưa và do sông Mê Công mang lại nên ranh giới mặn bị đẩy lùi ra gần biển, nhưng mùa khô lưu lượng nước ngọt giảm mặn lại có điều kiện lấn sâu vào nội đồng và chu kỳ này lặp đi lặp lại hàng năm. Sự xâm nhập mặn ở ĐBSCL rất phức tạp, ở mỗi vùng có các đặc điểm khác nhau. Trên dòng chính sông Mê Công phụ thuộc chủ yếu vào lưu lượng thượng lưu chảy về. Trên hệ thống sông Vàm Cỏ phụ thuộc vào sự bổ sung lưu lượng từ các nguồn khác vào sông Vàm Cỏ Tây, Vàm Cỏ Đông và việc lấy nước của các khu vực ven sông. Vùng Tứ giác Long Xuyên (TGLX) chịu ảnh hưởng lớn vào khả năng vận chuyển nước ngọt của hệ thống kênh nối từ sông Hậu sang biển Tây, ở vùng BĐCM phụ thuộc chủ yếu vào chế độ mưa và sử dụng nước nội vùng.

Trước đây khi công trình thủy lợi chưa phát triển diện tích bị ảnh hưởng mặn 1g/l trở lên khoảng 2,1 triệu ha. Nếu tính với độ mặn 0,2g/l (tiêu chuẩn cho phép của nước sinh hoạt) thì phạm vi ảnh hưởng mặn còn rộng hơn. Đến nay do công trình thủy lợi phát triển, nhiều vùng ven biển được ngọt hoá nên diện tích bị ảnh hưởng mặn giảm đáng kể, chỉ còn khoảng 1,3 ÷ 1,5 triệu ha. Tuy nhiên ranh giới mặn trên

sông chính Mê Công, sông Vàm Cỏ Tây và các kênh nối thông ra biển lại có xu thế gia tăng. [14]



Hình 1-1: Vùng ảnh hưởng mặn và phân vùng giám sát mặn [14]

Để phục vụ sản xuất cho vùng ĐBSCL từ những năm 2005 đến nay hàng năm Đài Khí tượng thủy văn khu vực Nam Bộ, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam và một số địa phương trong vùng đều có đo đạc, tính toán diễn biến xâm nhập mặn trên dòng chính của hệ thống sông ĐBSCL và một số kết quả chính được tóm tắt như sau:

1.1.1. Các hướng chính xâm nhập mặn vào vùng ĐBSCL [14]

ĐBSCL có vị trí nằm cuối nguồn ngọt, tiếp giáp với biển; nên vào các tháng mùa khô mặn xâm nhập là đặc tích của vùng; Tuy vậy, không gian, thời gian ảnh hưởng mặn phù thuộc vào điều kiện thủy văn, dòng chảy thượng nguồn hàng năm.

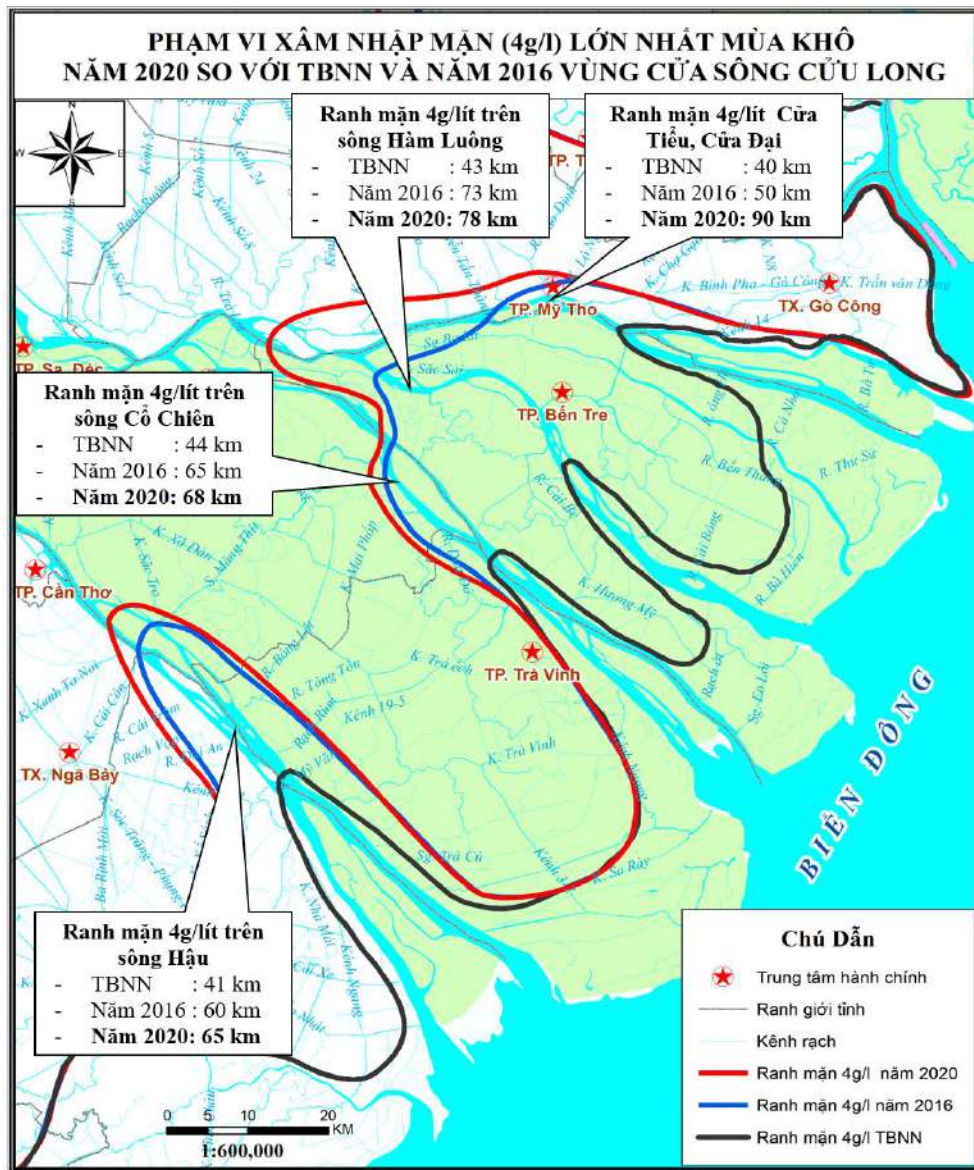
Các hướng xâm nhập mặn chính vào là từ hệ thống sông chính trong vùng. Hệ thống cửa sông Cửu Long ở ĐBSCL có chế độ thủy văn, thủy lực và xâm nhập mặn xảy ra hết sức phức tạp. Nguồn xâm nhập mặn từ biển qua các cửa sông chính đi sâu vào các kênh rạch nội đồng thuộc các tỉnh Tiền Giang, Bến Tre, Trà Vinh, Sóc Trăng, Bạc Liêu, Cà Mau. Sông Tiền, đoạn từ Vĩnh Long - Mỹ Tho, lần lượt hình thành các chi lưu lớn kế tiếp nhau là Cổ Chiên, Hàm Luông, Ba Lai, Cửa Đại, Cửa Tiểu. Dòng Ba Lai trước đây là một cửa nhỏ của sông Cửu Long, từ năm 2001 đã được xây dựng cống đập Ba Lai. Sông Hậu chảy thành một dòng thẳng và cách biển khoảng 30km thì tách thành 2 dòng đổ ra biển qua cửa Định An và Trần Đề.



Hình 1- 2: Hướng xâm nhập mặn tại các cửa sông vùng ĐBSCL [14]

1.1.2. Vùng cửa sông Cửu Long [14]

So với cửa sông khác, cửa sông Cửu Long có đặc điểm là mặn biến động tăng nhanh nhưng cũng giảm nhanh theo chu kỳ triều và khi có nguồn nước thượng lưu gia tăng về Đồng bằng. Các hệ thống thủy lợi hiện nay trong khu vực có khả năng kiểm soát mặn từ biển đến 30km - 50km (tùy cửa) và được đánh giá phù hợp đối với những năm thủy văn có điều kiện bình thường. Kết quả quan trắc mặn trên các nhánh sông chính Cửu Long cho thấy nồng độ mặn trong các tháng mùa khô qua các năm không thay đổi quá đột biến chỉ trừ hai năm hạn mặn lịch sử là các năm 2005 và đặc biệt là năm 2016 và 2020.

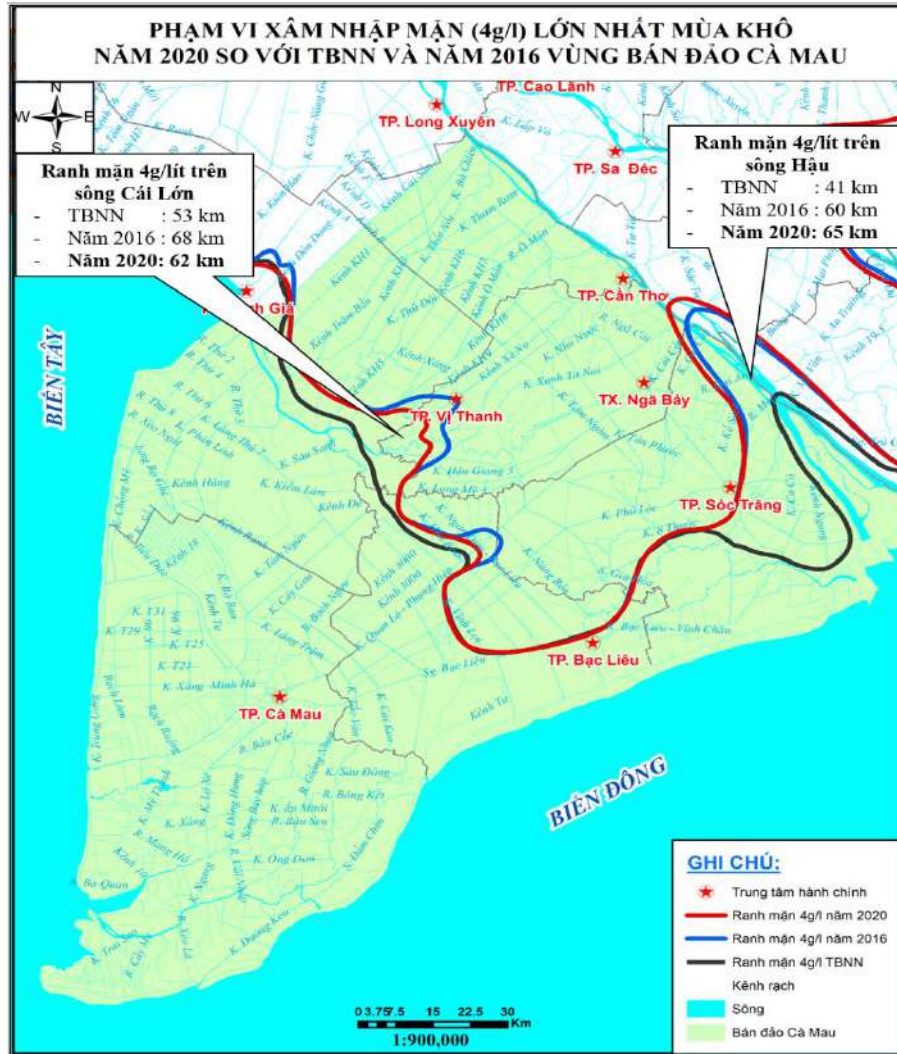


Hình 1-3: Phạm vi xâm nhập mặn (4g/l) lớn nhất vùng cửa sông Cửu Long [14]

1.1.3. Vùng bán đảo Cà Mau [14]

Vùng Bán đảo Cà Mau thuộc địa phận các tỉnh: Sóc Trăng, Bạc Liêu, Cà Mau, Hậu Giang và một phần thuộc tỉnh Kiên Giang. Xâm nhập mặn vào hệ thống kênh rạch trong vùng từ nhiều phía: Biển Đông, biển Tây. Xâm nhập mặn vào hệ thống sông rạch tỉnh Sóc Trăng: từ phía biển Đông thông qua cửa Trần Đề, cửa Mỹ Thanh, kênh Vĩnh Châu, kênh Thiệp Nhứt. Xâm nhập mặn vào hệ thống kênh rạch tỉnh Bạc Liêu: chủ yếu từ cửa sông Gành Hào vào kênh Gành Hào, kênh Gành Hào đi Hộ Phòng, xâm nhập vào kênh Xáng Cà Mau đi Bạc Liêu. Ngoài ra nguồn nước mặn từ sông Mỹ Thanh vào sông Cổ Cò vào rạch Bạc Liêu thuộc khu vực thành phố Bạc Liêu. Dọc theo Quốc lộ 1A hệ thống cống đập ngăn mặn thuộc dự án Quản Lộ-Phụng Hiệp cơ bản hoàn chỉnh đảm bảo ngăn mặn cho khu vực phía Bắc Quốc lộ 1A của tỉnh Bạc Liêu. Xâm nhập mặn vào sông rạch tỉnh Cà Mau: phía biển Đông theo cửa Gành Hào, qua cửa Lồng Đèn vào sông Đầm Dơi, qua cửa Hố Hải vào sông Trảng Tràm, qua cửa Bò Đề vào sông Bò Đề, qua cửa Rạch Gốc vào rạch Đường Kéo, qua cửa Năm Ô Rô vào kênh Năm Ô Rô. Phía biển Tây qua Cửa Lớn vào sông Cửa Lớn, qua cửa Bảy Háp vào sông Bảy Háp, qua cửa Cái Đôi Vàm vào rạch Cái Đôi Vàm, qua cửa Mỹ Bình vào sông Mỹ Bình và đầm Thị Tường thuộc huyện Phú Tân. Xâm nhập mặn vào sông rạch tỉnh Hậu Giang và phần đất thuộc tỉnh Kiên Giang: theo phía biển Tây vào hệ thống sông Cái Lớn, Cái Bé và hệ thống kênh trục nội vùng.

Chế độ thủy văn ở vùng Bán đảo Cà Mau bị chi phối bởi thủy triều biển Đông, biển Tây, dòng chảy sông Mê Công và chế độ mưa nội vùng. Nguồn cung cấp nước chủ yếu trong vùng là nước mưa và nước sông Hậu chuyển về. Tuy nhiên, lưu lượng nước sông Hậu chuyển vào qua các kênh trục ở những tháng mùa khô đến địa phận tỉnh Cà Mau là không đáng kể, việc sử dụng nước ngọt trên địa bàn tỉnh hiện nay chủ yếu tích trữ nước mưa và khai thác nước dưới đất.

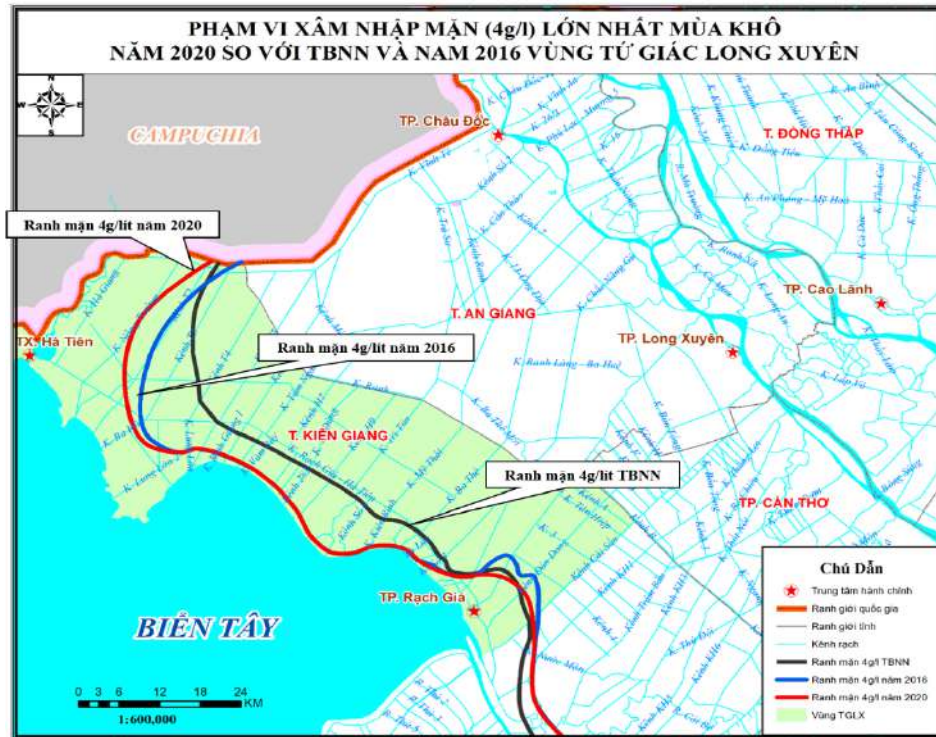


Hình 1-4: Phạm vi xâm nhập mặn (4g/l) lớn nhất vùng Bán đảo Cà Mau [14]

1.1.4. Vùng Tứ giác Long Xuyên (TGLX)

Vùng TGLX gồm phần đất ven biển thuộc địa phận tỉnh Kiên Giang có hệ thống sông tự nhiên và hệ thống kênh đào khá phong phú. Đại bộ phận các kênh rạch trong khu vực có hướng Đông Bắc - Tây Nam, nối từ sông Hậu đổ ra biển Tây hoặc thông qua kênh Rạch Giá - Hà Tiên. Các kênh rạch chính gồm: Kênh Vĩnh Tế, kênh Tri Tôn, kênh Cái Sắn, kênh Rạch Giá - Hà Tiên, sông Giang Thành... Tuy nhiên hiện nay hầu hết các tuyến kênh này đều đã được xây dựng các công trình kiểm soát mặn. Sau khi cống Sông Kiên và cống Kênh Cụt hoàn thành năm 2017 công với việc một số khu vực đã xây dựng đập tạm nên mặn đã được kiểm soát nên sử dụng số liệu trước đây để phân tích so sánh với mùa khô năm 2020 không còn nhiều giá trị với thực tế. Đối với mùa khô 2020, mặn chỉ xâm nhập vào các khu vực nuôi trồng thủy

sản và phạm vi hẹp khu vực canh tác mặn - ngọt không ảnh hưởng quá nhiều đến sản xuất và dân sinh.



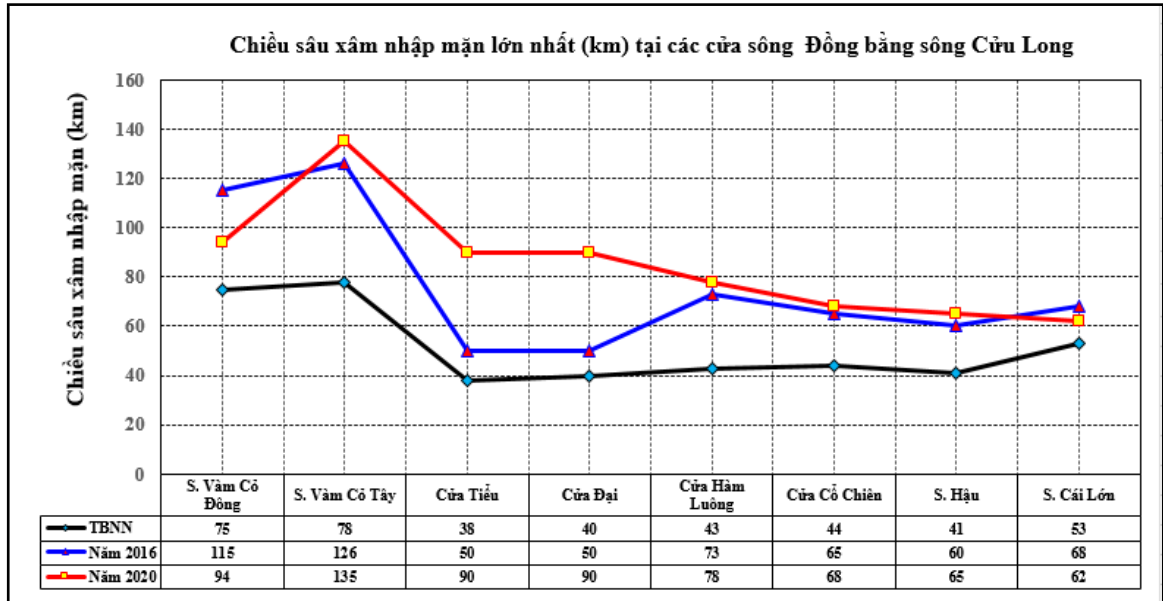
Hình 1-5: Phạm vi xâm nhập mặn (4g/l) lớn nhất vùng Tứ Giác Long Xuyên [14]

1.1.5. Đánh giá chung về diễn biến xâm nhập mặn tại ĐBSCL [14]

Chiều sâu xâm nhập mặn vào trong sông chính các năm hầu như ít thay đổi chênh lệch giữa các năm khoảng từ 2-5km chỉ trừ trường hợp đặc biệt khô hạn như năm 2016 và 2020.

Bảng 1-1: Chiều sâu xâm nhập mặn lớn nhất năm 2016, 2020 và TBNN [14]

Cửa sông	Chiều sâu XNM lớn nhất (km)								TBNN
	Tháng 12/2019	Tháng 1/2020	Tháng 2/2020	Tháng 3/2020	Tháng 4/2020	Tháng 5/2020	Lớn nhất 2019-2020	Lớn nhất 2015-2016	
Vàm Cỏ Đông	60	85	94	85	89	79	94	115	75
Vàm Cỏ Tây	63	82	98	106	135	130	135	126	78
Cửa Tiểu	45	45	88	90	88	78	90	50	38
Cửa Đại	45	46							40
Hàm luông	57	64	78 (Toàn tuyến)				78	73	43
Cổ Chiên	57	68	66	51	42	45	68	65	44
Hậu	48	61	65	52	43	41	65	60	41
Cái Lớn	41	48	58	59	62	54	62	68	53



Hình 1-6: Biểu đồ xâm nhập mặn (4g/l) tại các cửa sông ĐBSCL [14]

Thời điểm xuất hiện mặn đạt giá trị cao nhất mùa khô: Qua tổng kết, trong những năm gần đây (sau năm 2012) khi mà thủy điện dòng chính Trung Quốc cơ bản hoàn thành và đi vào hoạt động. Dòng chảy về đồng bằng đã có những thay đổi rất lớn về bản chất, từ xu thế gần với tự nhiên sang xu thế bị điều tiết bởi các hồ chứa đi vào hoạt động đã và đang làm cho xâm nhập mặn tại các vùng cửa sông, ven biển trên đồng bằng có những thay đổi căn bản như dưới đây:

- Xâm nhập mặn trên ĐBSCL giai đoạn trước năm 2012: Thường xâm nhập vào đất liền từ đầu tháng I, tăng dần đến cao điểm là tháng IV rồi giảm dần, sau khi lưu lượng thượng lưu về tăng lên và mùa mưa trên đồng bằng cũng bắt đầu.
- Xâm nhập mặn từ sau năm 2012: Trên các cửa sông Cửu Long có xu thế xâm nhập sớm khoảng một tháng so với giai đoạn trước đây, những năm dòng chảy thượng lưu thấp mặn đã ảnh hưởng từ cuối tháng XII năm trước, và có thể đạt độ mặn cao nhất vào tháng II và giữa tháng III, từ cuối tháng III mặn có xu hướng giảm nhanh bởi dòng chảy kiệt tăng lên do điều tiết thượng lưu.

1.2. Tổng quan các nghiên cứu ở nước ngoài

Xâm nhập mặn là quá trình tự nhiên sự trao đổi tương tác giữa biển và sông. Mặn từ nước biển sẽ theo thủy triều tiến vào trong sông. Hiện tượng xâm nhập mặn diễn ra mạnh tại vùng cửa sông ven biển tại mọi thời điểm, đặc biệt vào mùa kiệt. Khi

đó, lượng nước từ sông (nước ngọt) đổ ra biển giảm thấp, thủy triều từ biển sẽ mang nước mặn lấn sâu vào trong sông làm nước sông bị nhiễm mặn. Khi dòng chảy tiến sâu vào nội đồng thì hàm lượng mặn sẽ giảm do tác động của dòng triều bị suy giảm và tác động của dòng chảy thượng lưu hay yếu tố địa hình tác động. Do sự khác biệt về tỷ trọng giữa nước biển và nước sông nên khi sóng triều truyền vào cửa sông sẽ có dạng hình nêm, thường gọi là nêm mặn. Khi triều lên, nêm mặn sẽ di chuyển vào sông, dồn ép dòng nước ngọt từ thượng lưu chảy ra biển, gây hiện tượng nước dâng ngược về hướng thượng lưu. Ngược lại, khi triều rút đường nêm mặn sẽ rút nhanh về hướng biển, cộng theo sức đẩy của nước ngọt từ thượng lưu làm dòng triều rút gia tăng vận tốc. Tùy thuộc vào sự tương tác giữa năng lượng dòng triều và dòng chảy nước ngọt từ thượng lưu làm hình dạng đường nêm mặn không cố định mà luôn thay đổi, có hình dạng khác nhau. Nếu có thêm tác nhân là gió trên mặt nước, trên đường nêm mặn có thể có thêm lưỡi mặn nhỏ trên đường nêm mặn. Ngay tại vị trí có đường nêm mặn, ở các vị trí khác nhau, chất lượng nước (nồng độ mặn) cũng khác nhau. Khi đo lưu lượng vùng cửa biển, cần lưu ý là dòng chảy có thể có hai chiều ngược chiều nhau. Cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông phụ thuộc vào các yếu tố như: lượng nước từ thượng nguồn đổ về; biên độ triều vùng cửa sông; điều kiện địa hình đáy sông; các yếu tố khí tượng như: gió, nhiệt độ, mưa và hoạt động kinh tế của con người như: việc lấy nước nhiều vào mùa khô (cả nước mặt và nước ngầm), xây dựng các công trình trên sông chính...

Cơ chế của xâm nhập mặn tại vùng cửa sông ven biển phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như đã nêu ở trên. Để tìm ra được cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông trước hết phải hiểu được các vấn đề liên quan đến vùng cửa sông như: phân loại vùng cửa sông, các đặc tính của nêm mặn, chuyển động khi triều xuống hay triều lên của các nêm mặn. Các vấn đề này ở Việt Nam nghiên cứu khá ít nhưng trên thế giới đã được quan tâm nghiên cứu khá sớm từ những năm 50 của thế kỷ XX.

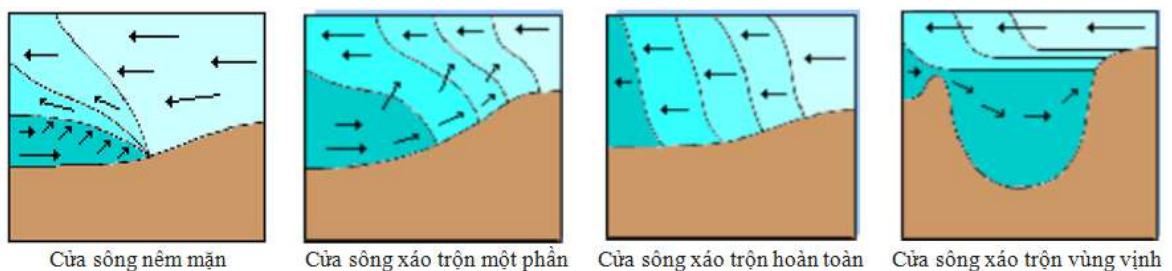
1.2.1. Phân loại cửa sông

1.2.1.1. Một số định nghĩa và khái niệm về vùng cửa sông

Cửa sông là một vùng nước lợ nửa kín ven bờ thông với biển được bao quanh bởi biển là nơi có một hoặc nhiều dòng sông hoặc suối chảy vào đó. Định nghĩa vùng

cửa sông (VCS) đã được nhiều nhà khoa học trên thế giới xác định dựa trên các quan điểm khác nhau như: yếu tố địa hình, hình thái, hình dạng, động lực dòng triều ... Một số nhà khoa học đã có những định nghĩa về VCS như: Ritter K, Posen O. (1866); Lapparent, A. (1907) và Haug, E. (1911), Sukin C. (1938), Nihkolaev N. I. (1949) và sau này là Khain E. (1973) [24].

Hiện nay, định nghĩa Estuary của Pritchard [30] được nhiều người đồng ý nhất. Theo đó “*Estuary là một thủy vực nửa kín ven bờ thông với biển khơi, trong đó có sự hoà trộn nhất định giữa nước biển mặn và nước ngọt chảy ra từ lục địa*” và Pritchard chia cửa sông thành 4 kiểu dựa trên các đặc điểm địa hình và hình thái: Kiểu 1: là các thung lũng ngập chìm, thuộc kiểu kinh điển, hay gặp ở các đồng bằng rộng lớn ven biển và do các yếu tố địa chất khống chế; Kiểu 2: là các vịnh hẹp (fjord) có nguồn gốc sông băng ngập chìm; Kiểu 3: là các cửa sông có đê cát (bar-built) chắn ngoài, ví dụ như cửa sông Carolina ở Bắc Mỹ. Kiểu này có hình thái đầm phá và thường năng lượng gió có vai trò xáo trộn nước chủ yếu thay cho vai trò của thủy triều; Kiểu 4: là các cửa sông hình thành do các quá trình kiến tạo tạo nên các vùng lún, sụt hạ ven bờ, ví dụ như vịnh San-Francisco. Leeder M. R. (1984) cho rằng động lực của nước và trầm tích trong VCS liên hệ mật thiết với tương quan cường độ của các quá trình thủy triều, dòng chảy sông và sóng. Cũng dựa theo quan điểm của Pritchard, Leeder chia cửa sông thành 4 kiểu theo cân bằng độ mặn thể hiện tính phân tầng và khả năng bồi tụ: Kiểu A: phân tầng mạnh, quá trình lòng sông thông tri, bồi tụ mạnh; Kiểu B: xáo trộn từng phần, nghiêng về bồi tụ, là kiểu phổ biến; Kiểu C: đồng nhất theo phương thẳng đứng trên mặt cắt ngang, dòng triều mạnh và không bồi tụ đáy; Kiểu D: đồng nhất theo phương thẳng đứng và theo dọc luồng chảy, chuyển động vật chất hoàn toàn do dòng triều thống trị và xâm thực mạnh luồng [24].



Hình 1-7: Minh họa phân loại cửa sông dựa trên chế độ dòng chảy tuần hoàn [39]

Như vậy, đến nay khái niệm VCS “*Estuary*” được mở rộng rất nhiều và được hiểu theo nhiều cách khác nhau. Cấu trúc của nó từ hình dạng cụ thể là hình phễu được khái quát thành nửa kín, rồi đóng kín từng phần, thậm chí đóng kín hoàn toàn. Thủy triều ở vùng cửa sông thường lớn và quan trọng nhưng không còn được coi là điều kiện tiên quyết hình thành cấu trúc này. Độ mặn tại vùng cửa sông có thể từ nhạt, lợ đến siêu mặn, miễn là có sự hoà trộn nhất định giữa nước biển và nước ngọt từ đất liền chảy ra.

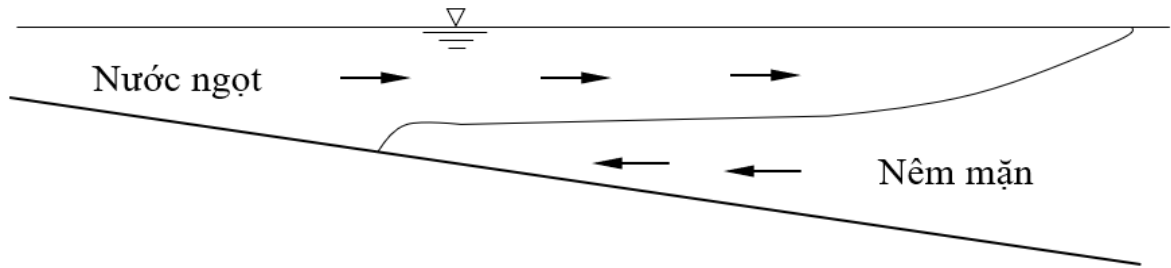
1.2.1.2. Phân loại cửa sông theo chế độ dòng chảy (tương tác mặn, ngọt)

Việc phân loại các cửa sông ven biển có thể theo nhiều cách thức khác nhau dựa trên các quan điểm và sự quan tâm khác nhau của các nhà nghiên cứu hay quản lý về các lĩnh vực như thủy động lực học, địa mạo hình thái bờ biển, độ mặn, sinh thái học, cấu tạo địa chất,... Với mục tiêu nghiên cứu chính của đề tài là cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông do đó trong mục này chỉ tập trung vào việc phân loại cửa sông theo chế độ dòng chảy và cấu trúc xâm nhập mặn.

Trong hầu hết các hệ thống cửa sông ven biển vùng chịu tác động của thủy triều và dòng chảy thượng nguồn, độ mặn và đặc điểm dòng chảy tại mỗi vùng mỗi cửa sông có sự khác nhau. Để hiểu được sự trao đổi, lưu thông của các cửa sông ven biển, Pritchard (1955), Cameron và Pritchard (1963) đã phân loại các cửa sông trên cơ sở yếu tố phân tầng dòng chảy và phân bố độ mặn. Các phân loại chủ yếu là phân tầng mạnh, xáo trộn một phần và xáo trộn hoàn toàn.

- Cửa sông phân tầng mạnh (*highly stratified*)

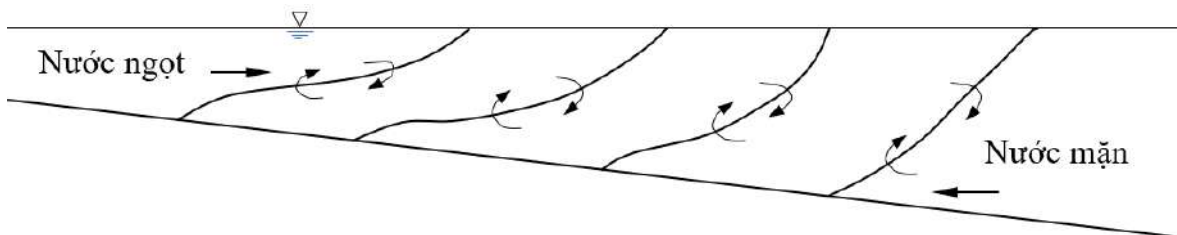
Một cửa sông phân tầng mạnh khi hình thành một nêm mặn rõ nét, nước ngọt có trọng lượng riêng nhẹ hơn sẽ chồng trên một lớp nước mặn có trọng lượng riêng lớn hơn (Hình 1-8). Nêm mặn sẽ tịnh tiến dọc theo phía dưới lớp nước ngọt cho đến khi bị dòng chảy sông đủ lớn để ngăn chặn sự đi sâu của dòng chảy mặn. Các nghiên cứu và kết quả quan trắc đã chỉ ra rằng các cửa sông như Mississippi (Hoa Kỳ), Columbia và Hudson (Hoa Kỳ), cửa sông Vellar (Ấn Độ) là những cửa sông phân tầng mạnh.



Hình 1-8: Sơ họa cửa sông phân tầng mạnh

- Cửa sông xáo trộn một phần (*partially mixed*)

Cửa sông hỗn hợp một phần là cửa sông có năng lượng thủy triều bị tiêu tan bởi ma sát đáy do dòng chảy rối sinh ra. Những xoáy nước rối trộn lẫn nước mặn và nước ngọt lên xuống với lưu lượng tăng mạnh của nước mặn. Khi nồng độ mặn của lớp nước bề mặt được tăng lên, dòng chảy mặt tăng lên tương ứng để duy trì dòng chảy sông cộng với nước mặn lên trộn thêm. Điều này 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 hay xáo trộn, sự phân tầng một phần có thể thay đổi theo chiều dọc dòng chảy. Tại các cửa sông dạng phân tầng một phần, động lực dòng chảy sông yếu so với dòng chảy thủy triều (Hình 1-9). Các cửa sông phân tầng một phần rất nhiều trên thế giới, ví dụ như cửa sông James River (Hoa Kỳ) và cửa sông Mersey và Southampton (Anh). Qua tài liệu đo đạc thực tế tại hai cửa sông Trần Đề và Định An cho thấy có hiện tượng phân tầng một phần. [28]

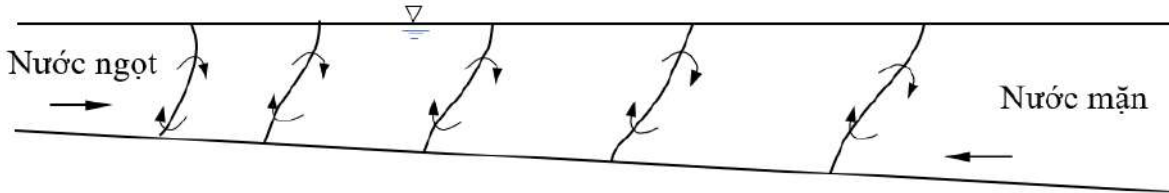


Hình 1-9: Sơ họa cửa sông hỗn hợp một phần

- Cửa sông xáo trộn hoàn toàn (*well-mixed*) hay đồng nhất (*homogeneous*)

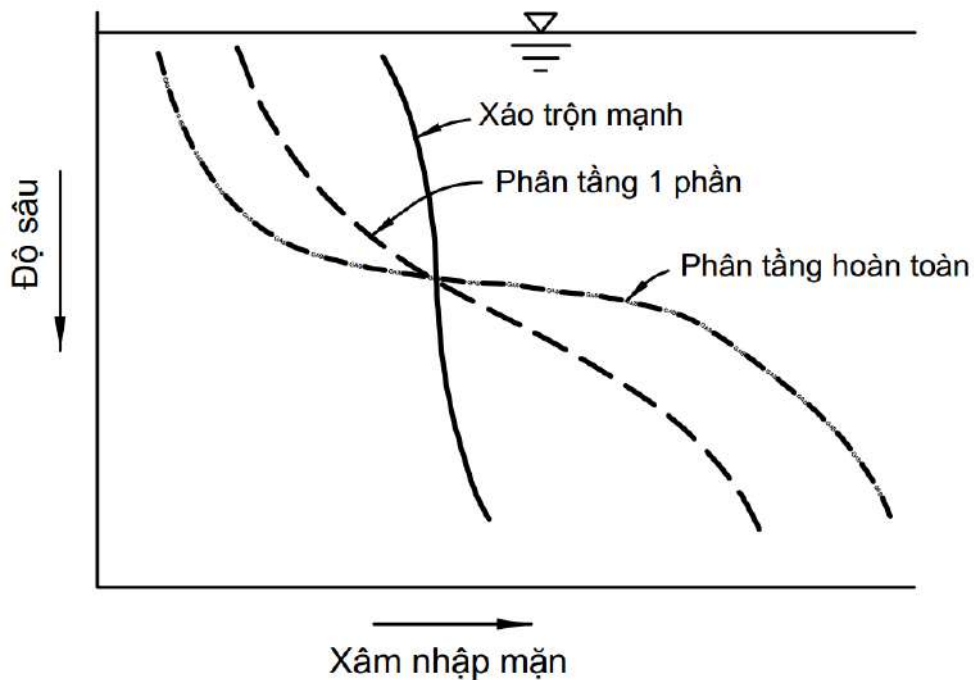
Cửa sông xáo trộn hoàn toàn hay đồng nhất xảy ra khi dòng chảy sông yếu và dòng chảy thủy triều được tạo ra từ trung bình đến mạnh. Độ mặn của nước ở các cửa sông trộn theo chiều dọc là như nhau từ bề mặt nước xuống đáy cửa sông. Dòng thủy triều mạnh loại bỏ lớp nước ngọt thẳng đứng nổi trên nước biển dày đặc hơn và độ mặn được xác định bởi giai đoạn thủy triều hàng ngày. Khi dòng triều lớn hơn nhiều

so với dòng chảy sông và ma sát đáy đủ lớn để pha trộn toàn bộ cột nước, một cửa sông đồng nhất (hay xáo trộn hoàn toàn) theo phương đứng (Hình 1-10) được tạo ra. Độ mặn của một cửa sông cao nhất gần đại dương nhất và giảm khi nó di chuyển lên sông. Các cửa sông Delaware và Raritan ở Mỹ thuộc loại này.



Hình 1-10: Sơ họa cửa sông hỗn hợp toàn phần

Hình 1-11 dưới đây tóm tắt việc phân loại cửa sông chủ yếu theo sự phân tầng và sự phân bố độ mặn. Việc phân loại tập trung dựa vào sự khác biệt giữa độ mặn trên bề mặt và ở đáy sông.



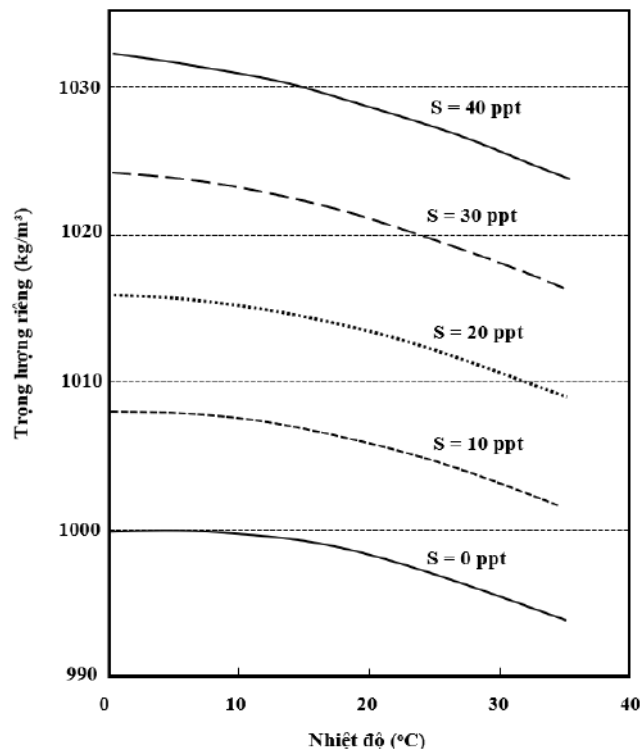
Hình 1-11: Sơ họa cấu trúc độ mặn theo phương đứng

1.2.2. Tính chất của nước vùng cửa sông ven biển (phương trình trạng thái) [22]

Tính chất của chất lỏng ảnh hưởng đến việc vận chuyển năng lượng, khối lượng và động lượng bao gồm mật độ, độ nén, độ nhớt và độ khuếch tán phân tử. Hầu hết các yếu tố vật lý quan trọng đều thay đổi theo nhiệt độ và các tính chất này bao gồm mật độ, trọng lượng riêng, độ nhớt tuyệt đối và động học, sức căng mặt ngoài, công suất nhiệt... Mật độ và trọng lượng riêng của nước vùng cửa sông liên quan mật thiết tới chế độ thủy động lực học, xâm nhập mặn. Mật độ của nước là một tính chất cơ

bản xác định khối lượng nội tại trong một thể tích. Vì mật độ phụ thuộc vào số lượng phân tử có trong một đơn vị thể tích và nhiệt độ tăng sẽ làm gia tăng hoạt động phân tử và khoảng cách giữa các hạt do đó mật độ thay đổi như một hàm của nhiệt độ. Mối quan hệ với nhiệt độ là phi tuyến, vì khả năng của các phân tử nước không phân cực phù hợp với sự cố định gần hơn ở 4°C. Ngoài ra, mật độ bị ảnh hưởng bởi các vật chất hòa tan như các khoáng chất, mặn hoặc lơ lửng trong nước như phù sa, huyền phù....Các phân tử hòa tan hoặc lơ lửng có mật độ khác nhau và thay đổi mật độ trên tổng mật độ khi thay thế với số lượng đáng kể các phân tử nước.

Khối lượng riêng (tỷ trọng) của nước có đơn vị là kg/m^3 , dưới áp suất bình thường nước tinh khiết có trọng lượng xấp xỉ 1.000kg/m^3 tại nhiệt độ 4°C và giảm xuống còn 994kg/m^3 tại 35°C và khối lượng riêng cũng giảm khi nhiệt độ tăng từ 0°C đến 4°C, trong đó mật độ tăng theo nhiệt độ. [22]



Hình 1-12: Mối quan hệ giữa mật độ, độ mặn và nhiệt độ [22]

Phương trình quan hệ được viết theo công thức dưới đây:

$$\rho_T = 1000 \left[1 - \frac{T + 288.9414}{508929.2(T + 68.12963)} (T - 3.9863)^2 \right] \quad (1-1)$$

Trong đó: T Nhiệt độ của nước;

Ngoài phương trình (1-1) có nguồn gốc từ xuất xứ trong phòng thí nghiệm chính xác, các phương trình đa thức thực nghiệm không kém liên quan đến tỷ trọng và

hiệt độ (°C). Phương pháp chuẩn (1992) và Gill (1982) cung cấp một trong những ví dụ tốt và chi tiết hơn trong đó: [22]

$$\rho_T = 999,842594 + 6,793952 \times 10^{-2}T - 9,095290 \times 10^{-3}T^2 + 1,001685 \times 10^{-3}T^3 - 1,120083 \times 10^{-6}T^4 + 6,536332 \times 10^{-9}T^5 \quad (1-2)$$

Một trong những mối quan hệ hữu ích hơn liên quan đến mật độ với nhiệt độ, chất rắn hòa tan và chất rắn lơ lửng là:

$$\rho = \rho_T + \Delta\rho_s + \Delta\rho_{ss} \quad (1-3)$$

Trong đó: ρ là khối lượng riêng của nước (kg/m³); ρ_T khối lượng riêng của nước tinh khiết là hàm của nhiệt độ (xem công thức (1-1)), và $\Delta\rho_s$, $\Delta\rho_{ss}$ là những thay đổi về khối lượng riêng do chất rắn hòa tan và lơ lửng tương ứng.

$$\Delta\rho_s = (0.824493 - 4.0899 \times 10^{-3}T + 7.6438 \times 10^{-5}T^2 - 8.2467 \times 10^{-7}T^3 + 5.3875 \times 10^{-9}T^4)C_{SL} + (-5.72466 \times 10^{-3} + 1.0277 \times 10^{-4}T - 1.6546 \times 10^{-4}T^2)C_{SL}^{1.5} + 4.8314 \times 10^{-4}C_{SL}^2 \quad (1-4)$$

Trong đó C_{SL} là nồng độ muối tính bằng g muối trên mỗi kg nước biển hoặc ppt, phần nghìn được viết là ‰, nhiệt độ T đơn vị là °C. Độ mặn là thước đo phổ biến của chất rắn hòa tan trong nghiên cứu về thủy lực và hải dương học. Minh họa trong (Hình 1-12) là ảnh hưởng tương đối của nhiệt độ và độ mặn đến trọng lượng riêng của nước. Ảnh hưởng của nồng độ chất rắn lơ lửng đến mật độ có thể được tính như công thức sau: [22]

$$\Delta\rho_{ss} = C_{ss} \left(1 - \frac{1}{SG}\right) \times 10^{-3} \quad (1-5)$$

Trong đó: $\Delta\rho_{ss}$ là sự thay đổi mật độ do chất rắn lơ lửng, C_{ss} là nồng độ chất rắn lơ lửng (g/m³ hoặc mg/l) và SG là trọng lượng riêng của chất rắn lơ lửng.

1.2.3. Các yếu tố chính tác động đến cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông

Xâm nhập mặn vùng cửa sông phụ thuộc chặt chẽ vào chế độ thủy lực, chịu chi phối và tác động chính của ba yếu tố chính là gió, dòng triều và dòng chảy sông. Tùy từng khu vực địa lý khác nhau, đặc điểm thủy triều, dòng chảy sông và hình dạng cửa sông mà tác động của các yếu tố khác nhau tới cơ chế thủy lực và xâm nhập mặn. Chế độ thủy lực và xâm nhập mặn tại vùng cửa sông phụ thuộc vào ba yếu tố có thể chịu tác động do tất cả các yếu tố hay do từng yếu tố. Các yếu tố tác động có thể thay đổi từ mùa này sang mùa khác, hoặc thậm chí từ tuần này sang tuần khác. Nhiều cửa sông thay đổi từ nêm mặn sang phân tầng một phần hay xáo trộn hoàn toàn vào mùa

khô. Một trận lũ trong một tuần hoặc lâu hơn có thể làm cửa sông phân tầng hay phân tầng một phần, ngược lại một cơn bão tác động vào cửa sông có thể biến đổi một cửa sông phân tầng thành một cửa sông xáo trộn hoàn toàn. [21]

Gió thường là nguồn năng lượng chiếm ưu thế trong các đại dương, biển, các vùng vịnh, đầm phá và một số khu vực cửa sông ven biển lớn tác động của gió trên bề mặt tạo ra dòng chảy có tầm quan trọng đáng kể tác động lớn đến chế độ thủy lực và xâm nhập mặn hay phát tán vật chất loang trên bề mặt. Tác động của gió gây ra lực tác động ở lớp trên mặt của khối nước sinh ra một mô-men xoắn làm cho khối nước quay gây ra sự xáo trộn. Tuy nhiên, ở những cửa sông dài và hẹp, kín thì gió có thể hoặc không thể đóng một vai trò quan trọng. [21]

Tác động của dòng thủy triều tại vùng cửa sông theo hai hướng, xáo trộn tạo ra bởi ma sát của dòng triều với lớp đáy sông biển và lưu lượng dòng triều xâm nhập phụ thuộc vào quy mô kích thước độ sâu của cửa sông và biên độ thủy triều.

Dòng chảy sông là yếu tố chính quyết định tới cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông. Khi dòng chảy sông kết nối với cửa sông có dòng thủy triều tác động yếu thì dòng nước ngọt sẽ nổi lên trên nước mặn và chảy như một lớp và không pha loãng với nước biển, nước biển sẽ xâm nhập phía dưới tạo thành các nêm mặn. Khi dòng chảy sông và dòng chảy triều cân bằng thì xâm nhập mặn sẽ phụ thuộc vào độ lớn của thủy triều nêm mặn sẽ di chuyển lên xuống và nếu dòng thủy triều thắng thế thì chuyển động nêm càng có sẵn nhiều động năng để phá vỡ mặt phân cách và xáo trộn hỗn loạn các lớp nước ngọt và nước mặn. [21]

Ngoài các yếu tố như trên thì dòng hoàn lưu vùng cửa sông cũng có tác động đến cơ chế xâm nhập mặn tại vùng cửa sông. Tại cửa cửa sông, dòng chảy phía đáy có xu thế hút vào để thay thế dòng chảy thoát ra, có nghĩa là bên dưới lớp bề mặt chảy ra, nước sâu hơn chảy vào cửa sông, dòng chảy hai chiều này được gọi là dòng trao đổi, được nhiều tác giả gọi là dòng hoàn lưu cửa sông. Mặc dù dòng chảy hoàn lưu thường có cấp độ yếu hơn dòng chảy thủy triều, nhưng nó có cũng có ảnh hưởng tới xâm nhập mặn và sự phân bố của vật chất trong nước. Dòng hoàn lưu làm tăng đáng kể sự phân tán vật chất theo chiều dọc sông. [45]

1.2.4. Các nghiên cứu liên quan đến cửa sông phân tầng hoàn toàn

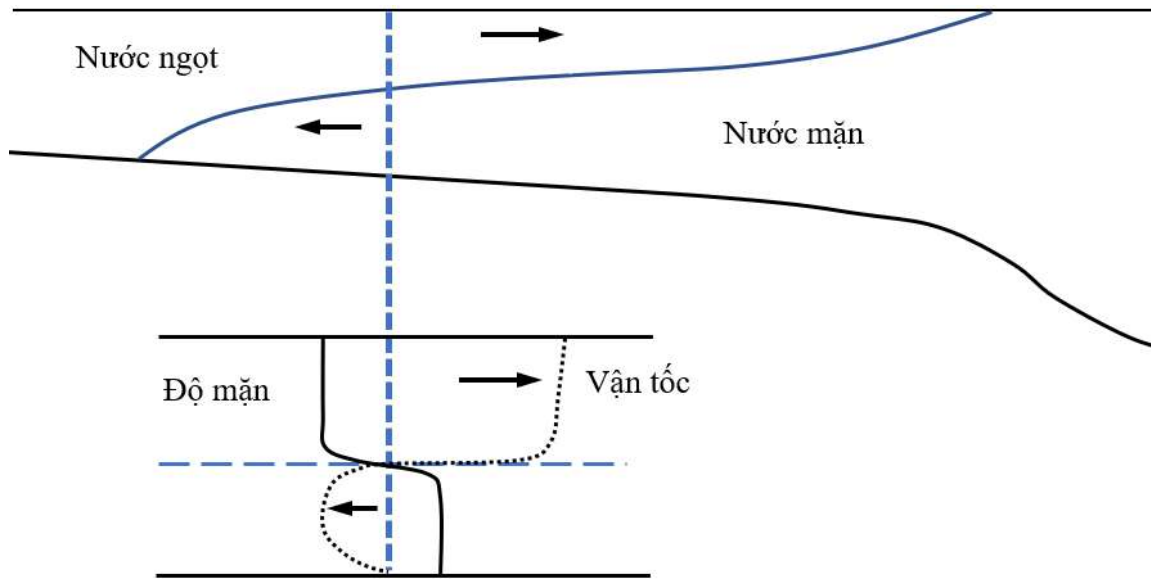
Có những khu vực trong các cửa sông, vùng nước ven bờ hay trong sông có thể xác định là “phân tầng” bởi vì ở đó tồn tại chênh lệch mật độ rất rõ ràng giữa lớp nước mặt và lớp nước nằm bên dưới.

Trong cửa sông, sự giảm độ mặn của lớp nước bề mặt có thể do dòng chảy của nước ngọt từ sông chính hoặc những sông nhánh của nó đổ ra. Ngoài ra, độ mặn của lớp trên mặt có thể bị ảnh hưởng bởi lưu lượng nhập lưu từ các nhánh sông suối nhỏ, lượng nước hồi quy từ sản xuất, nước thải... Cửa sông tồn tại sự thay đổi độ mặn rất rõ ràng tại độ sâu nào đó, được coi như tồn tại của “nêm mặn”. Tuy nhiên có những hệ thống cửa sông như những lạch sâu (fio), sâu đến nỗi tại đó dòng triều chảy rất yếu theo một cách khác với những hệ thống nêm mặn và được phân loại kiểu lạch sâu (fio). Khi triều xuống, nước bị giữ lại trong cửa sông trong thời gian triều lên trở nên tự do lan truyền trên lớp nước mặn hơn của biển hở. Nó tạo ra trường dòng chảy đặc trưng có thể nhìn thấy như một khu vực mịn của biển có một biên rõ rệt so với nước mặn hơn của vùng ven bờ.

1.2.4.1. Các đặc tính của cửa sông phân tầng (nêm mặn) [32]

Khi nước ngọt từ đất liền chảy vào một cửa sông là mạnh chiếm ưu thế và dòng triều là yếu sẽ hình thành một sự khác biệt rõ rệt về độ mặn giữa lớp trên và lớp sâu hơn. Sự khác nhau này xuất hiện vì năng lượng rối từ dòng triều không đủ để xáo trộn một cách đáng kể nước mặn và dòng chảy có nguồn từ sông. Nếu không có ma sát giữa những lớp cao hơn và thấp hơn, mặt phân cách phải nằm ngang và trải rộng lên thượng lưu cho đến khi nó chạm đáy sông đang cao dần lên. Trong thực tế, một phần ma sát tại mặt phân cách làm cho nó nghiêng xuống dưới về hướng thượng lưu, như vậy hình thành xâm nhập mặn theo dạng hình nêm. Một phân bố vận tốc tiêu biểu trung bình thủy triều trên một mặt phẳng cắt qua chiều rộng cửa sông, minh họa sự đồng nhất của vận tốc mặt nước đến độ sâu của mặt phân cách độ mặn, tại đó hướng dòng chảy đảo ngược. Một đặc tính của hệ thống nêm mặn là chênh lệch (gradient) mật độ lớn tại mặt phân cách ngăn chặn rất mạnh thành phần rối thẳng đứng, như vậy làm giảm xáo trộn qua mặt phân cách xuống một mức thấp nhất. Tuy nhiên, nếu vận tốc tương đối của lớp mặt nước so với lớp thấp hơn vượt quá một giới hạn nhất định,

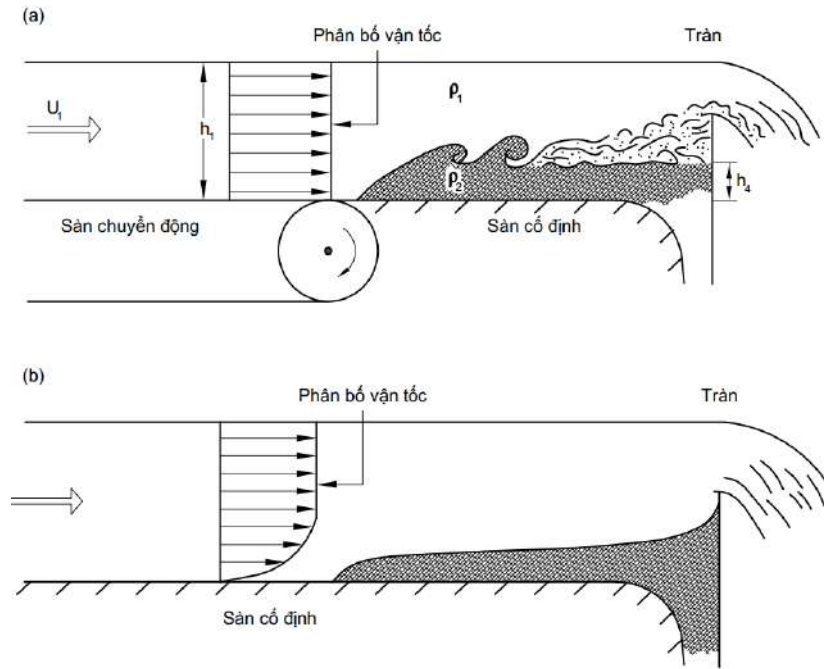
bất ổn định có thể xuất hiện tại mặt phân cách, tạo ra sự dịch chuyển hướng lên trên của muối từ nêm mặn.



Hình 1-13: Hình dạng đặc trưng của cửa sông phân tầng [32]

1.2.4.2. Chuyển động khi triều lên trong cửa sông phân tầng (nêm mặn) [32]

Để đánh giá cơ chế, chuyển động, xâm nhập mặn tại một cửa sông phân tầng khi thủy triều lên một số thí nghiệm trong phòng có thể mô phỏng để quan sát được hiện tượng này. Để minh họa mô phỏng những hiệu ứng, hiện tượng xuất hiện khi triều lên tại cửa sông phân tầng mạnh, có thể thử nghiệm bằng một thí nghiệm, thực nghiệm đơn giản là đặt một thùng hình chữ nhật với một vách chắn thẳng đứng ngăn cách nước ngọt với dung dịch muối, độ sâu của chất lỏng ở hai bên vách ngăn là bằng nhau. Khi rút nhẹ vách ngăn lên, cột nước có tỷ trọng lớn hơn tại phía nước mặn của thùng đẩy dung dịch muối xuống dưới nước ngọt và để duy trì tính liên tục thể tích, một dòng chảy bù mang nước ngọt chảy trên dòng xâm nhập mặn. Một trạng thái thực tế tương tự xuất hiện khi vận hành, mở cửa cống cho phép xáo trộn nước có mật độ khác nhau, những khảo sát thí nghiệm như trên được gọi là thí nghiệm “thông thủy” (Turner, 1973). [36], [32]



Hình 1-14: Thực nghiệm thiết lập để khảo sát xâm nhập mặn (Simpson, 1987) [36]

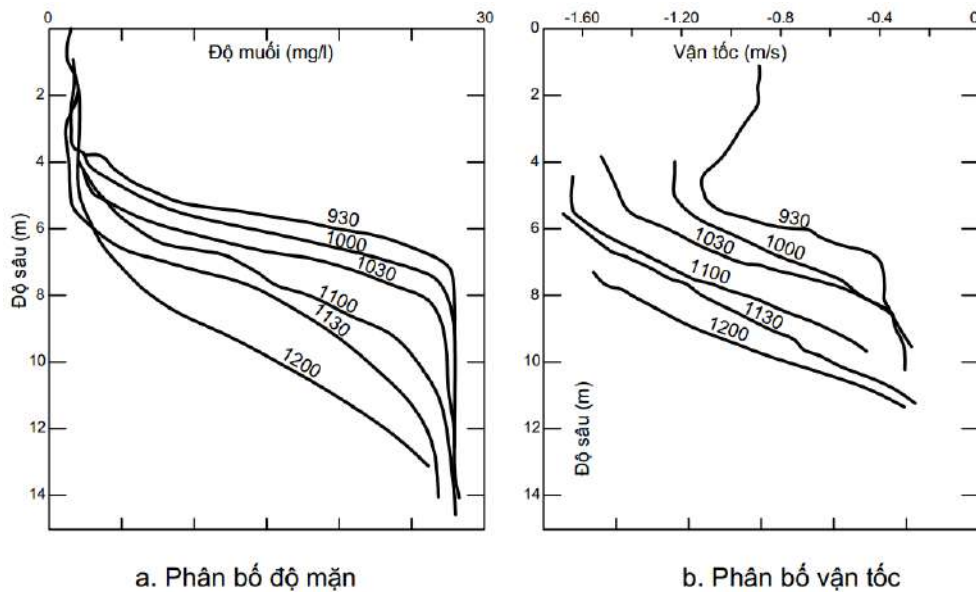
1.2.4.3. Chuyển động khi triều xuống trong cửa sông phân tầng [18], [32]

Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng các điều kiện xáo trộn, chuyển động trong các cửa sông phân tầng khi triều xuống rất khác so với những gì xuất hiện khi triều lên. Khi bắt đầu triều xuống, nêm mặn, được giữ lại vào cuối lúc triều lên là gần như ổn định và có xu hướng có mặt phân cách (front) khá rõ rệt với lớp nước phía trên của nó. Mức độ phân tầng này cho phép dòng chảy ngọt từ đất liền chảy trên lớp đậm là vùng xâm nhập mặn phía dưới, phát sinh sự trượt rõ rệt qua mặt phân cách.

Một khi độ cao thủy triều hạ thấp tại biên phía biển của cửa sông phân tầng, gradient mặt nước sẽ dốc và áp suất trở nên đủ mạnh để đẩy nêm mặn về phía biển. Ma sát tại đáy cản trở chuyển động này của muối và sự trượt đáng kể có thể thiết lập qua mặt phân cách mật độ. Sự trượt này có thể gây ra những rối bất ổn định K-H tại mặt phân cách, làm cho nêm muối có xu thế dày lên đáng kể vì nước ngọt xáo trộn với nước mặn tại mặt trên của nêm mặn. Tại giai đoạn triều xuống, lúc giữa kỳ triều xuống, một vài cửa sông dường như xảy ra sự xáo trộn nhanh, làm thay đổi cấu trúc mật độ thẳng đứng từ hai lớp trở thành liên tục phân tầng, hoặc xáo trộn hoàn toàn trong một vài thời điểm. Vào lúc cuối thời kỳ triều xuống, nêm mặn có thể khó xác định rõ nét khi nó bị vỡ thành các đốm loang do xáo trộn không đều và bị tác động bởi địa hình đáy nếu sông cạn. Nếu dòng triều chảy xuống và lưu lượng sông đủ

manh, nước mặn có thể bị ép ra khỏi cửa sông, để lại một gradient mật độ rõ ràng giữa nước ven bờ và cửa sông, nói cách khác, xâm nhập mặn có thể còn lại trong các cửa sông vào thời gian cuối triều xuống, cho phép nó lần nữa bắt đầu chu kỳ thâm nhập lại trong sông khi gradient mật nước trở nên nhỏ.

Một đặc tính chung của cửa sông phân tầng khi triều xuống là khi nêm mặn dày lên, nó cũng sâu hơn khi độ mặn mặt nước và đáy trở nên tương đối không đổi. Đặc tính này được minh họa bằng ví dụ cửa sông Fraser (Hình 1-15a) trong đó sự khác biệt độ mặn tại mặt nước và đáy quan trắc được là 26,0g/l trong thời gian giữa lúc triều xuống (Geyer và Farmer, 1989) [18]. Những bản ghi hồi âm cho thấy những sóng cuộn K - H hiện hữu trong nêm mật độ trong thời gian này, hỗ trợ giả thuyết rằng những bất ổn định trượt về cơ bản có quan hệ với xáo trộn. Trong nêm mặn và với phạm vi độ mặn từ 5,0g/l đến 25,0g/l, những số Richardson gradient nhỏ hơn 0,25 với một tỉ lệ đáng kể, những tính toán này xem xét sự trượt vận tốc bổ sung bởi sóng nội. Phát hiện này lần nữa giả thiết rằng bất ổn định trượt K - H là cơ chế trội. Phân bố vận tốc trong sông Fraser phù hợp với những phân bố độ mặn (Hình 1-15b), cũng tương đối tuyến tính qua nêm mật độ và có gradient tương tự tại mỗi thời gian phân bố. Sự duy trì mối tương tự này trong chu kỳ xáo trộn được xét đến nói lên rằng xáo trộn động lượng và độ mặn được thực hiện với những mức độ tương tự, dẫn đến tỷ lệ $K_z/N_z = 1,0$.



Hình 1-15: Những phân bố trong các cửa sông Fraser khi triều xuống [32]

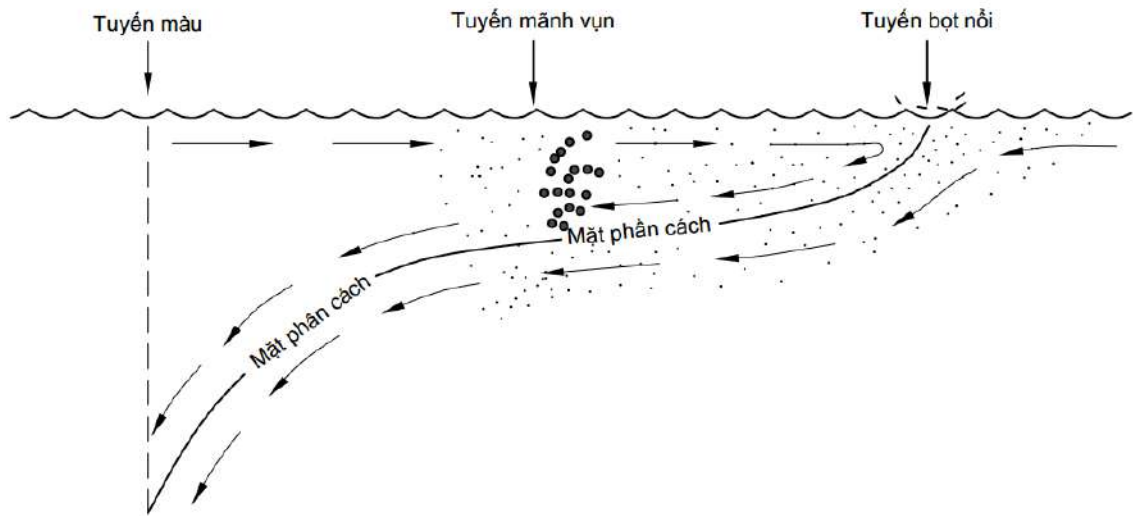
Đã lập luận rằng sự khởi đầu của dòng chảy trên phân giới có ảnh hưởng lên bất ổn định trượt qua mặt phân cách mật độ thông qua những thay đổi đối với sức cản đáy (Geyer và Farmer, 1989). Nếu số Richardson tổng hợp nhỏ hơn 1,0 (ứng với số Froude tại mặt phân cách lớn hơn 1,0) thì hướng chuyển động của lớp thấp hơn có xu hướng về phía biển, làm cho sức cản tăng lên đối với dòng triều xuống. Khi dòng triều xuống tăng đến cực đại của nó, sức cản đáy tăng lên và làm tăng sự trượt qua mặt phân cách mật độ. Cần thấy rằng sự trượt này chỉ bị hạn chế bởi sức mạnh của dòng triều xuống. Trạng thái này trái ngược với điều kiện dòng chảy dưới phân giới trong đó sự trượt qua mặt phân cách bị hạn chế bởi gradient áp; độ trượt này có giá trị cực đại khi $Ri_B = 1,0$ và sẽ có vẻ nhỏ hơn đáng kể so với độ trượt xuất hiện từ ma sát đáy dưới dòng chảy trên phân giới.

1.2.4.4. Các nghiên cứu về mặt phân cách tại các cửa sông phân tầng [24], [27], [32], [38]

Thuật ngữ mặt phân cách “front” nói đến những khu vực quy mô nhỏ, trong đó có sự thay đổi đáng kể theo hướng ngang của những biến số thủy văn, như vận tốc dòng chảy và mật độ nước. Mặc dầu không chỉ thấy trong những điều kiện phân tầng (Largier, 1993), những mặt phân cách thường liên quan đến những thay đổi rõ rệt trong cấu trúc mật độ thẳng đứng. Những mặt phân cách rất quan trọng trong việc xem xét sự phát tán với một số lý do như những khác biệt vận tốc trong khu vực lân cận của những mặt phân cách có thể hoàn toàn nhận thấy được, dẫn đến những khu vực hội tụ và phân kỳ.

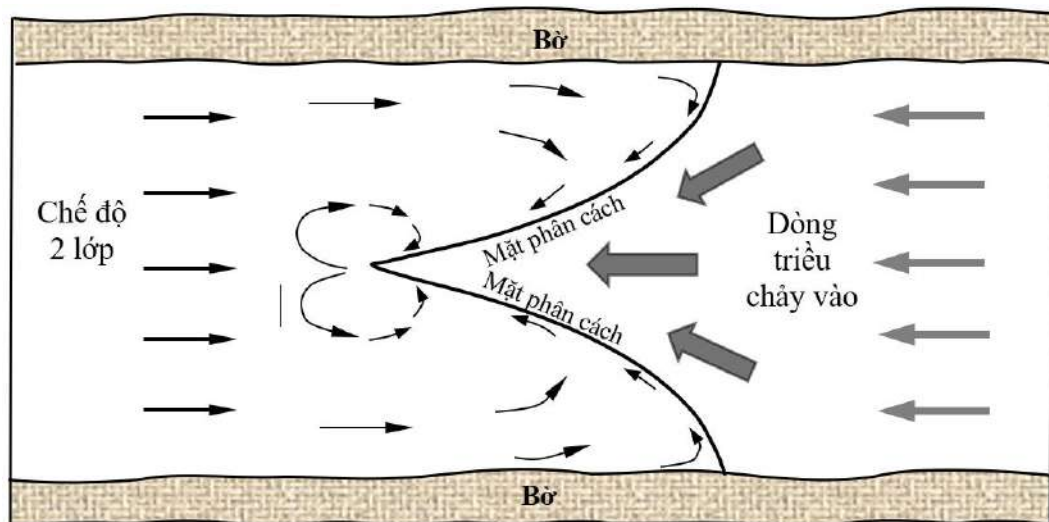
Tính không liên tục như vậy tác động như một rào cản đối với sự phát tán ngang bởi chuyển động rối và cũng hình thành những khu vực bẫy trong đó pha loãng do xáo trộn thẳng đứng ít có hiệu quả hơn. Những chất nổi tập hợp dọc theo từng hàng được hình thành bởi những mặt phân cách, bởi vì khi nước mặt chìm xuống dưới một vùng hội tụ, lực nổi ngăn cản chuyển động này và vật nổi còn lại trên mặt nước; tập hợp của vật nổi liên tục được thêm vào vật chất nổi do dòng chảy mặt bổ sung về phía trượt. Hình 1-15 minh họa trạng thái này cho một mặt phân cách trượt, một trong số những kiểu mặt phân cách được quan trắc thường xuyên nhất (Bowman và Iverson, 1978). Những khảo sát từ máy bay cho thấy rõ những mặt phân cách bởi vì màu nước

thay đổi qua một mặt phân cách và có sự tích tụ của vật nổi, như mảnh vụn và bọt trong những hàng dài chạy song song với những ảnh hàng không có màu.



Hình 1- 16: Hình thành những lớp mỏng tại vị trí của một front [32]

Các mặt phân cách được tạo thành do các nguyên nhân sau: mặt nước nóng lên, gradient nhiệt muối, dạng vệt loang, mặt phân cách trượt.



Hình 1-17: Sự hình thành một mặt phân cách xâm nhập thủy triều [32], [37]

1.2.5. Các nghiên cứu liên quan đến cửa sông phân tầng một phần [25], [32], [40], [42], [43], [44]

Những quan trắc trong các cửa sông phân tầng một phần đã chỉ ra rằng cấu trúc vận tốc và mật độ có thể trải qua những biến đổi đáng kể trong thời gian một chu kỳ thủy triều, dẫn đến những thay đổi rõ rệt hệ số khuếch tán dọc hiệu quả K_{xe} (West và Mangat, 1986; West và Shiono, 1988) [42], [43]. Qua phân tích các chuyển động lên

xuống của các vùng cửa sông phân tầng hoàn toàn cho thấy, những thay đổi đáng kể và đôi khi nhanh của cấu trúc mật độ và vận tốc có thể xuất hiện trong các cửa sông nêm mặn. Chúng được gọi là những chu kỳ xáo trộn mạnh (IMP), được quan trắc trong những hệ thống phân tầng một phần.

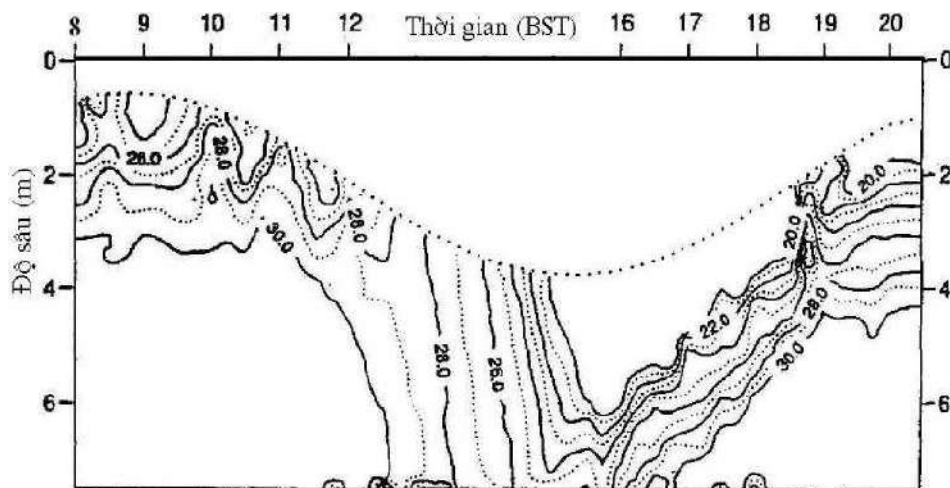
Ví dụ, những quan trắc tại một vị trí trong cửa sông Tees, phía Đông Bắc nước Anh, chỉ ra rằng một IMP bắt đầu xuất hiện vào khoảng 11,0 giờ, ứng với 1,5 giờ sau nước lớn (New và nnk 1986) [32]. Tại vị trí này sự chuyển động mạnh về phía biển của nước mặt được dự kiến gây ra sự phân tầng tăng cường trong thời gian triều xuống, khi nước nhiễm mặn được mang về phía biển trên lớp có độ mặn thấp hơn.

Tuy nhiên, như thấy trong hình vẽ, việc bắt đầu xáo trộn mãnh liệt làm cho nêm mặn sẽ bị mòn xuống dưới, mang muối nhiều hơn lên nước gần mặt. Sự xáo trộn mạnh này tiếp tục cho đến khoảng 5 giờ sau nước lớn, bằng thời gian đó cột nước gần như đồng nhất và bất kỳ sự xáo trộn tiếp theo nào cũng có hiệu ứng không đáng kể lên phân bố độ mặn nước mặt.

Như đã biết, sự phát triển của rối mạnh có thể làm cho cửa sông phân tầng một phần, ít nhất cũng là cục bộ, để thay đổi trạng thái xáo trộn mạnh. Sự thâm nhập của muối khi triều lên, kèm theo sự xáo trộn ít rõ rệt hơn, sau đó có thể trả lại hệ thống về trạng thái phân tầng một phần của nó; quá trình này tương đương với thực nghiệm xâm nhập mặn của Linden và Simpson (1988). Xáo trộn mãnh liệt xuất hiện đáng chú ý nhất khi triều xuống trong các nhánh giữa của những hệ thống trong các nhánh cao hơn của một vài cửa sông, có xu hướng đồng nhất khi triều lên và phân tầng khi triều xuống (ví dụ sông Tamar tại phía Tây Nam nước Anh (West và nnk., 1990). [44]

Một chuỗi những bất ổn định trong dòng chảy phân tầng có thể có nguyên nhân khác và như được đề cập (Thorpe, 1987) [40], những bất ổn định với nguyên nhân khác nhau thậm chí có thể xuất hiện tại cùng một chỗ và cùng một thời gian. Phân bố chi tiết trong một nhánh sông phân tầng một phần của cửa sông Tees cho thấy một số hiện tượng xáo trộn có lẽ do các nguyên nhân khác nhau (Lewis, 1996) [25]. Khoảng một nửa chặng triều xuống (tức là 12, 30 giờ), cấu trúc độ mặn trải qua một thay đổi đáng kể; sự phân kỳ của đường đẳng mặn tại khoảng 2,0 m độ sâu giả thiết rằng nó xuất hiện từ sự bất ổn định mật phân cách. Dựa vào những số Richardson gradient và

tổng hợp đã quan trắc, có vẻ sự kiện xáo trộn được thúc đẩy bởi những bất ổn định Kelvin - Helmholtz phát triển tại đáy của nêm mật độ khi số Richardson gradient trở nên nhỏ hơn 0,25. Những bất ổn định mật phân cách có thể được trợ giúp bởi sự trượt dòng chảy phát sinh bởi những sóng nội hình thành trong cửa sông Tees. Sau đó cột nước trở nên đồng nhất và được quy cho rồi phát sinh tại đáy, có khả năng xáo trộn muối và nước ngọt trên toàn bộ độ sâu, khi những bất ổn định mật phân cách đã phá vỡ rào chắn hình thành bởi nêm mặn.



Hình 1-18: Sự biến đổi theo thời gian trong phân bố độ mặn tại một vị trí cửa sông Tees [25]

Sự đồng nhất bởi những bất ổn định chỉ do những sóng cuộn K-H có vẻ không chắc bởi vì năng lượng trong những đặc tính như vậy là không đầy đủ. Mặc dù Hình 1-18 chỉ thể hiện sự thay đổi theo thời gian trong cấu trúc tại một điểm xác định, những quan trắc bằng hồi âm chỉ ra rằng những thay đổi lớn hơn trong phân bố độ mặn đã xuất hiện tại những thời điểm tương tự dọc theo toàn bộ nhánh sông 2km, nói lên rằng bình lưu đơn giản của nước xáo trộn đi qua điểm đo không phải là lý do cơ bản của những biến đổi trong cấu trúc độ mặn quan trắc được.

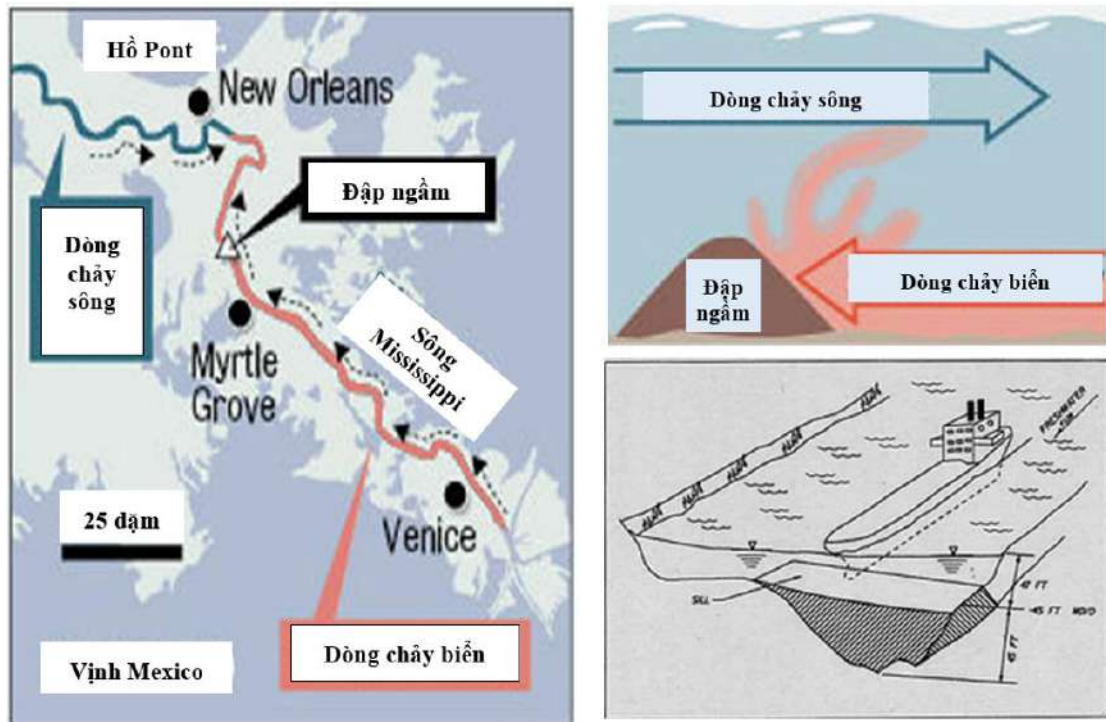
Khi triều lên, những sóng cuộn K - H xuất hiện để phát triển trên mặt phía trên của nêm mặn đang đến (Hình 1-18). Tại xấp xỉ một nửa pha triều lên một vài bất ổn định rất lớn phát triển, làm tăng nhanh độ mặn mặt nước; nguyên nhân của những đặc điểm chính này, đã được quan trắc trong những trường hợp khác, vẫn chưa được biết nhưng có thể tương tự như những sóng cuộn lớn được quan trắc để hình thành tại mặt trên của vùng xâm nhập mặn trong thực nghiệm ở phòng thí nghiệm (Simpson, 1997).

1.2.6. Một số nghiên cứu tính toán điển hình về cơ chế xâm nhập mặn

Nghiên cứu về cơ chế truyền mặn và nêm mặn vùng cửa sông ven biển được nghiên cứu khá lâu trên thế giới và tiên phong là các nhà khoa học Hoa Kỳ đã có những nghiên cứu từ lý thuyết và áp dụng vào thực tế. Từ đầu thập niên 1950 các nghiên cứu về nêm mặn đã được nghiên cứu điển hình là các tác giả: Harlow G. Farmer (1951) nghiên cứu thực nghiệm về nêm mặn; Harlow G. Farmer và George W. Morgan (1953) đã có những lời giải giải tích cho nêm mặn. Cùng với sự phát triển của phương pháp tính thì các bài toán về nêm mặn đã được nghiên cứu giải bằng phương pháp số với các mô hình toán và mô hình vật lý lớn. Các nghiên cứu của C. Ibaneza, J. Saldana and N. Prat (1999) thuộc Tây Ban Nha nêm mặn cho vùng cửa sông Ebre trên cơ sở nghiên cứu của Keulegan về cơ chế dừng của các nêm mặn. Các tác giả Geyer, W. R, Smith, J. D, Farmer, D. M Geyer (1985) tập trung nghiên cứu về thời gian hoạt động của các nêm mặn.

Nghiên cứu tại cửa sông Mississippi đã được nhiều tác giả thực hiện và kết quả các nghiên cứu cho thấy trong thời kỳ dòng chảy thấp (mùa kiệt), cửa sông Mississippi là cửa sông có độ phân tầng cao hoặc cửa sông nêm mặn. Quá trình nghiên cứu xâm nhập mặn và nêm mặn tại các cửa sông ven biển đã được nghiên cứu và ứng dụng khá nhiều vào thực tế xây dựng các giải pháp công trình, phi công trình, tùy tình hình và điều kiện khác nhau như ngăn mặn, lấy nước... Một trong những nghiên cứu điển hình và thành công là nghiên cứu chống xâm nhập mặn và ngăn chặn phát triển hoạt động của nêm mặn vào sâu trong đất liền làm ảnh hưởng tới việc cấp nước sinh hoạt trên sông Mississippi của Hoa Kỳ. Một giải pháp thích hợp nhất được lựa chọn vừa đảm bảo giảm xâm nhập mặn vừa duy trì ảnh hưởng của chế độ thủy triều để duy trì hệ sinh thái mặn của vùng cửa sông, đồng thời thuận lợi cho tàu bè lớn lưu thông là áp dụng kiểu đập ngầm (under water sill) trên sông. Trên cơ sở nghiên cứu về cơ chế xâm nhập mặn cho thấy vào mùa lũ (với lưu lượng $8.500\text{m}^3/\text{s}$) nêm mặn ở gần phía cửa biển, nhưng vào mùa kiệt nêm mặn sẽ tiến sâu vào nội địa, vào năm hạn hán như năm 1988 hay trong thập niên 1930 khi lưu lượng dòng chảy chỉ còn $2.831\text{m}^3/\text{s}$ nêm mặn đến New Orleans (cách biển 160km). Nêm mặn có thể di chuyển từ 3 đến 5km/ngày, xuôi dòng hay ngược dòng tùy lưu lượng dòng chảy. Đập ngầm được xây

dựng vào năm 1988 có cao trình đỉnh đập cách mặt nước 14,1m (để tàu lớn thông thương), có chiều dài 500 m ở khúc sông rộng 600m cách biển khoảng 100km, sau khi xây dựng thì phía thượng lưu đập hầu như nước ngọt để cung cấp cho sinh hoạt quanh năm.[39]



Hình 1-19: Đập ngầm ngăn mặn trên sông Mississippi - Hoa Kỳ

1.3. Các nghiên cứu trong nước

Việt Nam với đường bờ biển dài hơn 3.000km chịu ảnh hưởng của thủy triều biển Đông và biển Tây, hầu hết các diện tích thấp trũng ven biển đều bị ảnh hưởng của quá trình xâm nhập mặn. Xâm nhập mặn ảnh hưởng lớn tới hai đồng bằng lớn của Việt Nam là Đồng bằng sông Hồng và Đồng bằng sông Cửu Long. Hàng năm vào mùa kiệt mặn xâm nhập vào sâu trong đất liền ảnh hưởng lớn tới sản xuất nông nghiệp và một số ngành kinh tế khác.

Do điều kiện tự nhiên, vị trí địa lý, địa hình thấp ĐBSCL chịu ảnh hưởng mặn cả từ biển Đông và biển Tây. Đặc biệt, trong mùa kiệt khi mà lưu lượng thượng lưu về ít, độ dốc đáy sông nhỏ tạo điều kiện cho thủy triều xâm nhập sâu vào trong hệ thống sông chính và kênh rạch nội đồng và diện tích bị ảnh hưởng khoảng hơn 2 triệu ha.

Nghiên cứu về xâm nhập mặn tại ĐBSCL đã được nhiều cơ quan và nhà khoa học thực hiện để phục vụ sản xuất. Các nghiên cứu dựa trên số liệu thực đo và các mô hình toán số, hiện nay mô hình toán số thực hiện nghiên cứu tính toán xâm nhập mặn tại ĐBSCL chủ yếu là mô hình 1D. Hiện nay, có nhiều nghiên cứu về thủy lực và xâm nhập mặn tại ĐBSCL và các nghiên cứu điển hình có thể kể ra như sau:

1.3.1. Các nghiên cứu lý thuyết về thủy lực và xâm nhập mặn

Vấn đề lý thuyết về thủy lực và lan truyền chất trên hệ thống sông kênh khá phức tạp yêu cầu cao về chuyên môn thủy lực, toán, lý, hóa học... và kinh nghiệm thực tế do đó các nghiên cứu về lý thuyết là khá hạn chế. Các bài toán thủy lực và chất lượng nước cho hệ thống sông kênh cơ bản được các tác giả trong nước tính toán bằng mô hình toán 1 chiều. Các mô hình thủy lực và chất lượng hiện nay chủ yếu là mô hình một chiều cho mạng sông kênh đều giải số hệ phương trình Saint – Venant một chiều cho dòng chảy và phương trình lan truyền chất một chiều cho lan truyền mặn hay lan truyền các chất ô nhiễm của chất lượng nước như BOD, DO, tổng Nitơ, tổng Photpho... Mặc dù các mô hình đều xuất phát từ một hệ phương trình vật lý (hay cơ học) nhưng do cách giải số (thuật toán) khác nhau, cách tổ chức chương trình máy tính khác nhau nên kết quả cho ra cũng khác nhau. Với hệ phương trình Saint – Venant một chiều do dòng chảy thì phương pháp số truyền thống được sử dụng là phương pháp sai phân ẩn, hiện 4 điểm hay 6 điểm hoặc sai phân xen kẽ điểm mực nước và điểm lưu lượng. Thuật toán số cho phương trình truyền chất thường là các sai phân phân rã với phương pháp đường đặc trưng hay phương pháp thể tích hữu hạn. Đến thời điểm hiện nay, tại Việt Nam chỉ có một số rất ít các nhà khoa học nghiên cứu sâu về lý thuyết và xây dựng được các mô hình để giải quyết bài toán thủy lực và chất lượng nước. Một số nghiên cứu chuyên sâu và mô hình đã được ứng dụng vào thực tế có thể kể ra như sau:

Cố GS. Nguyễn Như Khuê - Mô hình VRSAP: (Viet nam River System And Plain): Mô hình này lần đầu tiên được áp dụng cho hệ thống sông Hồng-Thái Bình, sau đó được sử dụng tính lũ cho đồng bằng sông Cửu Long. Đây là bộ chương trình được sử dụng rộng rãi, mọi người có nhu cầu đều có thể tiếp cận với cả phần nguồn và chương trình. Ở nước ta có nhiều phiên bản VRSAP, Viện Quy hoạch Thủy lợi Hà Nội sử dụng phần mềm này tính lũ cho hệ thống sông Hồng - Thái Bình, Viện Quy

hoạch Thủy lợi miền Nam đã dùng phần mềm này tính lũ cho ĐBSCL. VRSAP đã đạt được những thành tích đáng kể phục vụ công tác và quản lý nguồn nước đồng bằng Bắc Bộ. Cơ sở của chương trình là hệ phương trình Saint - Vernant 1 chiều đầy đủ và giải theo lược đồ sai phân ẩn có tuyến tính hoá. Trong những phiên bản sau của VRSAP đã đưa thêm khả năng tính xâm nhập mặn. Mô hình có khả năng mô phỏng sự trao đổi dòng chảy trong sông và các ô chứa như ô ruộng (mô hình giả hai chiều) cũng như mô phỏng hoạt động của các công trình thủy lợi. Hiện nay, mô hình này vẫn được sử dụng trong một số nghiên cứu tính toán. [1]

GS.TSKH Nguyễn Ân Niên - Mô hình KOD01: Nhóm nghiên cứu dưới sự chủ trì của đã xây dựng năm 1980. Cơ sở của mô hình là hệ phương trình Saint - Vernant 1 chiều với kỹ thuật sai phân hiện phục vụ tính toán dòng chảy lũ hệ thống sông Hồng-Thái Bình và hệ thống sông Cửu Long. Do yêu cầu thực tế của nghiên cứu và sản xuất mô hình cũng đã được bổ sung thêm phần tính toán xâm nhập mặn và phù sa. Sơ đồ giải của mô hình tính là sơ đồ Lax (tam giác thuận) chỉ thích hợp cho việc giải phương trình liên tục mà không thích hợp với những phương trình chuyển động (phương trình quyết định tính truyền sóng). GS.TSKH Nguyễn Ân Niên chỉ dùng sơ đồ này cho phương trình sai phân tìm mực nước các ô chứa (sông và đồng) Z' của lớp thời gian sau. Còn phương trình chuyển động giải theo kiểu ẩn, tức là sơ đồ tam giác ngược và chính cách giải này đã làm triệt tiêu sai số của sơ đồ Lax nếu bước thời gian Δt nhỏ hơn bước thời gian giới hạn (Δt_{gh} theo tiêu chuẩn Levy Friedrich-Courant) cỡ 6-10 phút cho bài toán lũ. Sơ đồ tính quá đơn giản và không phải đưa vào bất kỳ xử lý nào đối với mạng lưới kênh, sông, ô đồng, công trình mà cứ tính toán như chúng hiện có. Nhược điểm chính của sơ đồ là hạn chế bước thời gian, nhưng do không phải khử đuôi, tính lặp nên khối lượng tính toán nhỏ và hoàn toàn có thể so sánh với tốc độ giải với các sơ đồ ẩn. Mặt khác sơ đồ hiện chỉ bảo đảm tính bảo toàn cục bộ địa phương và đôi khi gặp khó khăn trong bảo toàn toàn cục. Ngoài ra, để các kênh, ô ruộng nhỏ không làm hạn chế bước thời gian tính chung có thể tính chúng với bước thời gian lẻ $\Delta t/n$ để bước lẻ này phù hợp với Δt_{gh} của các ô sau này; sau n bước tính lại hòa nhập với mạng lưới tính chung. Một điều đáng tiếc là do nhiều lý do mà hiện nay mô hình này không được phát triển thêm và ít được sử dụng trong thực tế. [1]

GS.TS Nguyễn Tất Đắc - Mô hình SAL và VRSAP-SAL: Mô hình được xây dựng chặt chẽ về mặt toán học, dựa trên sơ đồ sai phân ẩn 4 điểm của Preissman, nhưng lấy trọng số bằng $2/3$ để giảm thiểu sai số trong phép sai phân. Cách giải chia làm 2 bước (sau khi tuyến tính hóa hệ phương trình đại số) như sau: Bước 1- Thiết lập các công thức truy đuổi để tính mực nước và lưu lượng tại các mặt cắt. Dùng các công thức này để thiết lập hệ phương trình (gọi là hệ phương trình nút) mà ẩn số chỉ còn là mực nước tại các hợp lưu. Hệ phương trình này có số ẩn nhỏ hơn rất nhiều so với hệ có ẩn là mực nước tại các mặt cắt, nên giải nhanh và tốn ít bộ nhớ; Bước 2: Sau khi giải hệ phương trình nút sẽ được mực nước tại 2 đầu mỗi nhánh, và khi đó có thể giải cho mỗi nhánh riêng rẽ khi sử dụng lại công thức truy đuổi ban đầu. Thực tế việc tính nhanh hay chậm là ở độ phức tạp của hệ kênh sông được mô phỏng, nếu số lượng các hợp lưu càng nhiều thì thời gian tính càng nhiều hơn. Hơn nữa nếu dùng thuật toán lặp thì thời gian tính tăng theo số lần lặp. Mặc dù là sơ đồ ẩn, tuy nhiên bước thời gian lớn cũng ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả. Thông thường bước thời gian 30 phút là đủ bảo đảm cho cả tính dòng chảy và mặn. Nếu chỉ tính dòng chảy thì bước thời gian 1 giờ cũng đủ bảo đảm chính xác. Có thể nói cách chia ra 2 bước tính là một sáng tạo và phát triển học thuật đáng kể của mô hình SAL. Việc tính lan truyền chất trong SAL dựa trên thuật toán phân rã. Khi giải phương trình tải thuần túy dùng phương pháp đường đặc trưng ẩn với cách nội suy spline bậc 3 bảo đảm giảm tối đa khuếch tán số và do mặn lan tới đâu tính tới đó nên tốc độ tính của SAL rất nhanh. VRSAP-SAL là sơ đồ cải tiến nhằm phối hợp một số ưu điểm của VRSAP với SAL. Về mặt thuật toán, cấu trúc số liệu và phần tính truyền chất giữ nguyên như SAL. Hiện nay, GS.TS Nguyễn Tất Đắc vẫn đang nghiên cứu phát triển mô hình để giải quyết các bài toán về chất lượng nước khác như lan truyền chua phèn và đặc biệt đã chuyển đổi sang mô hình hai chiều ngang (2DH) kết hợp với GIS với nhiều phiên bản và các mô hình hiện vẫn được sử dụng trong các tính toán cho các bài toán thực tế. [1]

PGS.TS. Nguyễn Hữu Nhân - Mô hình HYDROGIS: Đây là phần mềm có phần giao diện khá tiện dụng so với các mô hình của các tác giả trong nước và đã sử dụng kết nối công cụ GIS trong biểu diễn kết quả. Chưa có nhiều công bố chính thức

của tác giả về thuật toán giải tuy nhiên theo tìm hiểu thì hệ phương trình vi phân trong kênh sông v là hệ Saint-Venant và dùng sơ đồ sai phân 4 điểm của Preissman và có thêm thành phần gradient độ mặn (chương trình tính thủy lực và truyền chất song song). Hiện nay, mô hình này cũng đang được sử dụng trong thực tế. [1]

GS.TS Tăng Đức Thắng: Trên cơ sở các nghiên cứu về ĐBSCL và các yêu cầu thực tế từ sản xuất GS.TS Tăng Đức Thắng đã nghiên cứu và phát triển Lý thuyết lan truyền các nguồn nước (Lý thuyết thành phần nguồn nước). Hiện nay lý thuyết này đang được ứng dụng để nghiên cứu rất hiệu quả trong thực tế nhiều vấn đề liên quan đến nguồn nước và môi trường. Việc áp dụng tính toán và phân tích nguồn nước đã cho thấy đây là công cụ rất mạnh, giải quyết được nhiều vấn đề mà ở các phương pháp truyền thống chưa đề cập. Lý thuyết này đã được tác giả và các cộng sự nghiên cứu rất nhiều cho ĐBSCL khi nghiên cứu đặc tính thủy động lực và chất lượng nước, các thành phần nguồn nước (mặn, ngọt, ô nhiễm,...). Đây là lý thuyết áp dụng nhiều vào thực tế tuy nhiên chưa xây dựng một mô hình thủy lực và chất lượng nước theo lý thuyết này mà vẫn sử dụng các mô hình hiện có để tính toán.

1.3.2. Các nghiên cứu ứng dụng thực tế về xâm nhập mặn

Để phục vụ yêu cầu phát triển kinh tế xã hội cho vùng ven biển ĐBSCL, từ năm 2004, GS.TS Lê Sâm (2004) đã thực hiện đo đạc khảo sát, tính toán để đánh giá diễn biến xâm nhập mặn cho toàn bộ vùng ĐBSCL về phạm vi, mức độ xâm nhập mặn, thời gian và diễn biến xâm nhập mặn cho các tỉnh ĐBSCL đặc biệt là các tỉnh ven biển. Kết quả nghiên cứu này đã góp phần quan trọng trong định hướng bố trí sản xuất nông nghiệp, thủy sản và cấp nước sinh hoạt cho vùng ven biển ĐBSCL. [11]

Một nghiên cứu khá chi tiết cho hệ thống các công trình thủy lợi cho vùng TGLX của GS.TSKH Nguyễn Ân Niên (2004). Nghiên cứu đã đề xuất được giải pháp quản lý hệ thống công trình kiểm soát lũ vùng Tứ giác Long Xuyên để nâng cao hiệu quả thoát lũ và chủ động phân phối nước ngọt, kiểm soát xâm nhập mặn. Nghiên cứu này đã đánh giá được chế độ thủy văn thủy lực, xâm nhập mặn toàn vùng TGLX trên cơ sở nghiên cứu tổng thể toàn đồng bằng từ đó đưa ra được các giải pháp công trình trong quản lý tổng hợp tài nguyên nước cho vùng TGLX. [8]

Để đánh giá xâm nhập mặn ĐBSCL dưới tác động mực nước biển dâng và sự suy giảm lưu lượng từ thượng nguồn các tác giả Trần Quốc Đạt, Nguyễn Hiếu Trung và Kanchit Likitdecharote, (2010) đã sử dụng mô hình thủy lực 1D trong tính toán. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng: Xâm nhập mặn là một trong những vấn đề lớn ở đồng bằng sông Cửu Long và nó có xu hướng trầm trọng hơn trong tương lai do mực nước biển dâng và lưu lượng từ thượng nguồn suy giảm. Trong nghiên cứu sử dụng mô hình MIKE11, sơ đồ tính được xây dựng dựa trên cơ sở dữ liệu của hai năm 1998 và 2005. Kết quả mô phỏng xâm nhập mặn năm 1998 được chọn kịch gốc so sánh với bốn kịch bản xâm nhập mặn vào các năm 2020 và 2030. Bốn kịch bản này được xây dựng dựa trên kịch bản biến đổi khí hậu B2, kịch bản tăng diện tích nông nghiệp và kịch bản diện tích nông nghiệp không đổi. Hai kịch bản đầu là khi mực nước biển dâng 14 cm và lưu lượng thượng nguồn giảm 11% và 22%. Kịch bản số ba và bốn là khi mực nước biển dâng 20cm và lưu lượng thượng nguồn giảm 15%. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng độ mặn 2.5g/l xâm nhập 14km sâu hơn kịch bản gốc năm 1998. [1]

Dòng chảy về ĐBSCL phụ thuộc chặt chẽ vào dòng chảy từ thượng lưu sông Mê Công, các thay đổi tại khu vực thượng lưu đặc biệt là việc xây dựng các hồ chứa thượng lưu đã làm thay đổi mạnh đến chế độ dòng chảy về đồng bằng. Một nghiên cứu nổi bật về vấn đề này được TS. Tô Quang Toàn thực hiện năm 2013. Nghiên cứu đánh giá tác động của các bậc thang thủy điện trên dòng chính hạ lưu sông Mê Công đến dòng chảy, môi trường kinh tế xã hội vùng ĐBSCL và đề xuất giải pháp giảm thiểu bất lợi cho vùng ĐBSCL. Nghiên cứu đã đánh giá được hiện trạng và các quy hoạch về các bậc thang thủy điện trên hệ thống sông Mê Công, trên cơ sở đó đánh giá lại chế độ thủy văn thủy lực, xâm nhập mặn cho ĐBSCL do các tác động từ thượng nguồn và ảnh hưởng của nước biển dâng. [13]

Một nghiên cứu khá sâu về tương tác thủy triều và xâm nhập mặn cho vùng cửa sông Cửu Long đã được TS. Lương Quang Xô thực hiện năm 2007. Nghiên cứu này tập trung vào tính toán tương tác triều mặn vùng cửa sông Cửu Long có xét đến tương tác động lực sông biển. Nghiên cứu đã xây dựng sơ đồ tính giải kết nối đồng thời bài toán một chiều trong hệ sông ngòi phức tạp của ĐBSCL và bài toán hai chiều ngoài

biển. Nghiên cứu đã kết nối được sơ đồ 1D trong sông và sơ đồ 2D ngoài biển, đồng thời đã đánh giá ảnh hưởng của hệ số sửa chữa động lượng ξ , hệ số nhót rồi ngang N tới dòng chảy và độ mặn trong phương trình 2D ngang trong biển mà nhiều mô hình tính toán đã bỏ qua... Thành quả nghiên cứu là xây dựng được bộ chương trình đủ để thực hiện tính toán cho hệ bài toán rất phức tạp như ở ĐBSCL kể cả về mặt thủy lực và truyền chất. [16]

Trong nghiên cứu liên quan đến giải pháp tổng thể kiểm soát ngập lụt vùng hạ lưu sông Đồng Nai - Sài Gòn và vùng phụ cận của GS.TS Nguyễn Quang Kim đã có một nghiên cứu tính toán nhỏ liên quan đến phân tầng mặn tại vùng cửa sông Đồng Nai - Sài Gòn. Trong nghiên cứu này nhóm tác giả đã tính toán xâm nhập mặn cho khu vực cửa sông Đồng Nai bằng mô hình mô hình EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) và đã tính toán được mặn và một số chỉ tiêu về chất lượng nước theo không gian 2 chiều và 3 chiều. [7]

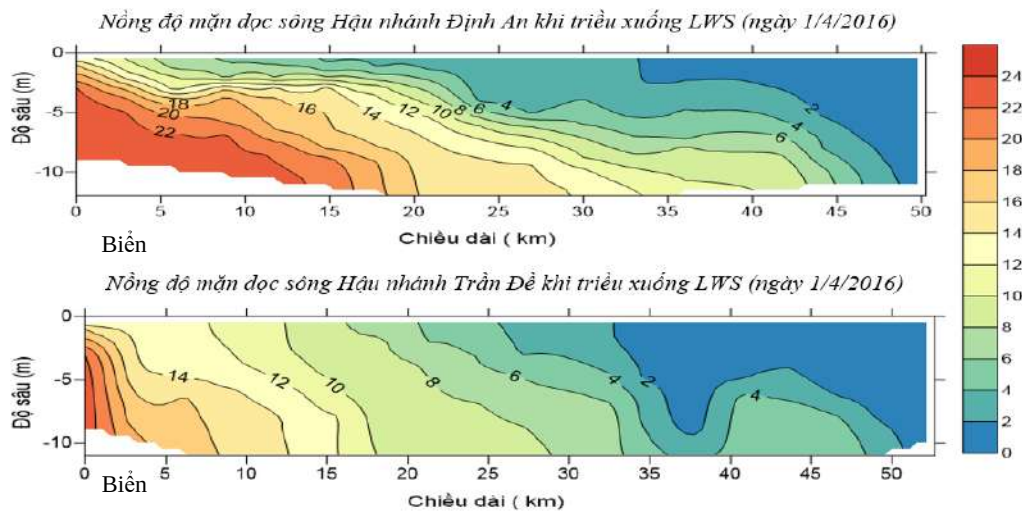
TS. Nguyễn Anh Đức có nhiều nghiên cứu về chế độ thủy động lực và xâm nhập mặn cho các vùng cửa sông nói chung và cho hệ thống sông ĐBSCL nói riêng. Một nghiên cứu nổi bật là Luận án tiến sĩ: “Salt intrusion, tides and mixing in multi-channel estuaries - Xâm nhập mặn, thủy triều và sự xáo trộn trong các cửa sông nhiều nhánh” được hoàn thành vào năm 2008. Đây là một nghiên cứu khá tổng thể từ việc đo đạc hiện trường, xây dựng các công thức thực nghiệm, tương quan đồng thời cũng xây dựng mô hình toán 1D để tính toán. Nghiên cứu này tập trung cho các cửa sông tại ĐBSCL nhưng được tác giả thực hiện tại nước ngoài (Hà Lan) do đó đã tổng quan được rất nhiều các nghiên cứu có liên quan cũng như phương pháp nghiên cứu hiện đại trên thế giới. Kết quả nổi bật của nghiên cứu này là: Phát triển thành công một phương pháp phân tích dự báo cho việc phân tích xâm nhập mặn và xáo trộn trong các cửa sông nhiều nhánh. Cách tiếp cận mới cũng so sánh với các mô hình thủy động lực và quan sát, cho thấy ứng dụng của nó trong thực tế rất tốt. Kết quả quan trọng nhất của nghiên cứu là đã phát triển một phương trình mới để định lượng động lực thủy triều lên xuống và sự xâm nhập mặn dọc sông. Đề xuất đã được thực hiện để áp dụng thêm các phương pháp tiên đoán đến cửa sông nhiều nhánh khác. Xây dựng một phương pháp mới để ước lượng phân phối lưu lượng nước ngọt trên các nhánh của

cửa sông nhiều nhánh. Đặc điểm sóng triều trong sông nhiều nhánh cũng là một kết quả nghiên cứu rất đáng quan tâm trong nghiên cứu. Đồng thời, trong quá trình nghiên cứu tác giả cũng đã tiến hành các đo đạc về mặn theo phương pháp mới để đánh giá tốc độ truyền triều và truyền mặn dọc sông trên hệ thống các sông vùng ĐBSCL. [28]

Vấn đề nghiên cứu về cơ chế phân tầng mặn tại vùng cửa sông ven biển ĐBSCL từ trước đến nay ít được quan tâm, số liệu đo đạc liên quan đến phân tầng mặn theo độ sâu, trên mặt bằng rất ít. Một tài liệu tham khảo khá tốt là các số liệu đo đạc mặn phân tầng và các nghiên cứu trong Dự án “Thích ứng với biến đổi khí hậu cho phát triển bền vững nông nghiệp và nông thôn vùng ven biển ĐBSCL (Quy hoạch tổng thể)” được Viện Quy hoạch Thủy lợi miền Nam thực hiện trong dự án tài trợ của JICA trong thời gian từ 2011-2013. Khu vực đo đạc phân tầng mặn được thực hiện tại các vị trí dự kiến xây dựng các cống kiểm soát mặn tại các sông chính vùng ven biển tỉnh Bến Tre. Công tác đo đạc được thực hiện ở ba độ sâu khác nhau theo dọc chiều sâu dòng chảy trên sông: điểm thấp nhất sát đáy sông, điểm giữa và điểm gần mặt nước trong thời gian triều cường. Kết quả đo đạc cho thấy ít có sự khác biệt về độ mặn ở các độ sâu khác nhau, thời gian đo đạc từ tháng III đến tháng V, kết quả đo đạc cho thấy trị số mặn ở các độ sâu không khác biệt nhiều. Nghiên cứu kết luận rằng việc lấy nước dựa trên nê-m mặn là không thể thực hiện được tại vị trí cống Bến Tre và An Hóa dự kiến và kết luận khá quan trọng từ nghiên cứu này là “Nghiên cứu trên đây chỉ ra rằng không có hiện tượng nê-m mặn ở vị trí dự kiến xây dựng cống Bến Tre và cống An Hóa, và tất nhiên là vùng cửa sông Cửu Long. Điều đó có nghĩa là trong mùa khô do sự xâm nhập mặn nên khả năng lấy nước là khó khăn”. [15]

Một nghiên cứu, khảo sát đo đạc khá chi tiết với phương pháp khảo sát hiện đại về phân bố mặn theo không gian và thời gian (phân tầng mặn theo chiều sâu dọc theo sông và các vị trí khác nhau trên mặt cắt ngang sông) tại 2 nhánh sông Hậu từ Cần Thơ ra đến hai cửa biển Định An và Trần Đề đã được nhóm nghiên cứu của PGS.TS Nguyễn Nghĩa Hùng (nghiên cứu sinh có tham gia) thuộc Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam phối hợp với nhóm nghiên cứu đến từ đại học Utrecht (Hà Lan) thực hiện vào tháng 3-4/2016 đã đo đạc mặn theo chiều sâu dòng chảy dọc theo sông theo các thời điểm nước ngưng khi đỉnh triều (HWS) và thời điểm nước ngưng khi chân triều

(LWS). Đo mặn phân tầng theo mặt cắt ngang sông. Việc đo bằng ngang qua sông được lặp đi lặp lại hoán đổi từ bờ trái sang phải và phải sang trái. Các kết quả đo đạc từ nghiên cứu này bước đầu chỉ ra rằng có hiện tượng phân tầng xảy ra trên dọc các nhánh sông Hậu trong hai thời điểm nước ngưng khi đỉnh triều (HWS) và thời điểm nước ngưng khi chân triều (LWS), phân bố mặn thay đổi phân tầng theo chiều sâu trên cùng một mặt cắt ngang sông. Các kết quả khảo sát đo đạc này khẳng định có sự phân tầng về mặn trong hai nhánh sông Hậu trong thời gian thực hiện khảo sát.



Hình 1-20: Phân bố nồng độ mặn dọc sông Hậu ngày 01/4/2016 - khi triều xuống

Nhiều nhà khoa học và các tổ chức nghiên cứu trên thế giới cũng quan tâm tới vấn đề xâm nhập mặn tại vùng cửa sông ven biển ĐBSCL. Nghiên cứu khá chi tiết về thay đổi xâm nhập mặn tại vùng cửa sông ven biển đã được Eslami và các cộng sự nghiên cứu từ năm 2016-2019. Kết quả từ nghiên cứu đã chỉ ra được các tác động chính tới xâm nhập mặn như thay đổi dòng chảy thượng lưu, nước biển dâng và đặc biệt là vấn đề thay đổi địa hình đáy sông (hạ thấp lòng dẫn) đã thay đổi cơ chế vận chuyển muối như thế nào, dẫn đến xâm nhập mặn gia tăng mạnh trong ĐBSCL trong thời gian gần đây. [35]

Một nghiên cứu gần đây được thực hiện ở vùng ven biển đồng bằng sông Hồng do PGS.TS Nguyễn Tùng Phong thực hiện năm 2018 để dự báo, cảnh báo xâm nhập mặn phục vụ điều hành cấp nước và quản lý vận hành hệ thống thủy lợi lấy nước vùng hạ lưu đồng bằng sông Hồng. Nhóm nghiên cứu đã dùng công cụ mô hình 3D (MIKE3) để tính toán nghiên cứu đặc điểm mặn phân tầng và từ kết quả nghiên cứu

đã đề xuất các giải pháp lấy nước theo phân tầng phục vụ sản xuất nông nghiệp - thủy sản tại dọc hai sông Ninh Cơ và sông Đáy. Từ các kết quả nghiên cứu trong đề tài cho thấy kết quả nghiên cứu mặn phân tầng có ý nghĩa rất quan trọng trong việc lấy nước phục vụ sản xuất. [9]

Ngoài các nghiên cứu kể trên, còn nhiều các nghiên cứu về xâm nhập mặn vùng ĐBSCL của các đơn vị như Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, Viện Quy hoạch Thủy lợi miền Nam, Royal Haskoning DHV và nhiều các cơ quan cũng như các nhà khoa học khác.

Nhìn chung, các nghiên cứu kể trên đã đạt được những thành quả nhất định về mặt khoa học và thực tiễn, góp phần không nhỏ vào việc xây dựng cơ sở khoa học và là những công cụ hỗ trợ cho việc nghiên cứu về chế độ thủy văn, thủy lực xâm nhập mặn tại vùng ĐBSCL trên cơ sở đó các giải pháp ứng phó (công trình, phi công trình) đã được thực hiện. Tuy nhiên những kết quả về mô phỏng thủy động lực học, xâm nhập mặn, truyền chất cho vùng ĐBSCL chủ yếu được thực hiện trên cơ sở các mô hình toán số 1D do đó chưa giải quyết được vấn đề cốt yếu của bản chất về cơ chế xâm nhập mặn.

1.3.3. Các nghiên cứu về công trình kiểm soát mặn và hút ngọt

Thời gian trước đây để phát triển sản xuất nông nghiệp (lúa) các công trình cống kiểm soát mặn đã được xây dựng tại hầu hết các cửa sông với nhiều loại hình như: cống đóng mở cưỡng bức kiểu truyền thống vận hành bằng hệ thống vít me hay tời thủy lực, hiện nay thêm hình thức đóng mở bằng hệ thống xi lanh thủy lực, các cống đóng mở tự động theo con nước của GS. Trương Đình Dự và Trần Tuấn Bửu phát minh và chế tạo.

Công trình kiểm soát mặn ở ĐBSCL đã được xây dựng khá lâu để phục vụ sản xuất tuy nhiên hiện nay, trong tình hình biến đổi khí hậu, thiếu hụt nguồn nước ngọt phục vụ nông nghiệp và nhu cầu mới về nguồn nước để phát triển kinh tế nuôi trồng thủy sản, rất nhiều cống ngăn mặn, tiêu lũ ở các tỉnh ĐBSCL được địa phương đặt ra nhu cầu lấy nước ngược để bổ sung nước từ ngoài sông vào đồng khi độ mặn cho phép hoặc lấy nước mặn phục vụ nuôi trồng thủy sản. Đối với cửa van tự động, việc đóng mở cửa không phụ thuộc vào thiết bị mà phụ thuộc vào chênh lệch mực nước

trước và sau cửa van, điều đó dẫn đến cửa vận hành đóng mở phụ thuộc hoàn toàn vào con triều. Không chỉ gạn triều để tiêu thoát nước hay đóng cửa van để giữ nước mà việc kiểm soát mức độ chất lượng nước, thời điểm đóng mở cửa cống để hót ngọt, ngăn mặn xâm nhập đã đặt ra nhu cầu nghiên cứu giải pháp chủ động điều tiết nước cho các cửa van tự động trở nên bức thiết hơn bao giờ hết.

Một nghiên cứu của PGS.TS Nguyễn Phú Quỳnh, (2011) đã đề xuất được các giải pháp xây dựng mới và nâng cấp các công trình kiểm soát mặn ở ĐBSCL nhằm thích ứng với biến đổi khí hậu. Nghiên cứu đã tổng kết đánh giá được hiện trạng các công trình kiểm soát mặn tại ĐBSCL và tính toán các kịch bản xâm nhập mặn có thể xảy ra cho toàn đồng bằng và từ đó đưa ra được khả năng đáp ứng nhiệm vụ của các công trình kiểm soát mặn hiện trạng và trên cơ sở đó đề xuất được các giải pháp nâng cấp các công trình kiểm soát mặn một cách thích hợp. [10]

Để đáp ứng được nhu cầu nguồn nước phù hợp với điều kiện và chiến lược phát triển kinh tế từng vùng, nhóm nghiên cứu do ThS. Thái Quốc Hiền, đã nghiên cứu giải pháp, thiết kế và chế tạo thiết bị đóng mở cưỡng bức các cửa van tự động đảm bảo chủ động lấy nước trong điều kiện xâm nhập mặn cùng ĐBSCL nhằm đề xuất các giải pháp kỹ thuật tối ưu trong việc nâng cấp cải tiến các cửa van tự động và các phương án vận hành chủ động, hiện đại hóa cho các công trình điều tiết nước phục vụ thực tế sản xuất hiện nay. [3].

Nghiên cứu về các dạng cửa van cống để vận hành lấy phù sa hay hót ngọt đã được nhóm tác giả thuộc Viện Khoa học Thủy lợi do GS.TS Trần Đình Hợi nghiên cứu, thiết kế và chế tạo thử nghiệm thực tế và thành công với 03 loại cửa van là: Cửa van kiểu bản quay trục ngang nhiều tầng, cửa van kiểu bản quay trục đứng và cửa van kiểu Clape liên hoàn. Nguyên tắc của 3 loại cửa van này là sử dụng áp lực nước lên bản mặt cửa van tạo mô men cân bằng giảm nhẹ lực đóng mở. Trong 3 loại cửa van này thì cửa van kiểu bản quay trục ngang nhiều tầng khá phù hợp với việc hót ngọt theo các lớp chiều sâu phân tầng mặn. [6]

Hiện nay, công tác dự báo nguồn nước, dự báo triều và số liệu dòng chảy thượng lưu có thể dự báo được sớm kết hợp với các trạm đo đạc giám sát mặn vùng hạ lưu nên việc chủ động lấy ngọt cho mùa kiệt vào các thời kỳ triều kém, thời kỳ chân triều

các địa phương và người dân vùng ven biển đã tranh thủ thời gian độ mặn cho phép, vận hành ngay các công trình thủy lợi để lấy nước, tích trữ nước tối đa vào hệ thống kênh mương, ao, đầm, khu trũng phục vụ sản xuất, dân sinh trong thời gian mặn xâm nhập sâu và nồng độ cao. Đồng thời, thực tế hiện nay một số khu vực người dân và một số cơ quan chuyên môn cũng đã đo đặc mặn trên sông để lấy nước phù hợp cho nhu cầu. Tại cống Xuân Hòa, thuộc Tiền Giang đã thay đổi cửa cống từ đóng mở tự động sang đóng mở cưỡng bức để lấy nước ngọt, gạn triều cho một số thời gian phù hợp đồng thời cũng đã thí điểm vận hành cống lấy nước ngọt tầng mặt trong một số thời điểm.

1.4. Kết luận Chương 1

Nghiên cứu về xâm nhập mặn vùng cửa sông đã được nhiều nhà khoa học trên thế giới và trong nước thực hiện cho nhiều mục đích khác nhau như phục vụ sản xuất nông nghiệp, cấp nước sinh hoạt, môi trường sinh thái, bồi lắng vùng cửa sông.... Để có cơ sở định hướng cho nội dung nghiên cứu của luận án trong chương này cứu sinh đã tóm tắt lại các nét chính về diễn biến xâm nhập mặn tại vùng ven biển ĐBSCL, đồng thời đã khái quát được các vấn đề, nội dung liên quan chính đến nghiên cứu của đề tài là cơ chế xâm nhập mặn (phân tầng mặn), vùng cửa sông ven biển ĐBSCL cụ thể là: 1. Các khái niệm cơ bản liên quan đến vùng cửa sông, các đặc điểm phân loại cửa sông, các yếu tố chính tác động đến cơ chế xâm nhập mặn, đặc điểm của một số loại cửa sông và tập trung sâu hơn cho loại phân tầng hoàn toàn và phân tầng một phần; 2. Các nghiên cứu liên quan đến cơ chế dòng chảy, xâm nhập mặn vùng cửa sông, phương pháp nghiên cứu về cơ chế phân tầng mặn. Tổng quan các nghiên cứu trên thế giới và Việt Nam đặc biệt là những nghiên cứu gần đây giúp cho nghiên cứu sinh xác định được hướng nghiên cứu phù hợp trong luận án trên cơ sở kinh nghiệm, hiểu biết, công cụ và số liệu, tài liệu dùng trong nghiên cứu.

Mặc dù, việc nghiên cứu về mặn tại ĐBSCL nói chung và các vùng ven biển Việt Nam khá nhiều tuy nhiên qua phần đánh giá tổng quan và thực tế cho thấy các nghiên cứu về cơ chế phân tầng mặn (nêm mặn) tại vùng cửa sông hầu như chưa có hay nghiên cứu khá sơ bộ. Trước các thách thức, thay đổi của điều kiện tự nhiên, biến đổi khí hậu nước biển dâng, khai thác thượng nguồn thì các nghiên cứu về mặn nói

chung và phân tầng mặn tại cửa sông rất quan trọng đặc biệt đối với vùng ĐBSCL, do đó cần phải có các nghiên cứu chi tiết để đáp ứng các yêu cầu phát triển trong thời gian tới để giải quyết được một số vấn đề chính sau:

Nghiên cứu chi tiết về phân tầng mặn sẽ giúp giải quyết được các vấn đề về lấy nước theo yêu cầu sản xuất đa dạng tại vùng cửa sông ven biển theo yêu cầu về nồng độ mặn khác nhau phục vụ các đối tượng.

Kết quả từ nghiên cứu về phân tầng mặn có thể được dùng trong thiết kế các công trình kiểm soát nguồn nước trong thời gian tới khi yêu cầu sản xuất phải thay đổi theo các điều kiện tự nhiên và phát triển thượng nguồn.

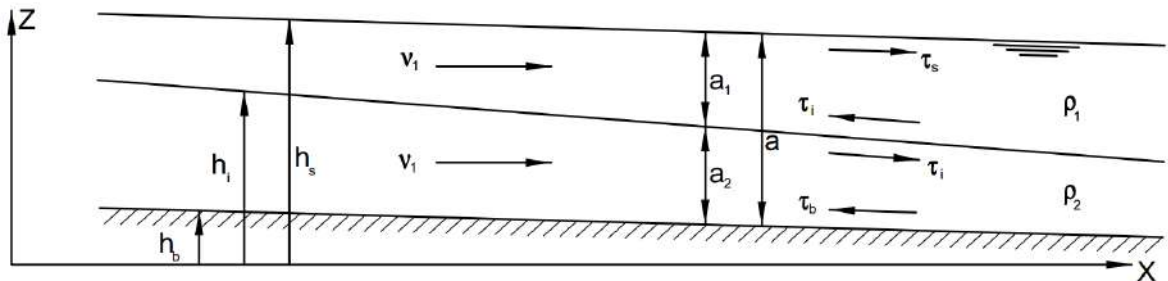
Các kết quả nghiên cứu về phân tầng mặn sẽ là tiền đề cho các nghiên cứu liên quan như lắng đọng phù sa, hệ sinh thái... tại vùng cửa sông, vùng mặn phân tầng.

CHƯƠNG 2: CÁC NGHIÊN CỨU CƠ CHẾ PHÂN TẦNG VÙNG CỬA SÔNG VEN BIỂN VÀ KHẢ NĂNG ÁP DỤNG CHO VÙNG ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

2.1. Cơ chế cấu tạo chung của nêm mặn vùng cửa sông [17], [19], [20], [23], [34]

Để mô hình hóa các phát triển chủ yếu của chế độ thủy động lực, xâm nhập mặn vốn có trong cửa sông ảnh hưởng triều và có hình thành chế độ phân tầng mặn (nêm muối) về lý thuyết cơ bản cho một mô hình số thì sự hiểu biết cơ bản về cơ chế dòng chảy của một hệ thống dòng phân tầng là cần thiết. Một trong những nỗ lực sớm nhất để mô tả cơ chế tồn tại của một nêm mặn được phát triển bởi Schijf và Schonfeld vào năm 1953. Nguyên lý lý thuyết hai lớp được áp dụng để phát triển một mô hình dự đoán về chiều dài xâm nhập của nêm mặn. [34]

Giả thiết một hệ thống gồm hai lớp chất lỏng đồng nhất (nước mặn và nước ngọt) được phân tách bằng một mặt phân cách rõ nét được xem xét. Sự khác biệt mật độ giữa hai chất lỏng được giả định là nhỏ so với mật độ chính nó: $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1)$: $\rho_2 \approx (\rho_2 + \rho_1)/2 \approx \rho_1$



Hình 2-1: Hệ thống hai lớp, dựa trên Schijf và Schönfeld (1953) [34]

Bỏ qua các thành phần gia tốc dọc, các phương trình động lượng và liên tục có thể được viết như:

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial a_1}{\partial x} + a_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} = 0 \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial a_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial a_2}{\partial x} + a_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} = 0 \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial t} + g \frac{\partial a_1}{\partial x} + g \frac{\partial a_2}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + g(i_1 - i_b) = 0 \quad (2-3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_2}{\partial t} + (1 - \epsilon)g \frac{\partial a_1}{\partial x} + g \frac{\partial a_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + g(i_2 - i_b) \\ = \frac{\partial v_2}{\partial t} + (1 - \epsilon)g \frac{\partial a_1}{\partial x} + g \frac{\partial a_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + g(i_2 - i_b) = 0 \end{aligned} \quad (2-4)$$

Trong đó:

x: Trục tọa độ theo chiều dọc sông;

z: Trục tọa độ theo chiều sâu;

a_1, a_2 : Chiều dày lớp nước phía trên và phía dưới (m);

v_1, v_2 : Vận tốc trung bình lớp trên và lớp dưới (m/s);

i_1, i_2 : Độ dốc mặt nước lớp trên và lớp dưới;

g: gia tốc trọng trường (m/s²).

Ứng suất cắt của các lớp được đặt như sau: $\tau_{i1} = \frac{\tau_i - \tau_s}{g\rho_1 a_1}$ và $\tau_{i2} = \frac{\tau_b - \tau_i}{g\rho_2 a_2}$,

Trong đó: τ_s, τ_i và τ_b là ứng suất cắt tương ứng dọc theo bề mặt thoáng, mặt phân cách và đáy sông.

Độ dốc đáy được biểu thị bằng: i_b , trong đó $i_b = -dh_b/dx$. Đối với trường hợp không có hay bỏ qua gió và không có lớp phủ băng tuyết, ứng suất bề mặt có thể được giả thiết là bằng không. Hơn nữa, dòng chảy rối được giả định, do đó:

$$\tau_i = \frac{\rho g |v_1 - v_2| (v_1 - v_2)}{4C_i^2} \quad (2-5)$$

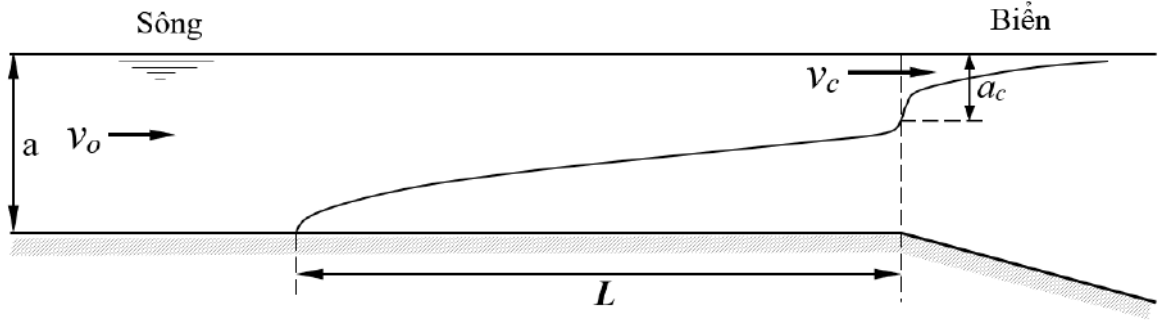
$$\tau_b = \frac{\rho g |v_2| v_2}{C_b^2} \quad (2-6)$$

$$\tau_i = \frac{\rho g |v_1 - v_2| (v_1 - v_2)}{4C_i^2}$$

Trong đó: C_b hệ số ma sát dòng chảy tại đáy, C_i hệ số

ma sát tại mặt phân cách. ρ_1 và ρ_2 xấp xỉ bằng: $\rho = (\rho_2 + \rho_1)/2$.

Đối với các con sông đổ vào một vùng nước mặn với biên độ dao động thủy triều nhỏ, chẳng hạn như sông Mississippi, nước ngọt sẽ chảy qua một khối nước nước mặn tồn tại tại đáy sông và có thâm nhập lên thượng nguồn dọc theo đáy sông, xem Hình 2-2



Hình 2-2: Hình nêm mặn được phát triển bởi Schijf và Schonfeld [34]

Dòng chảy lớp trên sẽ quyết định chính tại vùng cửa sông, do đó một phương trình mô tả đặc tính của mặt phân cách có thể thu được bằng cách kết hợp các phương trình động lượng của hai lớp.

$$\epsilon g \frac{da_1}{dx} + v_1 \frac{dv_1}{dx} + \frac{v_1^2 a}{4C_i^2 a_1 (a - a_1)} = 0 \quad (2-7)$$

Trong đó: C_i là hệ số ma sát dọc theo lớp phân cách, ϵ là chênh lệch mật độ giữa hai lớp, a là chiều sâu lớp nước ngọt thượng lưu, và v là vận tốc dòng chảy thượng nguồn của sông.

Tích hợp các phương trình lớp phân cách được viết lại như sau:

$$L = \frac{C_i^2}{g} a \left[\frac{1}{5} \frac{\epsilon g a}{v_0^2} - 2 + 3 \sqrt{\frac{v_0^2}{\epsilon g a}} - \frac{6}{5} \sqrt{\frac{v_0^2}{\epsilon g a}} \right] \quad (2-8)$$

Trong đó: v_0 : độ gia tăng chiều dày lớp trên ở vùng cửa sông, $a_c = \frac{v_0^2}{\epsilon g}$ sự gia tăng ma sát giữa mặt phân cách và độ dốc. Do đó, chiều dài của nêm mặn giảm bởi những lý do trên. Khi vận tốc dòng chảy sông v_o trở nên lớn hơn nhiều vận tốc kép, v_{cc} , nêm mặn hoàn toàn bị đẩy khỏi cửa sông.

Tác giả Keulegan cũng phát triển mối quan hệ cho chiều dài tồn tại của nêm muối (Keulegan 1966) [23]. Nếu ρ là mật độ của nước ngọt; $\rho + \Delta\rho$: mật độ của nước biển và ρ_m là mật độ của hai chất lỏng, Keulegan lưu ý rằng vận tốc lắng đọng có thể được xác định bởi:

$$V_\Delta = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_m} g H} \quad (2-9)$$

Trong đó: g là gia tốc do trọng lực và H là chiều sâu của dòng sông. Trong một dòng chảy tương tự, số Reynolds tỷ trọng được xác định bởi

$$R_e = V_{\Delta} \frac{H}{\nu} \quad (2-10)$$

Trong đó ν là độ nhớt động học của nước. Lưu ý rằng độ dốc bề mặt của nước trong sông chỉ đóng vai trò thứ hai trong sự tồn tại của nê-m mặn, suy đoán lý giải mối quan hệ giữa vận tốc của mặt phân cách nước mặn V và khoảng cách dịch chuyển, L có dạng:

$$\frac{H}{V_{\Delta}} = f_0 \left(\frac{L}{H'} \frac{V_r}{V_{\Delta}'} \frac{V_{\Delta} H}{\nu'} \frac{H}{B} \right) \quad (2-11)$$

Trong đó V_r là vận tốc của dòng sông tỷ lệ nghịch với sự gia tăng của nê-m mặn. Theo đó mối quan hệ với chiều dài của một nê-m mặn tồn tại, L_0 có dạng:

$$\frac{L_0}{H} = f \left(\frac{V_r}{V_{\Delta}'} \frac{V_{\Delta} H}{\nu'} \frac{H}{B} \right) \frac{L_0}{H} = f \left(\frac{V_r}{V_{\Delta}'} \frac{V_{\Delta} H}{\nu'} \frac{H}{B} \right) \quad (2-12)$$

Từ dữ liệu về chuyển động, Keulegan đã thiết lập quy luật về độ dài như sau:

$$\frac{L_0}{H} = A \left(\frac{V_r}{V_{\Delta}} \right)^{-\frac{5}{2}} \quad (2-13)$$

Với một biến A . Đối với độ rộng sông không đổi so với tỷ lệ độ sâu của nước, phương trình (2-12) khuyến cáo biến A phụ thuộc vào số Reynolds tỷ trọng (densimetric), $V_{\Delta} H / \nu$. Dòng chảy tự nhiên của nước với số Reynolds từ 10^7 hoặc lớn hơn được chỉ ra theo mối quan hệ:

$$\frac{L_0}{H} = 6.0 \left(\frac{V_{\Delta} H}{\nu} \right)^{1/4} \left(\frac{2V_r}{V_{\Delta}} \right)^{-5/2} \quad (2-14)$$

Keulegan đã chứng minh tính hợp lệ của mối quan hệ này với dữ liệu thực tế từ South Pass (sông Mississippi - Mỹ). Thực tế đã được quan sát thấy rằng chiều dài của nê-m mặn tồn tại ở South Pass là 22,5km với lưu lượng sông Mississippi tương ứng là $2.830 \text{ m}^3/\text{s}$. Với chiều rộng sông là 460 mét, độ sâu 13,7 mét, nhiệt độ nước 20°C , và $\Delta\rho/\rho_m$ là 0,02, V_r được ước tính là 0,45 m/s và V_{Δ} là 1,64 m/s, do đó $2V_r/V_{\Delta} = 0,55$. Số Reynolds tỷ trọng bằng $2,25 \times 10^7$. Với những giá trị này được đặt trong phương trình (2-14), chiều dài của nê-m mặn được xác định là 24,9 dặm.

Ngoài việc giả định các điều kiện trạng thái ổn định, các điều kiện giả định quan trọng khác cho phép một giải pháp cho hình dạng nêm mặn tồn tại là: thủy triều thấp, mặt cắt ngang kênh đồng nhất hình chữ nhật với đáy ngang và độ sâu nước không đổi, không xáo trộn dọc theo mặt phân cách và hệ số ma sát liên tục dọc theo mặt phân cách nước mặn và nước ngọt (Harleman, 1990). [20]

Với những giả định này, Harleman đã chỉ ra rằng hình dạng lý thuyết của nêm mặn tồn tại có thể được trình bày theo cách một không giới hạn như một hàm số của số Froude đo mật độ, F_0 , dựa trên tốc độ dòng nước ngọt trung bình U_0 và chiều sâu h_0 thượng nguồn của nêm mặn tồn tại như sau:

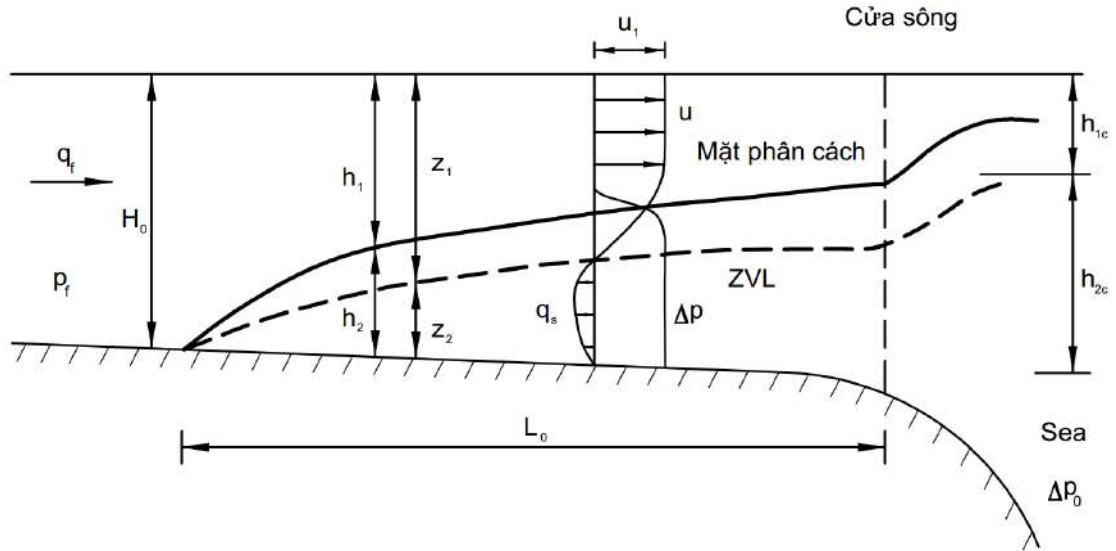
$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g'h_0}} g' = g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g'h_0}} \quad \text{với} \quad g' = g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (2-15)$$

Đối với sự tồn tại một nêm mặn không có sự cuốn theo, vận tốc trung bình ở tầng đáy là bằng không. Tại điểm giao nhau giữa sông và biển, độ sâu tương đối của hai lớp sao cho số Froude mật độ cục bộ của lớp trên bằng với tổng thể. Do đó, lưu lượng lớp trên là rất cần thiết và tỷ lệ độ sâu tại cửa vào là:

$$\frac{h_{ic}}{h_0} = (F_0)^{2/3} \quad (2-16)$$

Trong đó: khi $h_{ic} = h_0$ nêm mặn bị đẩy khỏi kênh sông và $F_0 = 1$ (Harleman, 1961). [20]

Arita và Jirka [17] đã mở rộng lý thuyết hai lớp bằng cách đưa vào một công thức dựa trên đường vận tốc bằng không (ZVL) là một thay thế cho mặt phân cách nồng độ. Việc xáo trộn và cuốn theo tại mặt phân cách bị bỏ qua nhưng các động lực tuần hoàn trong lớp dưới đã được đưa vào (Arita và Jirka, 1987) [17].

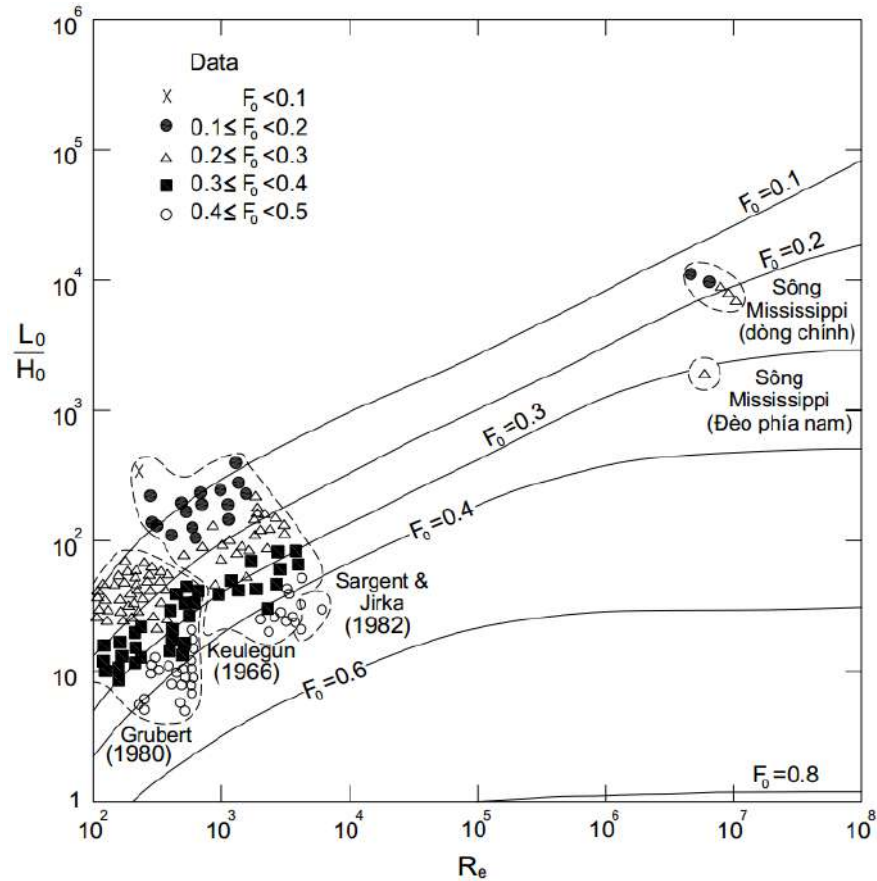


Hình 2-3: Hình dạng và cấu trúc bên trong nêm mặn [17]

Phương trình hai lớp đã được giải quyết bằng phương pháp số và dự đoán chiều dài nêm mặn là một hàm của số Reynolds được thể hiện như trong (Hình 2-4). Số Reynolds đã được điều chỉnh cho các tỷ lệ chiều rộng chiều rộng khác nhau được sử dụng trong các thử nghiệm khác nhau bằng cách sử dụng như sau:

$$R = \frac{\frac{q_f}{v}}{\left(2 \frac{\bar{h}_1}{B} + 1\right)} \quad (2-17)$$

Trong đó $\bar{h}_1 = \frac{H_0 + h_{1c}}{2}$ và B là chiều rộng dòng chảy. Hình này thể hiện ảnh hưởng rất lớn của số Reynolds trên chiều dài nêm mặn và giới hạn của các mô hình vật lý. Vai trò của các mô hình vật lý trong nghiên cứu về xâm nhập mặn được giới hạn ở những hiểu biết định tính do hiệu ứng số Reynolds này.



Hình 2-4: So sánh chiều dài nêl mặl tính toán L_0/H_0 , trong phòng thí nghiệm và quan sát thực địa dưới dạng hàm số Reynolds R và số Froude F_0 ; đáy nằm ngang $S_b = 0$ [17]

Một khó khăn thường gặp trong việc áp dụng các phương pháp thực nghiệm là không có khả năng giải thích cách thức mà nồng độ mặl phát triển và thoái lui trong sông. Trong thực tế các nêl mặl phát triển một cách linh hoạt khi nó lấp đầy các hố sâu trong tại đáy sông. Để tính toán, mô tả, xác định một cách chính xác cơ chế phân tầng hay hình dạng kích thước nêl mặl, sự hình thành và biến đổi nêl mặl theo thời gian thì việc áp dụng tham số kinh nghiệm rất khó thực hiện và kết quả còn rất hạn chế.

2.2. Các tham số kinh nghiệm xác định sự phân tầng cửa sông

Tương tác giữa hai thành phần nguồn nước sông và biển tại vùng cửa sông đã được nhiều tác giả nghiên cứu bằng lý thuyết và thực nghiệm. Các nghiên cứu về sự tương tác sông biển, xâm nhập của nước biển vào các cửa sông đã được bắt đầu ở các cửa sông của Hoa Kỳ, Vương quốc Anh và Hà Lan trong thập niên 1950 của thập

niên 1950; chúng chủ yếu nhằm mục đích nghiên cứu các quá trình pha trộn nước sông và nước biển ở các khu vực gần các thị trấn và cảng lớn (New York, Baltimore, Washton, London, Amsterdam, Rotterdam, v.v.) và sau đó những nghiên cứu như vậy đã được bắt đầu ở Nga. Kết quả của các nghiên cứu có thể được chia thành hai phần rất đặc trưng: (i) Xác định các quá trình xáo trộn và phân tầng nước tại các cửa sông và (ii) Đánh giá về khoảng cách xâm nhập của nước biển vào các cửa sông như thế nào.

Để xác định cơ chế dòng chảy tại vùng cửa sông ven biển (phân loại cửa sông) hiện nay đang phân chia làm 03 loại: Xáo trộn hoàn toàn - Loại I (không phân tầng hoặc phân tầng yếu), xáo trộn bán phần - Loại II (phân tầng trung bình) và xáo trộn yếu - Loại III (phân tầng mạnh hay hình thành các nêm muối - Salt Wedge). Để phân loại được các cửa sông theo 03 loại như trên thì có một số phương pháp như: các tham số kinh nghiệm, số liệu thực đo, mô hình tính toán, các phương pháp phân tích đánh giá này phụ thuộc vào nguồn số, tài liệu...yêu cầu về độ chính xác, chi tiết của nhiệm vụ tính toán.

Các kiểu xáo trộn dọc theo chiều dài cửa sông và phân tầng nước tại các cửa sông trong khu vực xâm nhập mặn vào cửa sông và phương pháp xác định chúng được thảo luận trong các tác phẩm của D. Pritchard. Bắt đầu với các nghiên cứu của D. Pritchard, được thực hiện tại Hoa Kỳ trong thập niên 1950, ba loại pha trộn dọc và phân tầng nước sau đây được xác định trong khu vực trộn nước sông và biển (trong kênh sông, nhánh châu thổ, cửa sông, đầm phá, và vùng gần bờ của cửa sông): loại I xáo trộn hoàn toàn (yếu phân tầng); loại II là xáo trộn bán phần (phân tầng trung bình); loại III là xáo trộn yếu (phân tầng mạnh, nêm muối) [19]. Các điều kiện xâm nhập của nước biển vào các cửa sông khác nhau phù hợp với các kiểu trộn dọc và phân tầng nước này .

Hai tham số hay được sử dụng để trình bày chính thức các loại đó: tham số phân tầng n và tham số thủy triều lũ α . Tham số phân tầng n được sử dụng rộng rãi sau khi xuất bản các tác phẩm [26]. Tham số này được thể hiện dưới dạng:

$$n = \frac{\Delta S}{S_m} = \frac{S_{bot} - S_{surf}}{0.5(S_{bot} + S_{surf})} \quad (2-18)$$

Trong đó:

ΔS : 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 độ mặn tầng mặt

Xáo trộn mạnh và phân tầng yếu tương ứng với $n < 0,1$; Xáo trộn một phần và phân tầng trung bình, khi n thay đổi từ 0,1 đến 1,0; và Xáo trộn yếu và phân tầng mạnh, nêm nước mặn khi n thay đổi từ 1,0 đến 2,0 (giá trị n không bao giờ vượt quá 2,0).

Một thông số cũng được nhiều nghiên cứu xác nhận đó là thông số tương tác thủy triều và lũ (α) đặc trưng cho mối quan hệ giữa các tác động của biển và sông đối với chế độ cửa sông. Tham số này được đặt tên trong tài liệu là số Canter Cremers hoặc là tham số Simmons [26]. Thông số thủy triều lũ được định nghĩa là:

$$\alpha = \frac{W}{P_t} = \frac{Q_m \tau}{P_t} \quad (2-19)$$

Trong đó:

W : Thể tích của dòng chảy từ sông trong một chu kỳ thủy triều (m^3)

Q_m : Dòng chảy của sông trong thời kỳ triều xuống (m^3/s)

τ : Thời gian thủy triều xuống (s)

P_t : Thể tích của lắng kính thủy triều (m^3)

Giá trị P_t thường được xác định bằng cách sử dụng công thức đơn giản $P_t = \Delta H_{tide} F_m$, trong đó ΔH_{tide} là phạm vi thủy triều trung bình cửa vào (mặt cắt ngang) có diện tích là F_m . Cửa vào có thể là một cửa sông, đập phá hoặc cửa sông mở rộng của một nhánh châu thổ.

Xáo trộn mạnh và phân tầng yếu tương ứng với $\alpha < 0,1$; Xáo trộn một phần và phân tầng trung bình, khi α thay đổi từ 0,1 đến 1,0; và Xáo trộn yếu và phân tầng mạnh, nêm nước mặn khi $\alpha > 1,0$.

Công thức (2-19) là công thức khá đầy đủ có xét đến các yếu tố quyết định đến phân tầng như địa hình, thủy văn... của đoạn cửa sông thông qua yếu tố lắng kính thủy triều tuy nhiên việc xác định được chính xác lắng kính thủy triều cho khu vực cửa sông là một vấn đề rất khó phụ thuộc vào nhiều yếu tố: giới hạn của lắng kính,

địa hình toàn bộ vùng cửa sông, phạm vi ảnh hưởng của thủy triều (thay đổi theo mùa và dòng chảy thượng lưu), dòng chảy sông và năng lượng dòng triều ... do đó để đơn giản hóa tham số tham số Simmons một cách tính khác cũng được một số nghiên cứu của GS.TSKH Nguyễn Ân Niên đề cập tới.

$$\eta = \frac{W^+}{W^-} \quad (2-20)$$

Trong đó:

W^+ : Lượng dòng chảy sông trong một chu kỳ triều xuống (m^3);

$W^+ = \Sigma Q^+ \times \Delta t_x$; Q^+ : là lưu lượng dòng chảy tại thời điểm triều xuống (m^3/s).

W^- : Lượng dòng chảy ngược trong pha triều lên (m^3);

$W^- = \Sigma Q^- \times \Delta t_l$; Q^- : là lưu lượng dòng chảy tại thời điểm triều lên (m^3/s).

Trên cơ sở giá trị của tham số η sẽ xác định được đặc tính dòng chảy theo cơ chế phân tầng cụ thể như sau: Khi $\eta \geq 0,7$ xáo trộn yếu có phân tầng; $\eta = 0,2 - 0,5$ xáo trộn vừa bán phân tầng (phân tầng trong một số trường hợp theo thời gian, thời đoạn) và $\eta \leq 0,1$: xáo trộn mạnh và không thể hình thành mặt phân tầng.

Ngoài ra, với mục đích xác định loại pha trộn thẳng đứng và bản chất của sự phân tầng nước ở cửa vào nguồn nước, một số tiêu chí được tạo ra từ sơ đồ phân tầng Hansen - Rattray [44] và một số tiêu chí thủy văn.

Trước hết, các tiêu chí như vậy bao gồm số Froude mật độ được sử dụng rộng rãi trong cơ chế thủy lực của dòng chảy phân tầng.

$$Fr_\rho = V / \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_m} gh} \quad Fr_\rho = V / \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho_m} gh} \quad (2-21)$$

Trong đó:

V : là vận tốc dòng chảy trung bình của dòng sông

$\Delta\rho$: là chênh lệch mật độ giữa nước biển và nước sông

$\rho_m = 0,5 (\rho_s + \rho_{riv})$

h : là độ sâu dòng chảy.

Số lượng Froude mật độ (Fr_ρ) được sử dụng từ những năm 1950 của thập niên 1950 trong việc phân tích các quá trình xâm nhập mặn vào các dòng chảy của Keulegan, Shijf và Shonfeld, Thatcher, Hareld và Dyer. [44]

Xáo trộn mạnh và phân tầng yếu tương ứng với $Fr_p > 0,71$; Xáo trộn một phần và phân tầng trung bình, khi Fr_p thay đổi từ 0,71 đến 0,22; và Xáo trộn yếu và phân tầng mạnh, nêm nước mặn khi $Fr_p > 0,22$.

Các tiêu chí khác được thể hiện bằng hệ số cửa sông được đề xuất bởi D. Harman và G. Abraham năm 1966; $E = Fr^2/\alpha$, trong đó Fr là số Froude bình thường bằng $Fr = V_0/\sqrt{gh}$ (ở đây V_0 là vận tốc cực đại của dòng chảy trong giai đoạn thủy triều trung bình trên mặt cắt ở cửa ra); α là thông số thủy triều lũ đã được điều chỉnh; số cửa sông được đề xuất bởi M. Thatcher và D. Hareld [44]:

$$E_p = \frac{Fr_p^2}{\alpha} = \frac{E}{\Delta\rho/\rho_m} E_p = \frac{Fr_p^2}{\alpha} = \frac{E}{\Delta\rho/\rho_m} \quad (2-22)$$

Hệ số cửa sông Richardson đề xuất của H. Fisher vào năm 1972; số lớp Richardson được đề xuất bởi K. Dyer và A. New [26]:

$$Ri_L = gh\Delta\rho/V^2\rho_m \text{ và } Ri_L = Fr_p^2 \quad (2-23)$$

Xáo trộn mạnh và phân tầng yếu tương ứng với $Ri_L > 2$; Xáo trộn một phần và phân tầng trung bình, khi Ri_L thay đổi từ 2 đến 20; và Xáo trộn yếu và phân tầng mạnh, nêm nước mặn khi $Ri_L > 20$.

Bảng 2-1: Một số tiêu chí xác định khả năng phân tầng mặn vùng cửa sông

Phân loại	Đặc tính		n	α	η	Fr_p	E_p	Ri_L
	Xáo trộn	Phân tầng						
I	Xáo trộn hoàn toàn	Yếu - Y	0÷0,1	0÷0,1	$\leq 0,1$	$> 0,71$	$> 8,0$	< 2
II	Xáo trộn từng phần	Trung bình - TB	0,1÷1,0	0,1÷1,0	0,2 - 0,5	0,71÷0,22	8,0-0,2	2÷20
III	Xáo trộn yếu (Phân tầng)	Mạnh - M (Nêm muối)	1,0÷2,0	> 1	$\eta \geq 0,7$	$< 0,22$	$< 0,2$	> 20

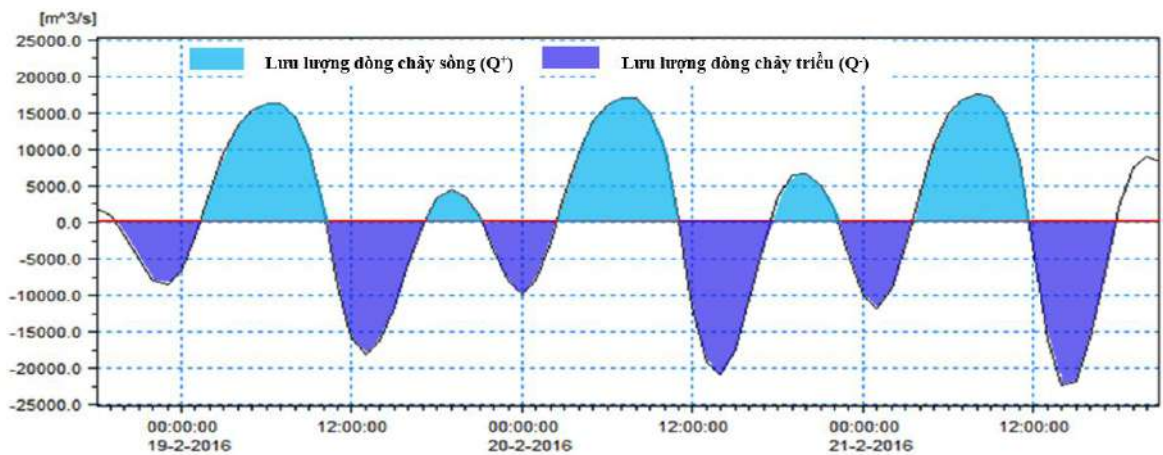
2.3. Ứng dụng các tham số kinh nghiệm sơ bộ xác định cơ chế phân tầng vùng cửa sông ĐBSCL

Trong nghiên cứu này sơ bộ xác định khả năng phân tầng cho các cửa sông ĐBSCL theo các tham số kinh nghiệm trong Chương 2 dựa trên các số liệu thực đo mặn theo chiều sâu dòng chảy (hệ số n) và kết quả tính toán thủy lực bằng mô hình 1D (hệ số η). Trong các công thức xác định cơ chế phân tầng nếu được tính toán từ

số liệu thực đo thì sẽ sát thực và phản ánh đúng hơn, tuy nhiên để có số liệu đủ để tính toán thì khối lượng khảo sát rất nhiều và khó có thể thực hiện trong khuôn khổ nghiên cứu độc lập của nghiên cứu sinh vì vậy dựa trên các số liệu tài liệu hiện có trên từng nhánh sông sẽ đánh giá mức độ phân tầng sơ bộ để trên cơ sở đó có những nghiên cứu chi tiết hơn ở các phần sau bằng mô hình toán số 3D.

2.3.1. *Tính toán cho các nhánh sông dựa trên tham số Simmons (η)*

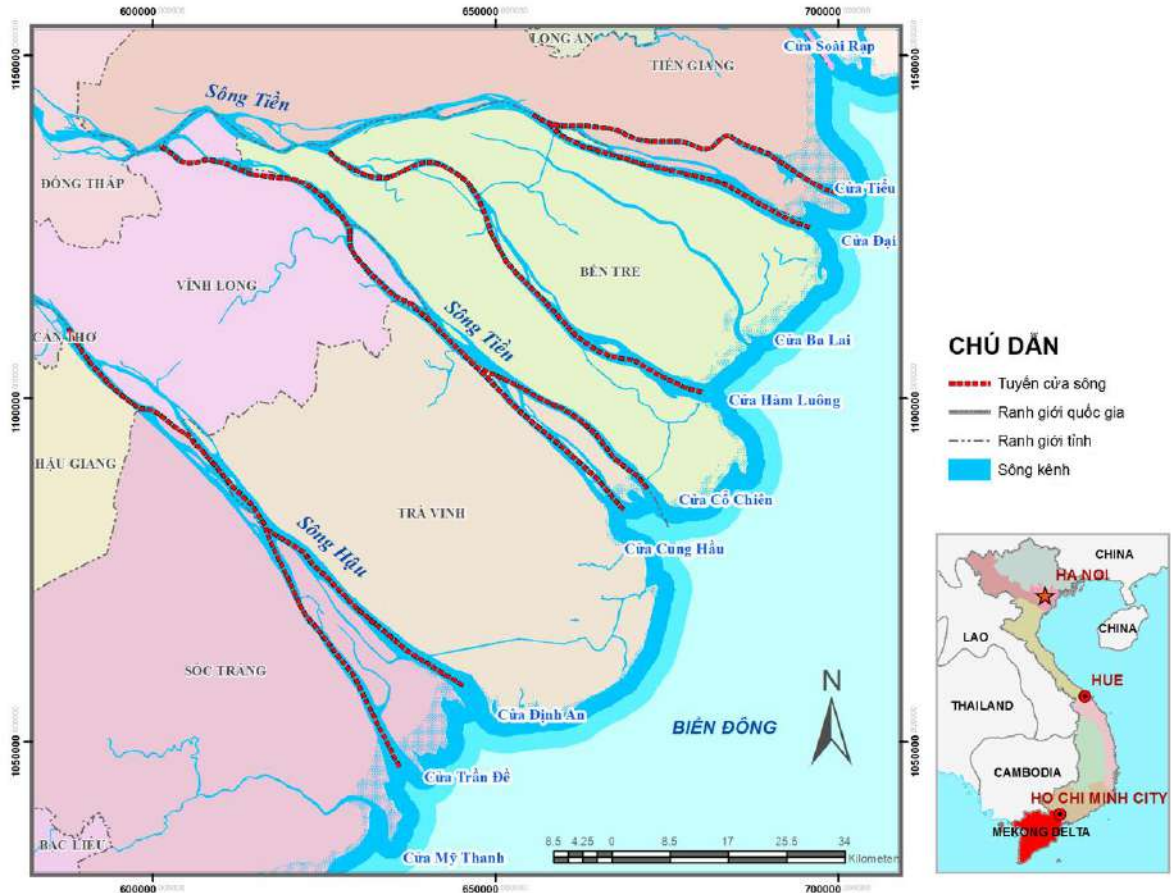
Do không có tài liệu thực đo mặn phân tầng theo chiều sâu cho tất cả các nhánh sông ĐBSCL nên trong nghiên cứu tính toán phân tích nghiên cứu sinh dựa trên tham số Simmons (η). Lượng dòng chảy sông trong 1 chu kỳ triều (W^+) và lượng dòng chảy triều (chảy ngược) trong pha triều lên (W^-). Các tài liệu đầu vào (lưu lượng) được tính toán dựa trên giá trị lưu lượng trung bình mặt cắt ngang vùng cửa sông trích xuất từ kết quả tính toán thủy lực từ mô hình một chiều MIKE 11 toàn ĐBSCL của Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam.



Hình 2-5: Minh họa lưu lượng dòng chảy sông (Q^+) và dòng chảy triều (Q^-)

Chế độ thủy triều của vùng ĐBSCL là chế độ bán nhật triều không đều trong vòng 24h sẽ có một chu kỳ triều mạnh ($T=14-16h$) và một chu kỳ triều kém ($T=8-10h$). Trong chu kỳ triều mạnh thì thời gian triều xuống (dòng chảy sông Q^+) thường lớn hơn thời gian triều lên (dòng chảy biển Q^-) và ngược lại trong chu kỳ triều kém. Dựa trên đặc tính này của thủy triều và các số liệu lưu lượng trung bình mặt cắt ngang của từng vị trí sông sẽ tính toán xác định được tham số Simmons (η) tại từng vị trí theo chiều dọc sông.

Trong nghiên cứu này NCS đã tính toán cho chuỗi thời gian liên tục vào mùa kiệt từ tháng I đến tháng IV cho các vị trí từ cửa biển ngược lên thượng lưu khoảng 30-90km cho 7 nhánh sông gồm có: Cửa Tiểu, Cửa Đại, Hàm Luông, Cỏ Chiên, Cung Hầu (sông Tiền), nhánh sông Ba Lai không tính toán vì cống Ba Lai hầu như đóng trong suốt mùa kiệt và Định An, Trần Đề (sông Hậu).



Hình 2-6: Bản đồ các cửa sông Cù Long

Hệ số η tính theo quá trình triều lên xuống, với vùng ĐBSCL là bán nhật triều nên trong một ngày sẽ tính toán được hai giá trị η , thời gian tính toán khoảng 5 tháng tại nhiều vị trí dọc sông nên trong luận án sẽ trích xuất kết quả tính toán hệ số η theo các thời điểm, thời đoạn đặc trưng của thủy triều như: Thời kỳ triều cường, thời kỳ triều kém, con triều lớn và con triều nhỏ trong ngày cho các tháng để phân tích đánh giá cho mỗi cửa sông.

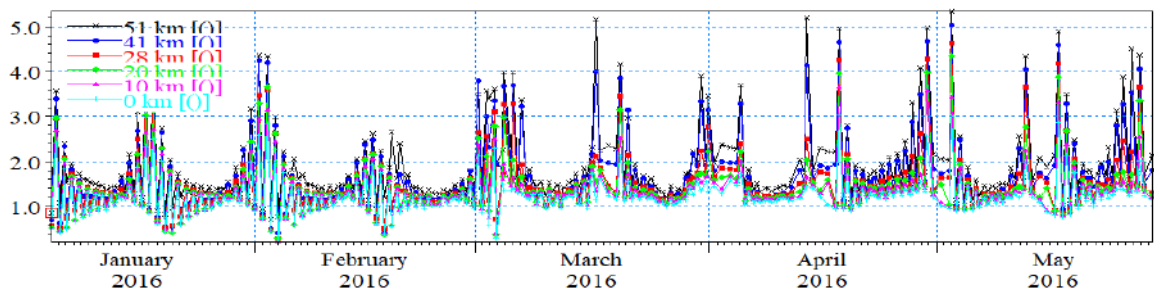
2.3.1.1. Kết quả tính toán cho các nhánh sông

Kết quả tính toán hệ số η cho từng nhánh sông sẽ được tổng hợp theo hai phương thức: 1. Theo thời gian của toàn bộ mùa kiệt tính toán và tại các vị trí trên sông so với cửa biển; 2. Theo dọc theo sông tại các thời điểm đặc trưng của thủy triều.

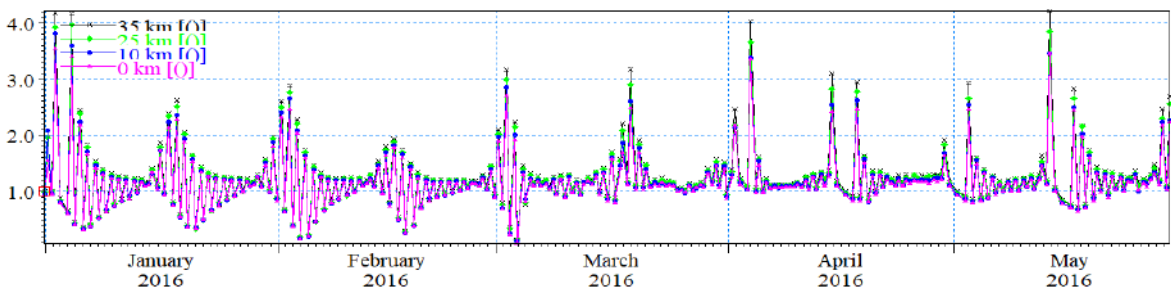
Bảng 2-2: Các nhánh sông phân tích tính toán

STT	Tên nhánh sông	Chiều dài sông tính toán (km)	Ghi chú
1	Cửa Tiểu	54	
2	Cửa Đại	35	
3	Hàm Luông	70	
4	Cổ Chiên	24	
5	Cung Hầu	90	
6	Định An	33	
7	Trần Đề	80	

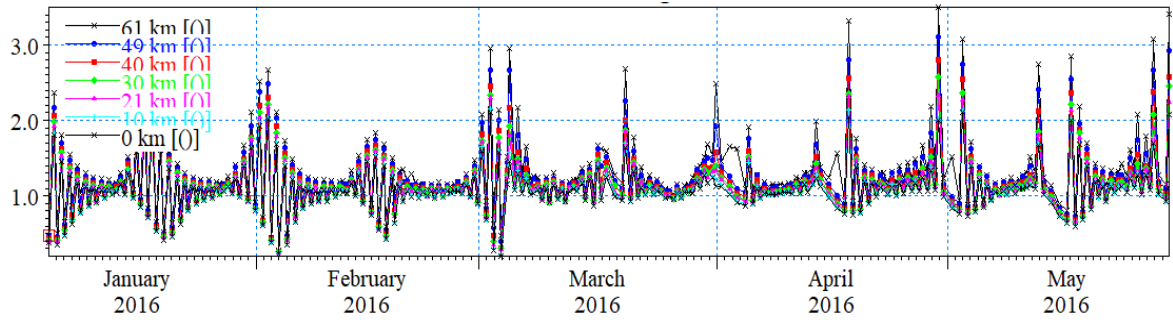
Trên cơ sở kết quả tính toán thủy lực trích xuất các kết quả tính toán lưu lượng tại các vị trí theo chiều dọc các sông từ thượng lưu ra biển. Kết quả tính toán cho các nhánh sông ĐBSCL theo các đồ thị dưới đây:



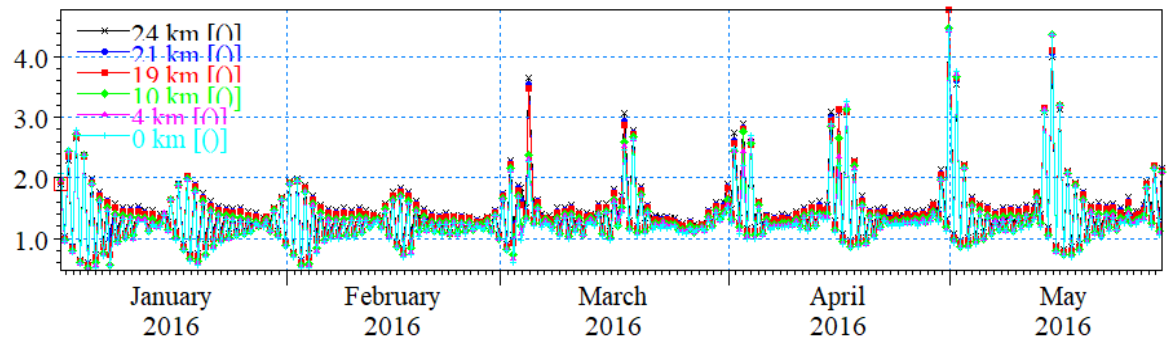
Hình 2-7: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh cửa Tiểu



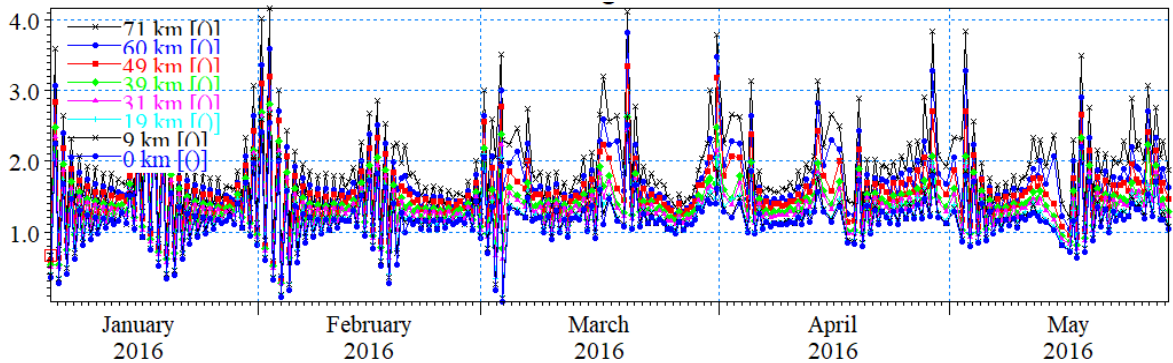
Hình 2-8: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh Cửa Đại



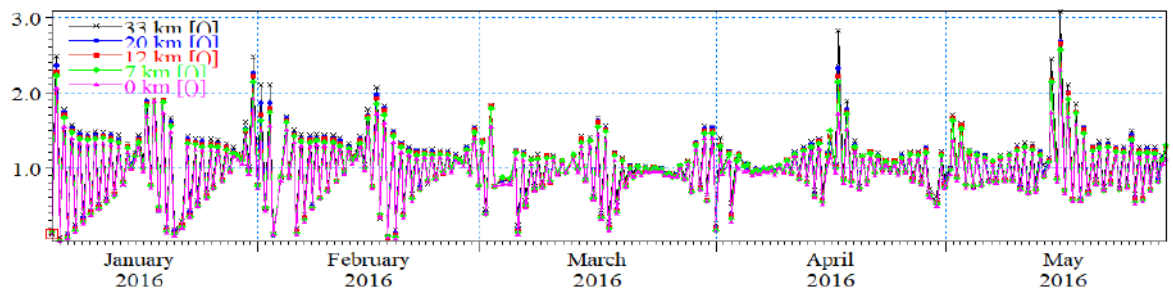
Hình 2-9: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh Hàm Luông



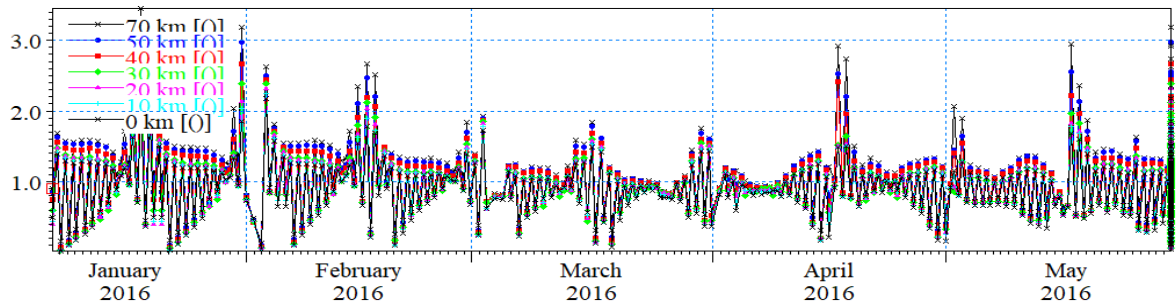
Hình 2-10: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh Cỏ Chiên



Hình 2-11: Kết quả tính toán η tại một số vị trí trên nhánh Cung Hào



Hình 2-12: Kết quả tính toán η tại một số vị trí dọc sông Hậu - Định An

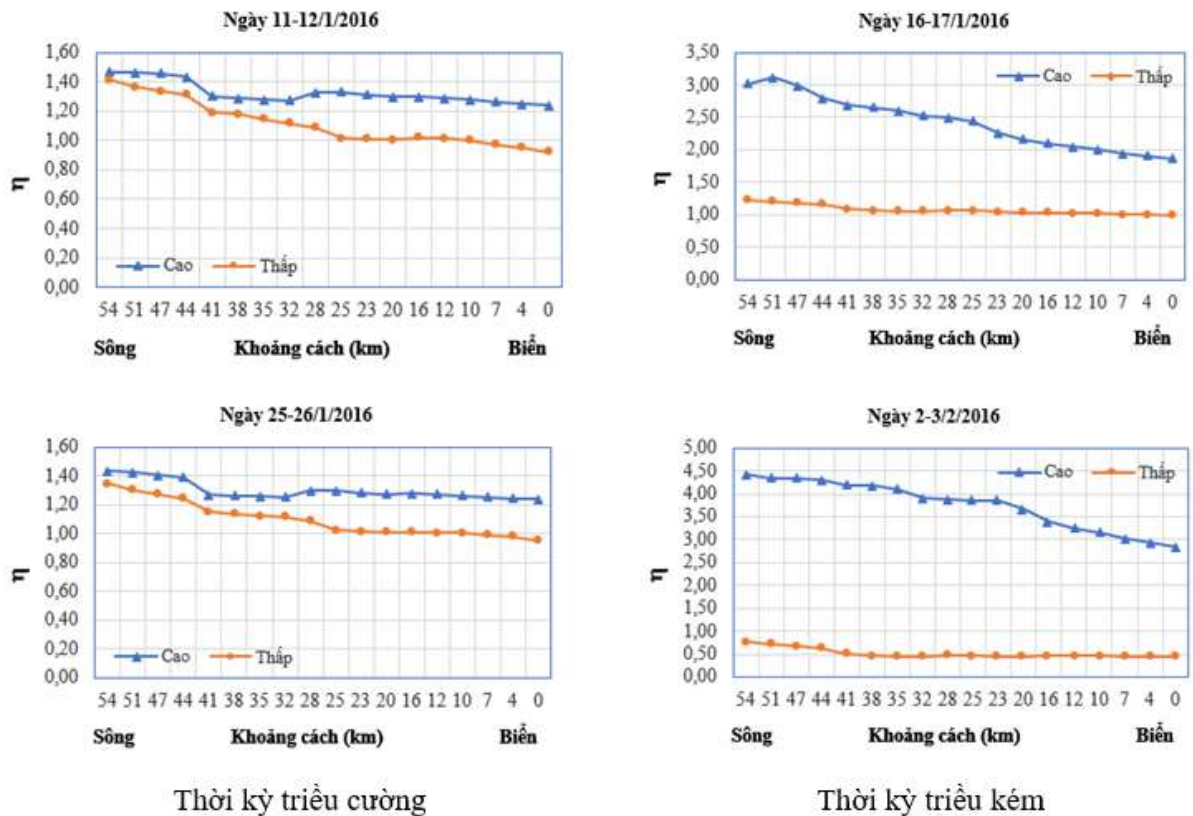


Hình 2-13: Kết quả tính toán η tại một số vị trí dọc sông Hậu - Trần Đề

2.3.1.2. **Đánh giá chung về kết quả tính toán sơ bộ phân tầng theo η trên các nhánh sông Cửu Long**

Từ kết quả tính toán tham số η cho thấy trên các nhánh sông Cửu Long có một số đặc điểm chính cho tất cả các nhánh sông như sau:

- Qua kết quả tính toán cũng cho thấy giá trị η phụ thuộc chặt chẽ vào chu kỳ triều và con triều trong ngày. Trong chu kỳ triều cường (thời gian từ ngày 8-12, 23-26) hệ số η thấp hơn so với chu kỳ triều kém (thời gian từ ngày 1-3; 16-23). Trong một ngày có sự khác nhau rõ rệt của hệ số η trong con triều cao và con triều nhỏ. Thời gian xảy ra hiện tượng phân tầng mạnh (nêm mặn) là khi xuất hiện con triều cao và đặc biệt là thời kỳ triều kém hệ số η cao hơn so với các thời gian khác. Trong một chu kỳ triều chênh lệch hệ số η trong các con triều cũng khác nhau, khi con triều lớn hệ số η chênh lệch không nhiều nhưng trong con triều nhỏ chênh lệch khá lớn.
- Có sự thay đổi hệ số η theo thời gian trong mùa khô và giữa sông Tiền và sông Hậu cũng có sự khác nhau. Bắt đầu từ khoảng 8/3 (các nhánh sông Tiền) và 15/3 (các nhánh sông Hậu) tại các vị trí tính toán thì xu thế η tăng hơn so với đầu mùa khô. Từ kết quả này có thể nhận thấy khả năng dòng chảy sông ($Q+$) thay đổi (tăng lên) trên các nhánh sông Tiền sớm hơn nhánh sông Hậu khoảng 4 - 7 ngày.

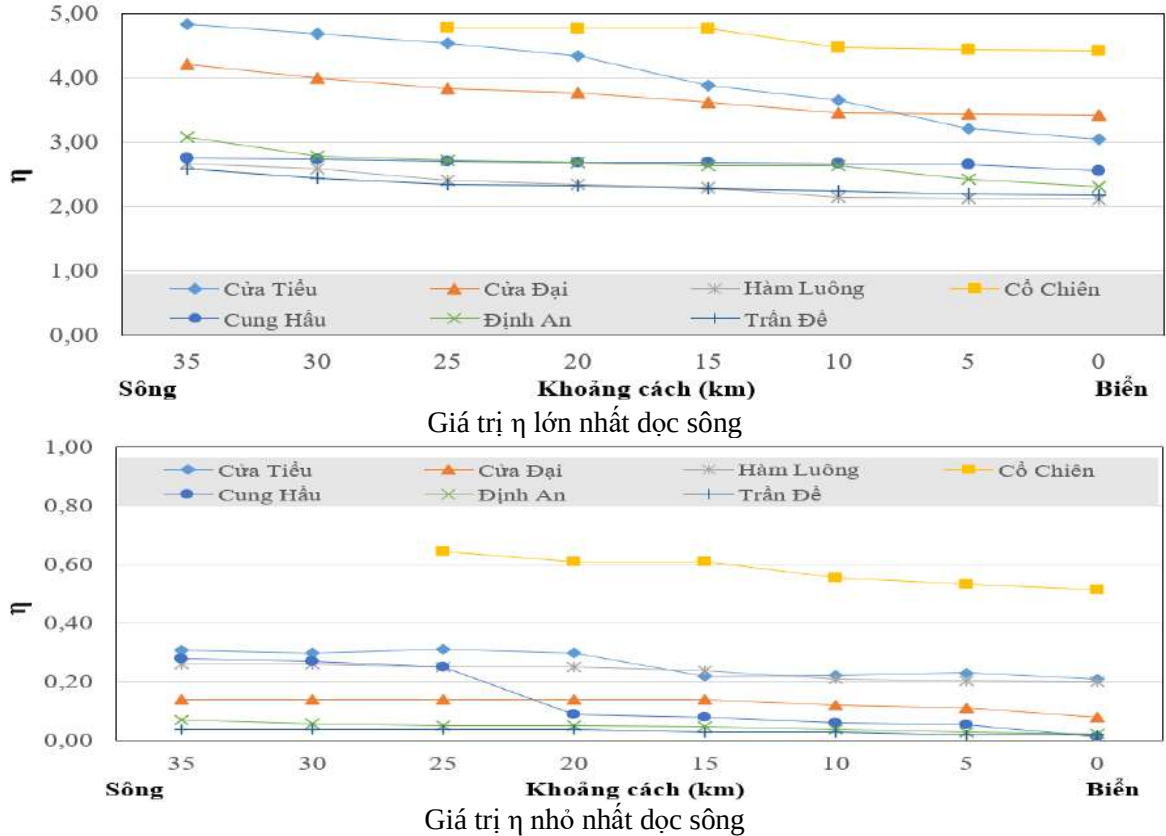


Hình 2-14: Minh họa xu thế của hệ số η trong các thời kỳ triều

Từ kết quả tính toán có thể so sánh các giá trị η giữa các nhánh trên sông Tiền và các nhánh trên sông Hậu hoặc so sánh đồng thời tất cả 7 nhánh sông. Để kết quả so sánh phù hợp cần phải so sánh theo cùng chiều dài các đoạn sông tính toán.

Bảng 2-3: Tổng hợp so sánh hệ số η trên các nhánh sông Cửu Long

STT	Tên sông		Giá trị	Khoảng cách so với biển (km)							
				35	30	25	20	15	10	5	0
				Hệ số η							
1	Sông Tiền	Cửa Tiểu	Max	4,84	4,69	4,54	4,34	3,88	3,66	3,21	3,04
			Min	0,31	0,30	0,31	0,30	0,22	0,22	0,23	0,21
2		Cửa Đại	Max	4,21	4,01	3,84	3,77	3,62	3,46	3,44	3,43
			Min	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,12	0,11	0,08
3		Hàm Luông	Max	2,67	2,58	2,40	2,34	2,29	2,15	2,12	2,11
			Min	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,21	0,205	0,20
4		Cổ Chiên	Max			4,78	4,77	4,77	4,48	4,44	4,43
			Min			0,65	0,61	0,61	0,56	0,53	0,51
5		Cung Hầu	Max	2,74	2,74	2,71	2,69	2,68	2,68	2,66	2,55
			Min	0,28	0,27	0,25	0,09	0,08	0,06	0,05	0,01
6	Sông Hậu	Định An	Max	3,08	2,78	2,71	2,68	2,64	2,63	2,42	2,30
			Min	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02
7		Trần Đề	Max	2,59	2,44	2,34	2,32	2,28	2,24	2,20	2,18
			Min	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02



Hình 2-15: So sánh các giá trị η lớn nhất và nhỏ nhất trên các nhánh sông Mê Công

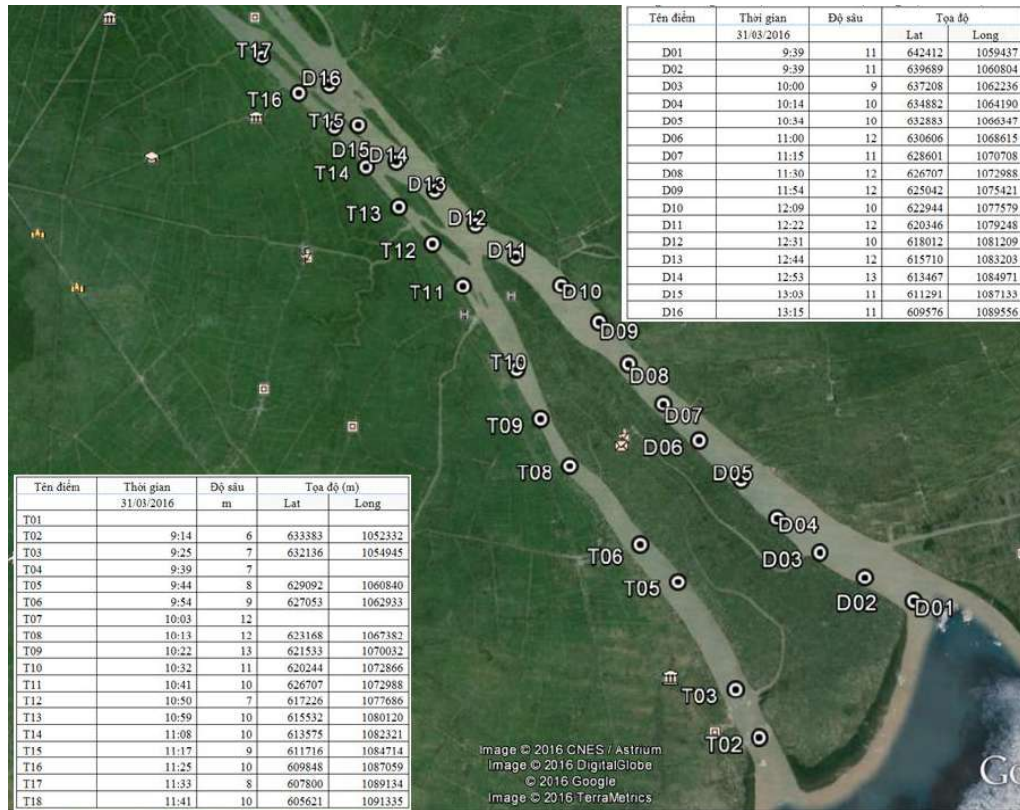
Trên hệ thống các nhánh sông Cửu Long thì nhánh Cổ Chiên có hệ số η lớn nhất cả giá trị Max và Min.

Giá trị η cực đại lần lượt là sông Cổ Chiên, Cửa Tiểu, Cửa Đại, Cung Hầu, Định An, Hàm Luông và Trần Đề. Giá trị η cực tiểu không tương đồng với giá trị cực đại mà có sự thay đổi nhất định lần lượt là Cổ Chiên, Cửa Tiểu, Hàm Luông, Cung Hầu, Cửa Đại, Định An, và Trần Đề. Xét về xu thế chung theo các số liệu tính toán cho thấy theo tham số η thì các nhánh sông Tiền có khả năng phân tầng cao hơn các nhánh sông Hậu.

2.3.2. Tính toán phân tầng theo tham số n

Như trên đã phân tích tham số n dựa vào số liệu thực đo mặn phân tầng tại khu vực nghiên cứu. Trong quá trình thực hiện luận án NCS đã tham gia khảo sát đo đạc hiện trường do Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam phối hợp với đại học Utrecht (Hà Lan).

Công tác đo đạc mặn theo chiều sâu dòng chảy vào thời điểm tháng 3-4/2016 dọc hai nhánh sông Hậu (nhánh Trần Đề và nhánh Định An) vào thời kỳ triều lên và thời kỳ triều rút từ khu vực Cần Thơ ra đến biển. Các kết quả thực đo này là cơ sở để tính toán thông số n theo công thức (2-18) tại các vị trí đo dọc theo sông trong các thời điểm đo đạc khác nhau.



Hình 2-16: Sơ đồ bố trí các điểm khảo sát dọc sông Hậu

2.3.2.1. Kết quả tính toán (n) cho nhánh Định An

Từ kết quả tính toán tham số n cho thấy trên nhánh Định An của sông Hậu xuất hiện hiện tượng phân tầng khi triều lên từ trung bình cho đến khá mạnh trong cả 2 trường hợp triều lên và triều xuống.

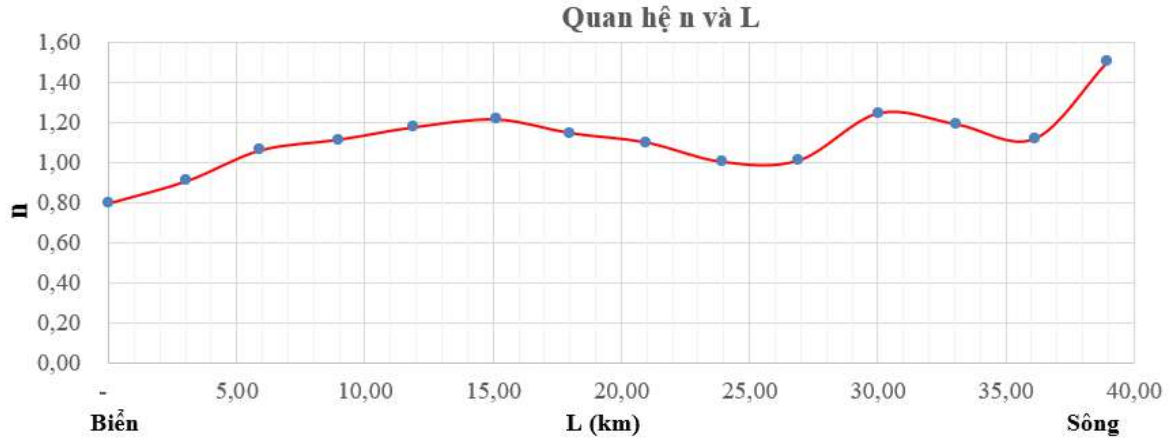
Kết quả tính toán sơ bộ hiện tượng phân tầng trong thời kỳ triều lên có xu thế tăng dần từ cửa sông lên thượng lưu, tại vùng cửa sông cách biển từ 3-4 km phân tầng trung bình và từ 4-40 km phân tầng khá mạnh.

Khi triều xuống kết quả tính toán cho thấy cũng xuất hiện hiện tượng phân tầng và phân bố không gian theo chiều dọc sông gần như tương đồng với trường hợp triều lên (khoảng cách tại vùng cửa sông cách biển từ 3-4km phân tầng trung bình và từ 4-40km phân tầng khá mạnh).

Bảng 2-4: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Định An (ngày 31/3/2016) khi triều lên (HWS)

Thông số	Vị trí điểm đo													
	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08	D09	D10	D11	D12	D13	D14
	Khoảng cách từ biển L (km)													
	0	3,1	5,9	9,0	11,9	15,1	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	33,1	36,1	39,0

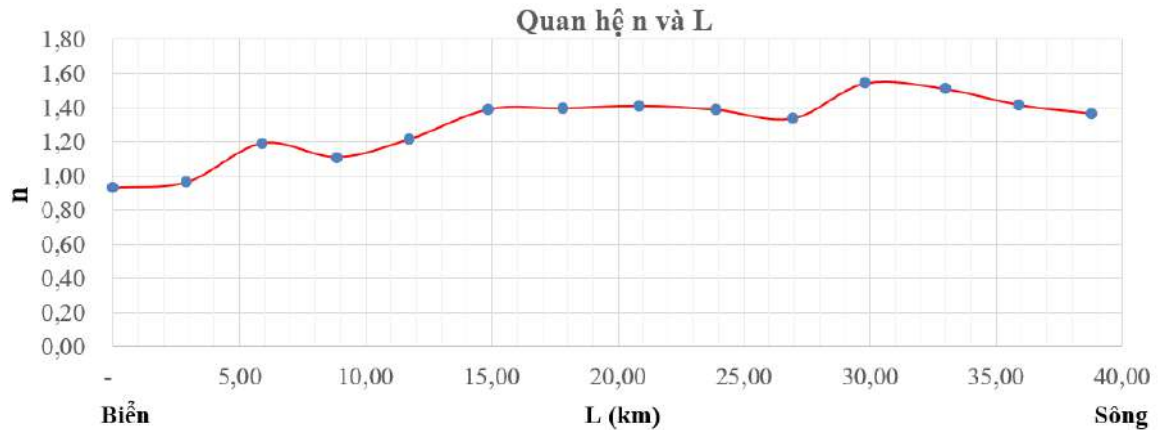
S _{dáy}	22,80	22,65	22,15	20,80	17,80	15,75	14,10	12,65	11,65	10,55	9,19	6,53	4,17	2,32
S _{mặt}	9,77	8,46	6,76	5,89	4,59	3,82	3,80	3,65	3,85	3,45	2,12	1,65	1,17	0,33
S _m	16,29	15,56	14,45	13,34	11,20	9,79	8,95	8,15	7,75	7,00	5,66	4,09	2,67	1,32
ΔS	13,03	14,19	15,40	14,92	13,21	11,93	10,30	9,00	7,81	7,11	7,07	4,89	3,00	1,99
n	0,80	0,91	1,07	1,12	1,18	1,22	1,15	1,10	1,01	1,02	1,25	1,20	1,12	1,51
PL	TB		M											



Hình 2-17: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Định An ngày 31/3/2016 (khi HWS)

Bảng 2-5: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Định An (ngày 01/4/2016)
khi triều lên (HWS)

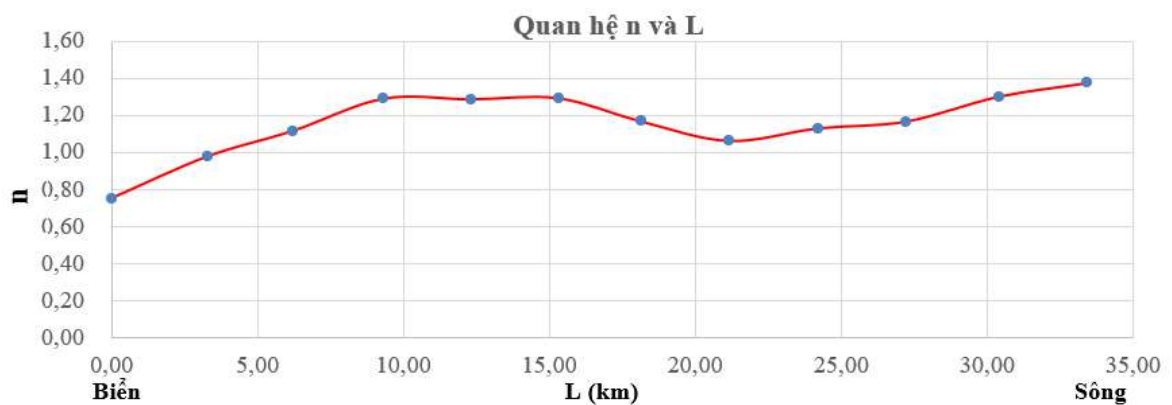
Thông số	Vị trí điểm đo													
	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08	D09	D10	D11	D12	D13	D14
	Thời gian đo													
	12:28	12:40	12:50	12:59	13:09	13:19	13:27	13:36	13:45	13:54	14:02	14:11	14:20	14:29
	Khoảng cách từ biển L (km)													
	0	2,91	5,91	8,88	11,76	14,88	17,83	20,86	23,88	26,93	29,82	32,99	35,92	38,8
S _{dáy}	22,75	22,60	22,40	21,85	20,80	17,50	15,95	15,45	14,20	12,10	13,35	11,60	9,81	7,26
S _{mặt}	8,38	7,97	5,72	6,31	5,11	3,17	2,86	2,69	2,59	2,43	1,74	1,64	1,70	1,38
S _m	15,56	15,28	14,06	14,08	12,95	10,34	9,41	9,07	8,39	7,27	7,55	6,62	5,75	4,32
ΔS	14,38	14,64	16,68	15,54	15,70	14,33	13,09	12,76	11,62	9,67	11,61	9,96	8,12	5,88
n	0,92	0,96	1,19	1,10	1,21	1,39	1,39	1,41	1,38	1,33	1,54	1,50	1,41	1,36
PL	TB		M											



Hình 2-18: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Định An ngày 01/4/2016 (khi HWS)

Bảng 2-6: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Định An (ngày 31/3/2016)
khi triều xuống (LWS)

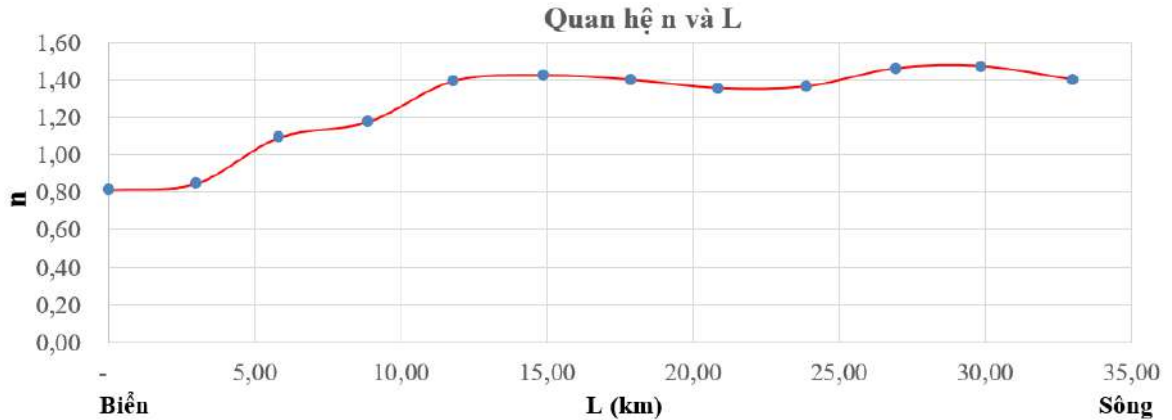
Thông số	Vị trí điểm đo											
	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08	D09	D10	D11	D12
	Thời gian đo											
	15:10	15:21	15:31	15:49	16:08	16:39	16:49	17:02	17:19	17:32	17:48	18:00
	Khoảng cách từ biển L (km)											
	0	3,29	6,20	9,32	12,31	15,30	18,13	21,16	24,20	27,24	30,40	33,41
S _{đáy}	23,75	23,10	22,90	22,30	21,25	20,05	15,65	13,40	12,75	11,45	10,50	7,48
S _{mặt}	10,80	7,95	6,52	4,82	4,62	4,32	4,12	4,12	3,56	3,02	2,23	1,39
S _m	17,28	15,52	14,71	13,56	12,94	12,18	9,89	8,76	8,15	7,24	6,37	4,43
ΔS	12,95	15,16	16,38	17,48	16,63	15,74	11,53	9,29	9,20	8,43	8,27	6,09
n	0,75	0,98	1,11	1,29	1,29	1,29	1,17	1,06	1,13	1,17	1,30	1,37
PL	TB		M									



Hình 2-19: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Định An ngày 31/3/2016 (khi LWS)

Bảng 2-7: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Định An (ngày 01/4/2016)
khi triều xuống (LWS)

Thông g số	Vị trí điểm đo														
	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08	D09	D10	D11	D12	D13	D14	D15
	Thời gian đo														
	17:00	17:11	17:19	17:28	17:39	17:50	17:57	18:05	18:14	18:23	18:33	14:43	18:54	19:05	19:18
	Khoảng cách từ biển L (km)														
	0	3,0	5,8	8,9	11,8	14,9	17,9	20,9	23,9	26,9	29,9	33,0	36,0	41,8	44,2
S _{đáy}	23,10	22,60	22,45	22,30	21,90	21,20	18,50	15,40	14,95	14,40	13,70	11,65	10,80	9,45	6,92
S _{mặt}	9,74	9,15	6,59	5,79	3,93	3,57	3,26	2,96	2,82	2,24	2,08	2,05	1,32	1,03	0,81
S _m	16,42	15,87	14,52	14,05	12,91	12,39	10,88	9,18	8,89	8,32	7,89	6,85	6,06	5,24	3,87
ΔS	13,37	13,46	15,87	16,51	17,98	17,63	15,24	12,45	12,13	12,16	11,62	9,60	9,49	8,42	6,11
n	0,81	0,85	1,09	1,18	1,39	1,42	1,40	1,36	1,37	1,46	1,47	1,40	1,57	1,61	1,58
PL	TB		M												



Hình 2-20: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Định An ngày 01/4/2016 (khi LWS

2.3.2.2. Kết quả tính toán (n) cho nhánh Trần Đề

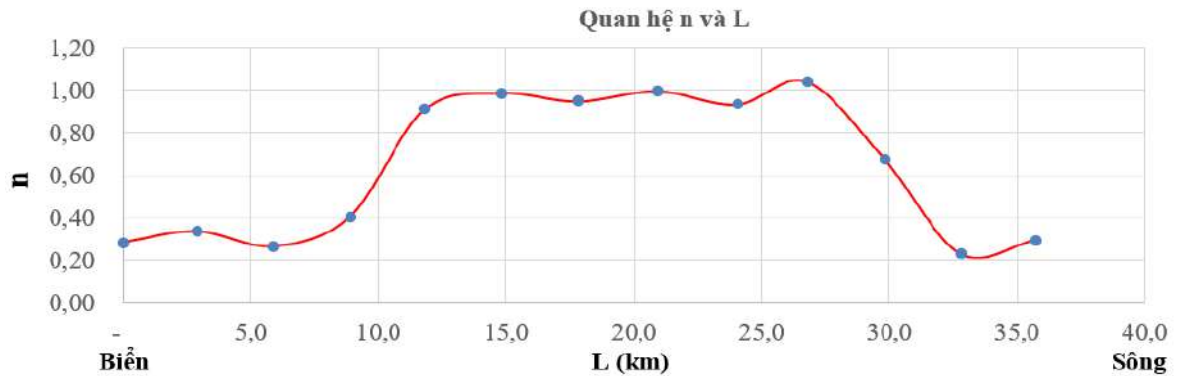
Kết quả tính toán cho thấy tại sông Hậu - nhánh Trần Đề có thể xảy ra hiện tượng phân tầng trung bình trong chu kỳ triều lên trên toàn bộ chiều dài xâm nhập mặn đo khảo sát (khoảng 35km từ biển vào), mặc dù một số vị trí có hiện tượng phân tầng mạnh nhưng xét trên suốt chiều dài thì khả năng hình thành nêm mặn không cao.

Khi triều xuống tại sông Hậu - nhánh Trần Đề xảy ra hiện tượng phân tầng từ trung bình đến phân tầng mạnh. Phạm vi phân tầng trung bình là từ biển vào trong sông khoảng từ 20-27km và hiện tượng phân tầng mạnh (nêm mặn) nằm trong khoảng từ 27- 40km.

Có một sự khác biệt giữa nhánh Trần Đề so với nhánh Định An là tham số n có sự thay đổi khá mạnh trên chiều dọc sông và nhiều thời điểm khu vực giữa hệ số n khá cao.

Bảng 2-8: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Trần Đề (ngày 31/3/2016) khi triều lên (HWS)

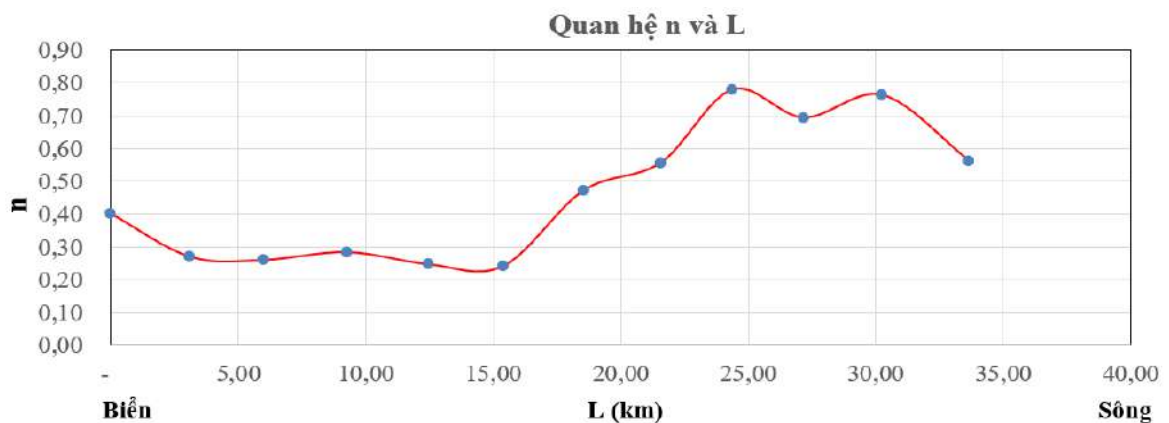
Thông số	Vị trí điểm đo												
	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14
	Thời gian đo												
	9:14	9:25	9:39	9:44	9:54	10:03	10:13	10:22	10:32	10:41	10:50	10:59	11:08
	Khoảng cách từ biển L (km)												
	0	2,9	5,9	8,9	11,8	14,8	17,8	20,9	24,0	26,8	29,8	32,8	35,7
S _{đáy}	16,85	15,80	14,90	14,80	14,05	12,10	11,55	11,05	9,19	8,28	4,33	1,50	0,84
S _{mặt}	12,65	11,25	11,40	9,81	5,25	4,10	4,12	3,70	3,34	2,61	2,15	1,19	0,62
S _m	14,75	13,53	13,15	12,31	9,65	8,10	7,83	7,38	6,26	5,44	3,24	1,35	0,73
ΔS	4,20	4,55	3,50	4,99	8,80	8,00	7,44	7,35	5,85	5,67	2,19	0,31	0,22
n	0,28	0,34	0,27	0,41	0,91	0,99	0,95	1,00	0,93	1,04	0,67	0,23	0,29
PL	TB							M	TB	M	TB		



Hình 2-21: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Trần Đề ngày 31/3/2016 (khi HWS)

Bảng 2-9: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Trần Đề (ngày 01/4/2016) khi triều lên (HWS)

Thông số	Vị trí điểm đo											
	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12
	Thời gian đo											
	11:46	12:05	12:14	12:27	12:37	12:47	13:14	13:25	13:38	13:53	14:04	14:23
	Khoảng cách từ biển L (km)											
	0	3,1	6,0	9,3	12,4	15,4	18,5	21,6	24,4	27,2	30,3	33,7
S _{đáy}	18,30	16,65	16,35	14,65	13,00	11,40	9,70	8,85	9,10	8,35	7,25	3,65
S _{mặt}	12,20	12,70	12,60	11,02	10,15	8,95	6,00	5,00	4,00	4,05	3,25	2,05
S _m	15,25	14,68	14,48	12,84	11,58	10,18	7,85	6,93	6,55	6,20	5,25	2,85
ΔS	6,10	3,95	3,75	3,63	2,85	2,45	3,70	3,85	5,10	4,30	4,00	1,60
n	0,40	0,27	0,26	0,28	0,25	0,24	0,47	0,56	0,78	0,69	0,76	0,56
PL	M											

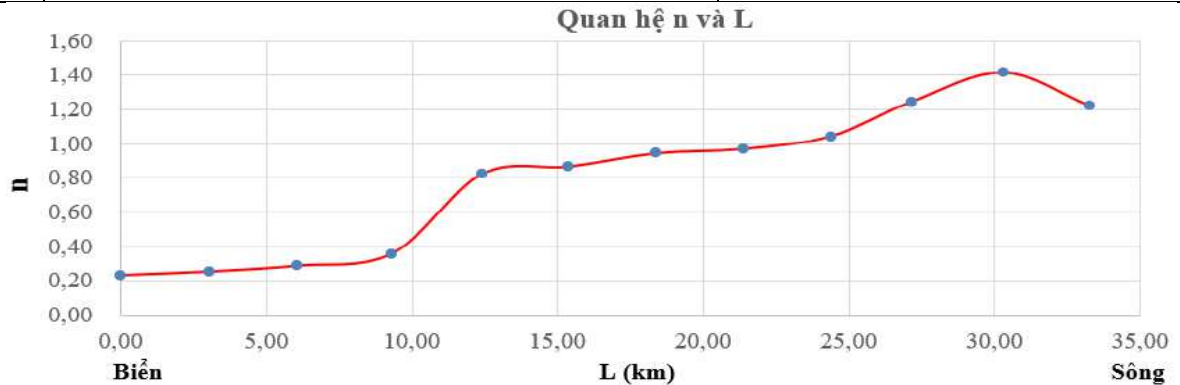


Hình 2-22: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Trần Đề ngày 01/4/2016 (khi HWS)

Bảng 2-10: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Trần Đề (ngày 31/3/2016) khi triều xuống (LWS)

Thông số	Vị trí điểm đo													
	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14
	Thời gian đo													
	14:38	14:48	14:59	15:08	15:17	15:27	15:37	15:49	15:58	16:08	16:17	16:26	16:35	16:42

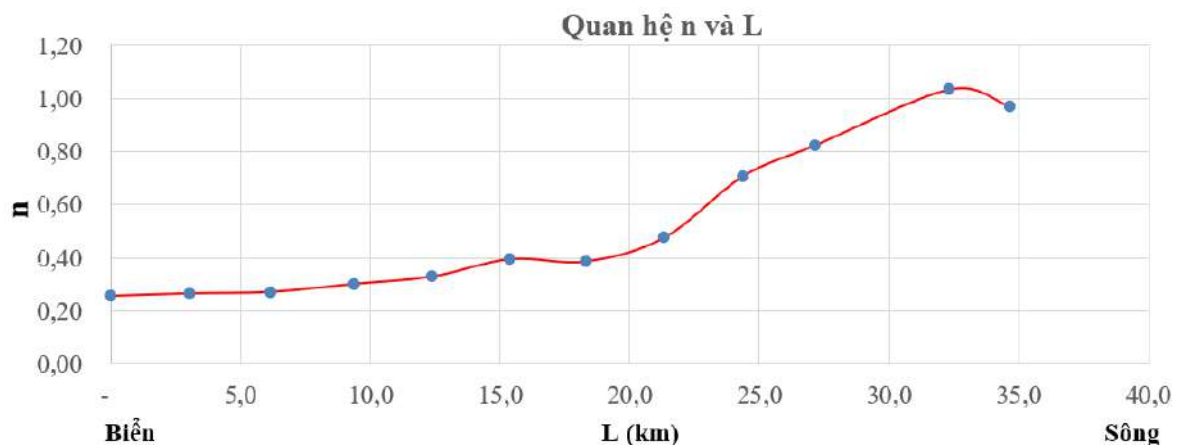
	Khoảng cách từ biển L (km)													
	0,00	3,04	6,05	9,29	12,41	15,39	18,39	21,40	24,37	27,17	30,30	33,26	36,35	39,26
$S_{\text{đáy}}$	18,25	16,45	16,15	15,35	15,20	12,90	11,60	10,95	10,40	8,76	7,84	3,21	2,50	1,01
$S_{\text{mặt}}$	14,45	12,75	12,10	10,70	6,33	5,10	4,16	3,80	3,27	2,03	1,34	0,77	0,67	0,56
S_m	16,35	14,60	14,13	13,03	10,76	9,00	7,88	7,38	6,83	5,40	4,59	1,99	1,58	0,78
ΔS	3,80	3,70	4,05	4,65	8,88	7,80	7,44	7,15	7,14	6,73	6,50	2,44	1,83	0,45
n	0,23	0,25	0,29	0,36	0,82	0,87	0,94	0,97	1,04	1,25	1,42	1,22	1,16	0,57
PL	TB								M					



Hình 2-23: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Trần Đề ngày 31/3/2016 (khi LWS)

Bảng 2-11: Kết quả đo đạc và tính toán tham số n - nhánh Trần Đề (ngày 01/4/2016) khi triều xuống (LWS)

Thông số	Vị trí điểm đo													
	T01	T02	T03	T04	T05	T06	T07	T08	T09	T10	T11	T12	T13	T14
	Thời gian đo													
	16:04	16:13	16:21	16:34	16:45	16:56	17:05	17:13	17:22	17:30	17:38	17:45	17:53	18:00
	Khoảng cách từ biển L (km)													
	0	3,0	6,2	9,4	12,4	15,4	18,3	21,3	24,4	27,1	32,3	34,7	37,7	40,6
$S_{\text{đáy}}$	18,80	16,90	16,80	14,95	13,90	12,40	9,80	9,08	8,78	8,17	6,84	6,50	5,52	4,80
$S_{\text{mặt}}$	14,55	12,95	12,80	11,05	9,99	8,33	6,64	5,59	4,20	3,41	2,18	2,26	0,89	0,78
S_m	16,63	14,93	14,80	13,00	11,94	10,36	8,22	7,34	6,49	5,79	4,51	4,38	3,20	2,79
ΔS	4,25	3,95	4,00	3,90	3,92	4,08	3,16	3,49	4,58	4,76	4,66	4,24	4,62	4,02
n	0,26	0,26	0,27	0,30	0,33	0,39	0,38	0,48	0,71	0,82	1,03	0,97	1,44	1,44
PL	TB								M					



Hình 2-24: Biểu đồ quan hệ n và L nhánh Trần Đề ngày 01/4/2019 (khi LWS)

2.3.2.3. Đánh giá chung cho 2 nhánh sông

Kết quả tính toán tham số n để xác định cơ chế phân tầng vùng cửa sông dựa trên số liệu thực đo cho hai nhánh sông Hậu cho thấy hiện tượng phân tầng xảy ra trong cả hai trường hợp triều lên (HWS) và triều xuống (LWS). Mặc dù số liệu đo đạc khảo sát hiện trường còn hạn chế nên việc đánh giá chưa bao trùm toàn bộ các diễn biến về xâm nhập mặn, đặc tính phân tầng nhưng bước đầu khẳng định tại vùng cửa sông Hậu có xảy ra hiện tượng phân tầng. Kết quả tính toán đã chỉ ra có thời điểm phân tầng khá mạnh và có thể hình thành nê-muối. Kết quả tính toán hệ số n cũng phản ánh đúng bản chất về mặt lý thuyết là khi thủy triều xuống dòng chảy sông mạnh sẽ làm hiện tượng phân tầng mạnh hơn. Đồng thời kết quả cũng cho thấy phù hợp với thực tế tại cửa sông Hậu giữa hai nhánh Trần Đề và Định An, nhánh Định An dòng chảy sông mạnh hơn nhánh Trần Đề nên hiện tượng phân tầng ở nhánh Định An mạnh và rõ nét hơn đặc biệt là trong các thời điểm triều xuống.

2.3.3. Xác định các tiêu chí phù hợp cho các cửa sông ĐBSCL

Trên cơ sở các tính toán từ các tham số kinh nghiệm để xác định cơ chế phân tầng cho các nhánh sông thuộc ĐBSCL cho thấy các hệ số đều có thể áp dụng được, việc xác định bằng tham số n dựa vào số liệu thực đo sẽ cho độ chính xác và trực quan hơn. Tuy nhiên việc đo đạc mặn tại hiện trường theo chiều sâu dòng chảy là khá hạn chế vì yêu cầu nguồn nhân, vật lực lớn và phải đo liên tục thường xuyên do đó rất khó để có số liệu trong phân tích, tính toán, đánh giá.

Dựa trên kết quả phân tích cơ chế phân tầng tại hai cửa sông Hậu (Định An và Trần Đề) qua tham số n và η cho thấy kết quả khá tương đồng về mặt không gian và đặc tính phân tầng (phân tầng mạnh, yếu, không phân tầng) điều này có thể thấy có thể dùng tham số η để sơ bộ xác định đặc tính phân tầng và phân loại cửa sông khá tốt. Việc xác định tham số η khá đơn giản và dễ thực hiện dựa trên các kết quả tính toán đơn giản từ mô hình thủy lực một chiều hay giá trị thực đo về lưu lượng trên sông. Trong điều kiện hiện nay khi việc quan trắc đo đạc mặn còn hạn chế thì tham số η là một lựa chọn phù hợp để xác định cơ chế phân tầng cho vùng cửa sông.

Qua các kết quả tính toán các hệ số cửa sông để đánh giá, xác định mức độ phân tầng cho thấy kết quả tính toán chỉ phản ánh xác định được khả năng phân tầng. Tuy

nhiên một câu hỏi đặt ra là nếu phân tầng thì nồng độ mặn, mật độ... của các tầng nước theo chiều sâu bằng bao nhiêu và khác nhau thế nào thì kết quả tính toán chưa trả lời được do đó khả năng áp dụng vào thực tế là không cao. Phân bố mặn trên vùng cửa sông theo không gian ba chiều và thời gian liên tục do đó việc dùng các tham số kinh nghiệm và thực đo là rất khó khăn và có nhiều hạn chế. Từ các tính toán trên cho thấy để đánh giá chi tiết về bản chất cơ chế phân tầng mặn và xác định được nồng độ theo không gian chiều sâu, mặt bằng và theo mặt cắt ngang sông theo thời gian thì chắc chắn phải dùng các cụ mô hình toán số 3D để mô phỏng.

2.4. Mô hình toán số trong nghiên cứu xâm nhập mặn

Một số phương pháp nghiên cứu về xâm nhập mặn có thể kể đến là: phương pháp đo đạc thực nghiệm, phương pháp mô hình vật lý và phương pháp mô hình toán. Các phương pháp nghiên cứu có thể độc lập hay kết hợp tùy thuộc vào mục tiêu nghiên cứu, mức độ yêu cầu, thời gian nghiên cứu...Hiện nay, công cụ mô hình toán ngày càng phát triển song hành với sự phát triển của công nghệ thông tin và của phương pháp tính. Mô hình toán là một sự lựa chọn ưu tiên bởi một số ưu điểm như: tiết kiệm chi phí, thời gian, mô phỏng được nhiều các yêu cầu, kịch bản tính toán. Phương pháp mô hình toán thường được kết hợp với phương pháp thực đo góp phần minh chứng cho kết quả tính toán và để hiệu chỉnh, kiểm định kết quả tính toán làm gia tăng tính chính xác của mô hình.

Dưới sự phát triển của khoa học kỹ thuật đặt biệt là sự phát triển của phương pháp toán số cho phép giải gần đúng các bài toán về thủy động lực học dòng chảy, động lực học. Nhiều mô hình thủy động lực ra đời với sự giúp sức của máy tính có tốc độ tính toán nhanh và có khả năng tính toán song song, làm giảm thời gian tính toán rất nhiều, đặt biệt trong việc mô phỏng quá trình dòng chảy. Bài toán lan truyền mặn thường được giải trên nền bài toán thủy lực. Hiện tại, nghiên cứu diễn biến thủy lực và xâm nhập mặn trên hệ thống sông kênh là một trong những vấn đề đang được quan tâm nhiều trong các nghiên cứu về quản lý, khai thác nguồn nước, hệ sinh thái...Các mô hình mô phỏng xâm nhập mặn được phát triển từ khi Saint- Vennant (1871) công bố hệ phương trình mô phỏng quá trình thủy động lực trong hệ thống kênh hở một chiều nổi tiếng mang tên ông. Cùng với sự phát triển của công nghệ tính,

tốc độ của máy tính đến thời điểm hiện tại các mô hình tính toán rất đa dạng từ mô hình một chiều đến mô hình ba chiều. Các mô hình số có thể được phân loại theo số chiều của quá trình sai phân cụ thể như sau:

2.4.1. Mô hình 1 chiều (1D)

Mô hình 1 chiều (1D) xuất hiện khá sớm song hành với phát triển của máy tính. Mô hình 1D đã được nhiều tác giả xây dựng vào những thập kỷ 70 và đã thành công trong nhiều ứng dụng thực tế và nghiên cứu. Sơ đồ mô hình một chiều (1D) sẽ bao gồm các mặt cắt ngang đặt vuông góc với chiều dọc sông khi cần thiết để xác định hình học của nguyên mẫu. Các mô hình 1D đã được sử dụng nhiều trong tính toán thủy lực và chất lượng nước cho các hệ thống sông kênh với chế độ dòng chảy không ổn định do ưu điểm là xây dựng sơ đồ tính không quá phức tạp, thời gian tính toán nhanh. Các yếu tố thủy lực (mức nước, lưu lượng và vận tốc), yếu tố chất lượng nước (nồng độ mặn, chất lơ lửng, các chất hòa tan...) thường được tính trung bình trên toàn bộ phần ngập nước của mặt cắt ngang sông. Các mô hình tính toán thủy lực và xâm nhập mặn hiện nay đang được sử dụng trên thế giới gồm có: Mô hình động lực của sông FWQA (Hoa Kỳ), mô hình SALFLOW (Delf Hydraulics - Hà Lan), Mô hình MIKE 11 (DHI - Đan Mạch), Mô hình ISIS (Anh), Mô hình EFDC (Hoa Kỳ), Mô hình thời gian thủy triều của Lee - Harleman và Thatcher - Harleman... Một số nhà khoa học trong nước cũng xây dựng và phát triển một số mô hình như: Mô hình VRSAP (cố PGS Nguyễn Như Khuê), Mô hình KOD (GS.TSKH Nguyễn Ân Niên), mô hình SAL, DELTA (GS.TS Nguyễn Tất Đắc), Mô hình MK4 (PGS.TS Lê Song Giang), Mô hình HydroGIS (PGS. TS Nguyễn Hữu Nhân).

2.4.2. Mô hình 2 chiều (2D)

Mô hình 2D có xu hướng phát triển bắt đầu từ những năm 1990, phần lớn các mô hình 2D hiện nay được xây dựng hướng đến việc xây dựng giao diện một cách trực quan và dễ dàng sử dụng kết hợp với hệ thống thông tin địa lý (GIS). Tùy mục đích nghiên cứu khác nhau mà chiều bổ sung tính toán được xem xét phát triển. Để tính toán thủy lực thuần túy, thông thường, tính toán ngập lụt, truyền chất, lan truyền dầu... thì chiều bổ sung là theo chiều ngang sao cho vận tốc và các yếu tố khác về chất lượng nước có thể được tính theo phương x và y ngang (2HD) các mô hình trung

bình độ sâu 2HD sẽ không có khả năng giải quyết dòng chảy phân tầng theo chiều sâu. Để có thể cung cấp các thông tin biến đổi theo không gian về chiều sâu nước, các thành phần vận tốc trung bình theo hướng dòng chảy và hướng ngang, cao trình đáy sông, hồ và vùng cửa sông thì chiều bổ sung sẽ là chiều theo phương chiều sâu z của nước (mô hình tính theo phương x và z - 2DV). Các mô hình 2D có thể kể đến là: Mô hình HEC-RAS (Hoa Kỳ), mô hình MIKE 21, MIKE11 - Stratified (DHI - Đan Mạch), mô hình EFDC (Hoa Kỳ), mô hình CE-QUAL-W2 (Hoa Kỳ), mô hình Delft (Hà Lan), mô hình TELEMAC (Pháp)... và một số mô hình được phát triển trong nước của GS.TS Nguyễn Tất Đắc, PGS.TS Nguyễn Hữu Nhân, PGS.TS Lê Song Giang...

2.4.3. Mô hình ba chiều (3D)

Khi tốc độ máy tính chưa cao, phương pháp giải còn hạn chế thì thông thường các nghiên cứu xây dựng mô hình dạng 1D với các phương trình tính toán đã được rút gọn và đơn giản hóa. Trong thời gian gần đây và hiện nay khi máy tính và công nghệ tính toán phát triển vượt bậc và yêu cầu về độ chính xác của mô hình ngày càng được nâng cao. Yêu cầu tính toán nâng cao dẫn các nhà nghiên cứu trở lại với hệ các phương trình nguyên thủy của hiện tượng vật lý. Mô hình sử dụng hệ các phương trình nguyên thủy chỉ được triển khai đầy đủ khi sử dụng phương pháp 3 chiều (3D).

Trong một số trường hợp và yêu cầu tính toán cụ thể đặc biệt như các tính toán liên quan đến dòng chảy phân tầng, nê-mạn vùng cửa sông, phân bố nhiệt độ, mô tả khả năng bồi xói lắng đọng, dòng chảy trong các hố xói sâu, xói lở qua trụ cầu hoặc tại nơi gần các công trình... một số bài thì bắt buộc phải sử dụng mô hình 2 chiều đứng (2DV) hoặc mô hình 3D. Với yêu cầu tính toán mô hình hóa một cách đầy đủ về bản chất vấn đề, sát với hiện tượng tự nhiên thì mô hình 3D là một lựa chọn phù hợp.

Phần lớn các mô hình thủy động lực ở dạng 3D đều giải phương trình liên tục và Navier - Stokes bằng phương pháp sai phân hữu hạn, phần tử hữu hạn hoặc thể tích hữu hạn. Phương trình Navier - Stokes được giải bằng phương pháp trung bình hóa của Reynolds. Phương trình Reynolds có thể chia thành hai dạng: dạng thủy tĩnh và phi thủy tĩnh. Mô hình dạng thủy tĩnh có độ chính xác không cao khi tính toán

dòng chảy ở những nơi có sự thay đổi ứng suất lớn. Ngược lại, mô hình dạng phi thủy tĩnh có độ chính xác cao hơn và có khả năng mô tả những đặc tính phức tạp của dòng chảy thứ cấp trong một miền tính phức tạp.

Một số mô hình 3D hiện nay đang được sử dụng để tính toán thủy lực, truyền chất, nhiệt độ, xói lở có thể kể đến là: Mô hình MIKE3 (DHI - Đan Mạch), Mô hình DELFT3D (Delft Hydraulics - Đan Mạch), Mô hình TELEMAC-3D (Pháp), Mô hình EFDC (Hoa Kỳ), Mô hình VNU/MDEC (Đinh Văn Ưu và các cộng sự - Trường Đại học Quốc gia Hà Nội).

2.5. Lựa chọn phương pháp, công cụ nghiên cứu

Trước các biến đổi về nguồn nước trên ĐBSCL ngày càng có xu thế phức tạp do yếu tố tự nhiên, khí tượng thủy văn thay đổi, nước biển dâng, sụt lún đồng bằng, hạ thấp lòng dẫn và đặc biệt là khai thác thượng lưu vực sông Mê Công xâm nhập mặn tại vùng cửa sông ven biển ĐBSCL cũng có những thay đổi đáng kể, các năm cực đoan về mặn hạn càng có xu thế xảy ra gần hơn ảnh hưởng trực tiếp đến sản xuất và phát triển chung của vùng ĐBSCL. Để hạn chế những tác động tiêu cực do mặn gây ra và từng bước khai thác tài nguyên nước mặn hợp lý thì cần phải nghiên cứu sâu hơn về xâm nhập mặn.

Trong nghiên cứu này để tính toán đánh giá tổng thể về cơ chế phân tầng cho các cửa sông ven biển ĐBSCL đã dùng các tham số giải tích để tính toán sơ bộ. Trên cơ sở kết quả tính toán sẽ khái quát được bức tranh tổng thể về khả năng phân tầng cho tất cả các cửa sông chính của ĐBSCL, tuy nhiên mức độ chi tiết cụ thể còn hạn chế. Các tham số giải tích dùng để đánh giá phân tầng của sông mặc dù đã được các nhà khoa học nước ngoài sử dụng nhiều nhưng về cơ bản chỉ phù hợp với các sông đơn nhánh do đó để áp dụng cho vùng cửa sông ĐBSCL với đa nhánh là rất khó khăn và yêu cầu về tài liệu thực đo khá lớn. Trong nghiên cứu này, nghiên cứu sinh đã sử dụng các số liệu đo đạc thực tế về mặn phân tầng dọc theo hai nhánh sông Hậu vào các thời điểm nước ngưng khi đỉnh triều HWS và khi chân triều LWS để tính toán xác định khả năng mức độ phân tầng theo tham số n của D. Pritchard. Kết quả tính toán bằng số liệu thực đo mặn theo tham số n chỉ ra rằng sự phân tầng thay đổi theo

chiều dọc sông và cũng giảm dần từ thượng lưu ra đến biển. Vào thời điểm LWS khả năng phân tầng mặn cao hơn, nêm mặn rõ nét hơn so với thời điểm HWS.

Từ hai kết quả tính toán bằng các tham số giải tích xác định được các tham số đặc trưng cho sự phân tầng (η và n) cho các thời điểm trong mùa kiệt đã có thể trả lời được câu hỏi là có xảy ra hiện tượng phân tầng và khả năng hình thành nêm mặn cho các nhánh sông Cửa Long vùng ven biển. Tuy nhiên, kết quả chưa mô tả chi tiết được hình dáng, đặc điểm, sự phát triển của hiện tượng phân tầng theo không gian và thời gian.

Với mục tiêu nghiên cứu trong luận án là xác định, đánh giá được cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông (tập trung vào cơ chế phân tầng mặn), xác định được khả năng phân tầng, hình dạng đặc tính của phân tầng... và để mô phỏng được các yêu cầu này thì cần phải dùng phương pháp mô hình số để tính toán kết hợp kiểm chứng bằng số liệu thực đo mặn theo chiều sâu. Để đánh giá một cách chi tiết hơn và làm rõ nét được hiện tượng phân tầng, mô tả được cấu trúc nêm mặn tại vùng cửa sông thì chắc chắn sẽ phải dùng mô hình hai chiều theo phương đứng $x - z$ hoặc mô hình 3D. Hiện nay, có nhiều mô hình có thể ứng dụng trong nghiên cứu tính toán như mô hình $x-z$ CE-QUAL-W2, mô hình 3D như: DELFT3D, TELEMAC-3D, MIKE3... Tuy nhiên, dựa trên những điều kiện yêu cầu của mô hình tính mà NCS có thể đáp ứng như số liệu, tài liệu, kinh nghiệm sử dụng, thiết bị máy tính và bản quyền sử dụng trong trong luận án NCS đã sử dụng modul MIKE3 trong họ phần mềm MIKE để tính toán.

2.6. Kết luận Chương 2

Trong nội dung Chương 2 nghiên cứu sinh đã khái quát được các vấn đề liên quan đến lý thuyết của chế độ thủy lực, xâm nhập mặn tại vùng cửa sông ven biển và tập trung sâu hơn về hiện tượng phân tầng mặn vùng cửa sông ven biển thông qua lý thuyết hai lớp được phát triển bởi Schijf và Schonfeld [34] đây là một hướng lý thuyết được áp dụng để phát triển mô hình dự đoán về chiều dài xâm nhập của nêm mặn vùng cửa sông.

Tính toán về xâm nhập mặn, phân tầng mặn vùng cửa sông có một số tham số kinh nghiệm được xây dựng dựa trên nguyên lý căn bản của lý thuyết hai lớp, các kết

quả thí nghiệm mô hình vật lý, tổng hợp xây dựng từ các số liệu đo đạc hiện trường. Các tham số này có thể ứng dụng cho các bài toán đơn giản hay các bước nghiên cứu sơ bộ ban đầu trước khi có các nghiên cứu tính toán chi tiết để có thể giảm thời gian nghiên cứu. Trong nội dung chương này NCS đã tổng hợp được một số tham số kinh nghiệm để tính toán đánh giá sơ bộ hiện tượng phân tầng tại cửa sông và trên cơ sở các tài liệu số liệu đo đạc, khảo sát luận án đã sử dụng 2 tham số kinh nghiệm là tham số Simmons (η) và tham số D. Pritchard (n) để tính toán sơ bộ phân tầng mặn cho các cửa sông Cửu Long. Kết quả tính toán cho thấy có hiện tượng phân tầng mặn tại các cửa sông vùng ĐBSCL tại một số thời điểm nước ngưng khi triều lên, khi triều xuống hay khi thay đổi chiều dòng chảy tuy nhiên không thể hiện và đánh giá được chi tiết về cơ chế xâm nhập mặn. Các tham số giải tích dùng để đánh giá phân tầng của sông mặc dù đã được các nhà khoa học nước ngoài sử dụng nhiều nhưng về cơ bản chỉ phù hợp với các sông đơn nhánh do đó để áp dụng cho vùng cửa sông ĐBSCL với đa nhánh là rất khó khăn và yêu cầu về tài liệu thực đo khá lớn.

Từ yêu cầu mục tiêu của luận án là xác định, đánh giá được cơ chế xâm nhập mặn vùng cửa sông (tập trung vào cơ chế phân tầng mặn), xác định được khả năng phân tầng, hình dạng đặc tính của phân tầng... thì phương pháp mô hình toán số là lựa chọn duy nhất và phù hợp tại thời điểm hiện nay. Qua phân tích các mô hình toán số hiện nay dùng trong nghiên cứu, tính toán xâm nhập mặn trong và ngoài nước và khả năng đáp ứng yêu cầu của nghiên cứu trong luận án NCS đã lựa chọn mô hình số 3 chiều. Từ kinh nghiệm làm việc, nghiên cứu và điều kiện thực tế về nguồn tài liệu, tài liệu và tính hợp pháp của các công cụ dùng trong tính toán, NCS đã lựa chọn mô hình 3D (MIKE3) để tính toán trong nghiên cứu.

CHƯƠNG 3: KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN VỀ CƠ CHẾ XÂM NHẬP MẶN TẠI VÙNG CỬA SÔNG HẬU

3.1. Lựa chọn mô hình và đối tượng nghiên cứu điển hình

Trong các tính toán đánh giá phân tầng mặn bằng công thức giải thích chỉ định tính được khả năng phân tầng mà chưa định lượng được nồng độ mặn theo các tầng khác nhau theo chiều sâu dọc theo sông hay ngang theo mặt cắt. Để đánh giá định lượng được chi tiết được phân tầng mặn theo không gian thì công cụ tính toán mô hình 3D sẽ được lựa chọn trong nghiên cứu. Trong nghiên cứu này nghiên cứu sinh dùng mô hình MIKE3 để tính toán.

Để xây dựng được mô hình 3D chi tiết trong nghiên cứu tính toán cần rất nhiều tài liệu đầu vào như: thủy văn, yếu tố hình thái sông, số liệu thực đo mặn theo chiều sâu dòng chảy, địa hình đáy sông... Đồng thời để tính toán đánh giá chi tiết thì thời gian mô phỏng của mô hình MIKE3 khá lâu và sẽ lâu hơn nếu việc chia lưới tính toán mịn. Trên cơ sở các số liệu thu thập được đặc biệt các số liệu đo đạc hiện trường về nồng độ mặn theo chiều sâu trong nghiên cứu này cứu sinh tập trung chi tiết cho hai nhánh của sông Hậu.

3.2. Xây dựng mô hình nghiên cứu tính toán

3.2.1. Sơ đồ tính

Sơ đồ tính được xây dựng từ Cần Thơ ra đến biển Đông để đảm bảo tính chính xác và ổn định của mô hình tại biên mực nước phía biển sẽ lấy ra ngoài biển tính từ bờ ra khoảng 50km.

Để phân chia lưới và gán cao độ lòng sông cho mô hình tính, công cụ The mesh Generator của bộ mô hình MIKE được sử dụng nhằm phân chia miền tính toán thành lưới tam giác bất quy tắc, việc phân chia khu vực tính toán theo lưới mịn hay thô tùy thuộc vào số điểm tính toán cũng như diện tích của các ô lưới tính toán và việc này sẽ quyết định tới độ chính xác và thời gian tính toán mô phỏng. Trong phạm vi mô hình cho đoạn sông Hậu nghiên cứu điển hình sử dụng hai dạng ô lưới:

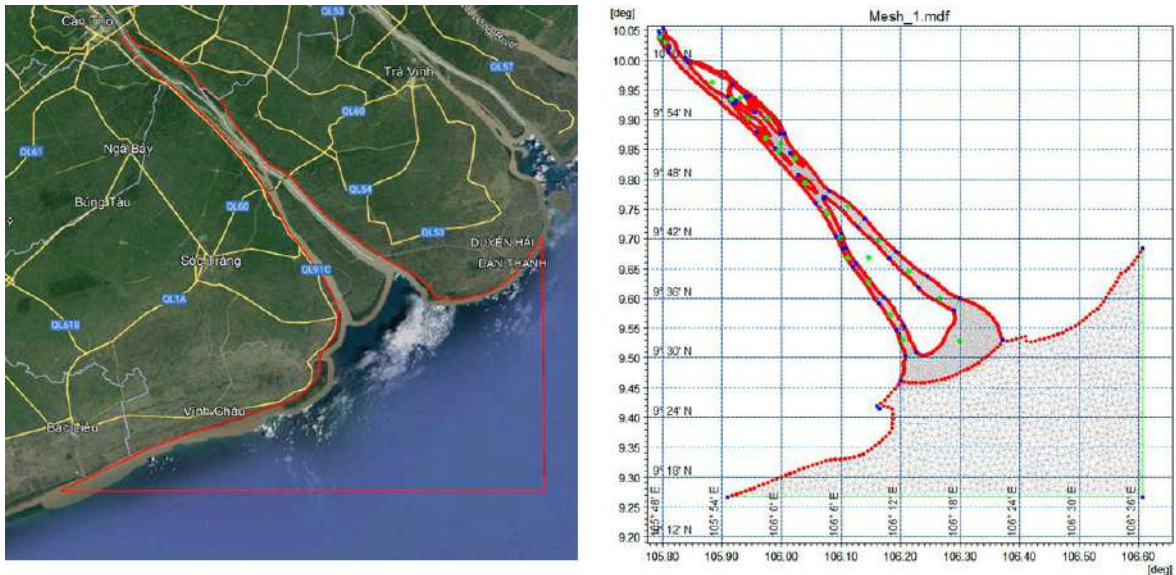
❖ Ô lưới tứ giác (hình chữ nhật)

Lưới chữ nhật được sử dụng để chia lưới cho vùng lòng sông tính toán. Ưu điểm của ô lưới này là các kết quả tính toán cũng như mô phỏng được dòng chảy theo

đường dòng và trích xuất kết quả có thể thể hiện được các lớp dòng chảy (phân tầng) theo các mặt cắt dọc hoặc mặt cách ngang một các liên mạch theo một phương nhất định (dọc hoặc ngang). Tuy nhiên, việc chia lưới chữ nhật sẽ phức tạp và tốn nhiều công sức đặc biệt với những đoạn sông có mặt bằng phức tạp, nhiều Cù lao như khu vực đang xét thì khi chia lưới chữ nhật không chia theo đường bờ sông mà phải chia lưới trùm lên toàn bộ miền tính toán dẫn tới mở rộng vùng tính toán và tăng thời gian mô phỏng. Trong sơ đồ tính ô lưới tứ giác là 3.356 ô kích thước trung bình một ô là $200 \times 80\text{m}$.

❖ Ô lưới tam giác

Với khu vực miền tính toán ngoài biển và một số vị trí có cồn nổi chia lưới tính toán dạng tam giác. Sơ đồ được chia lưới 9.156 ô lưới tam giác với diện tích trung bình một ô là $5.000\text{m}^2 - 30.000\text{m}^2$. Phần địa hình sát bờ sẽ được chia lưới mịn hơn để tăng độ chính xác khi nội suy địa hình lên lưới tính.



Hình 3-1: Phạm vi và chia lưới tính toán cho vùng nghiên cứu

3.2.2. Các số liệu đầu vào

3.2.2.1. Số liệu địa hình nền

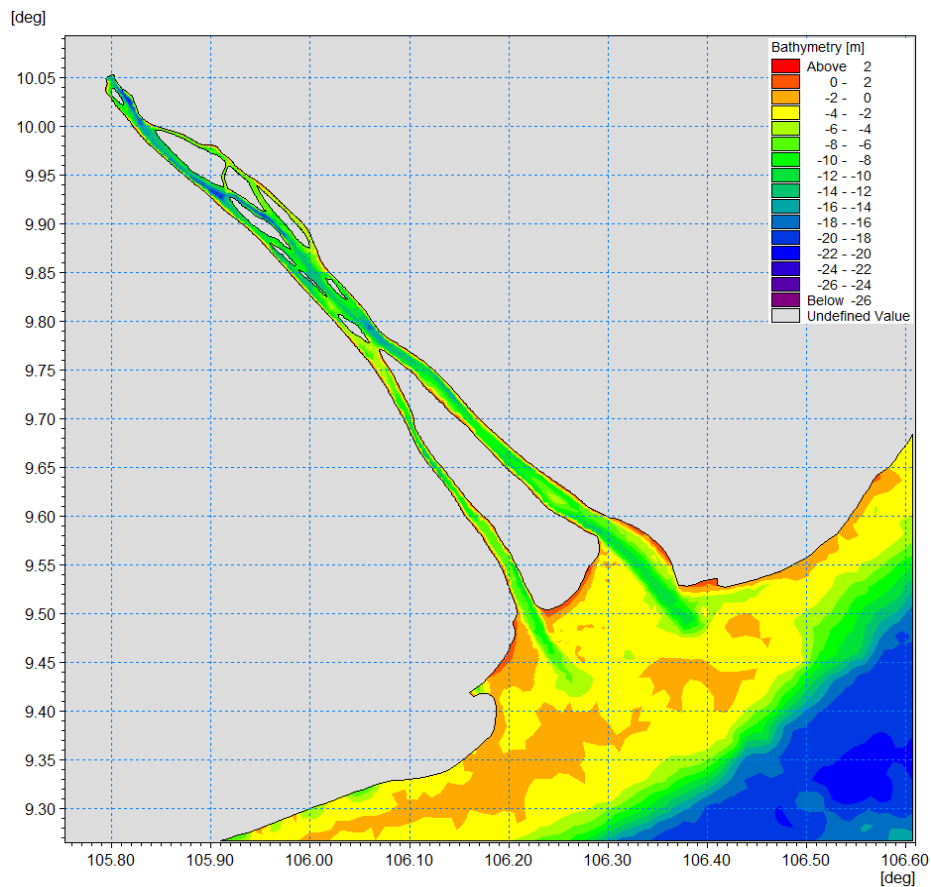
Địa hình lòng sông và ngoài biển khu vực nghiên cứu được thu thập và kế thừa từ các nghiên cứu trước đây:

- Đề tài cấp Quốc gia KC.08.21/11-15: Nghiên cứu các giải pháp khoa học - công nghệ để điều chỉnh và ổn định các đoạn sông có cù lao đang diễn ra biến

động lớn về hình thái trên sông Tiền, sông Hậu; PGS.TS Nguyễn Nghĩa Hùng, 2013-2015;

- Đề tài độc lập cấp Quốc gia; Nghiên cứu tác động bất lợi của biến đổi hình thái hình thái lòng dẫn và hạ thấp mực nước hệ thống sông Cửu Long, đề xuất giải pháp giảm thiểu; PGS.TS Nguyễn Nghĩa Hùng; 2017-2020;
- Các nguồn tài liệu khác.

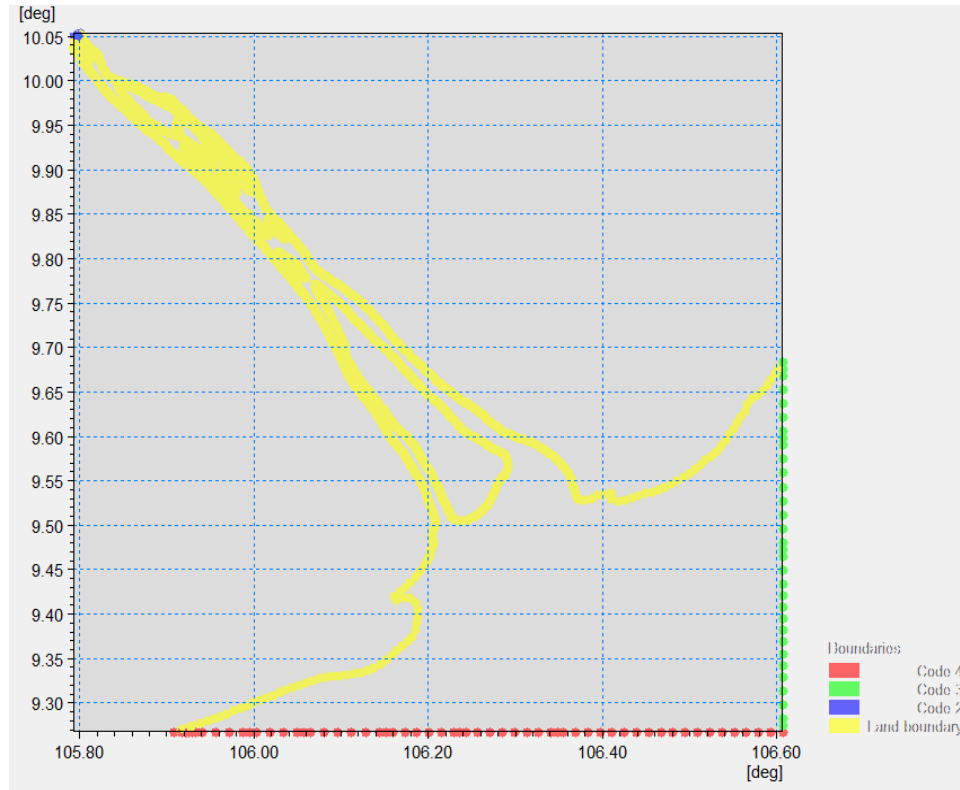
Trên nền của miền tính toán đã chia lưới tiến hành nội suy giá trị cao độ địa hình lên ô lưới để có được dữ liệu địa hình khu vực nghiên cứu tính toán.



Hình 3-2: Địa hình khu vực nghiên cứu

3.2.2.2. Điều kiện biên mô hình

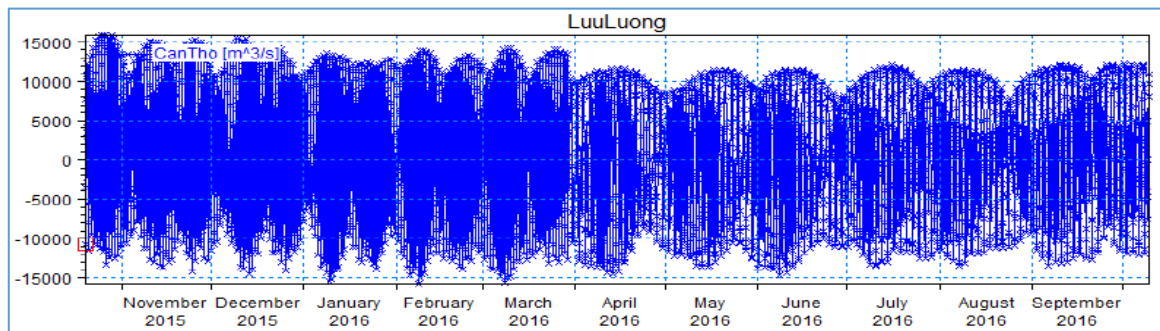
Định dạng biên trong mô hình tính gồm có 3 biên: biên khô (là các biên giới hạn giữa dòng chảy và đường bờ) và 03 biên ướt (01 biên lưu lượng thượng lưu và 02 biên mực nước hạ lưu).



Hình 3-3: Sơ họa các biên tính toán trong mô hình tính

❖ Biên thượng lưu

Biên thượng lưu là biên lưu lượng: số liệu thực đo lưu lượng của trạm thủy văn quốc gia Cần Thơ.

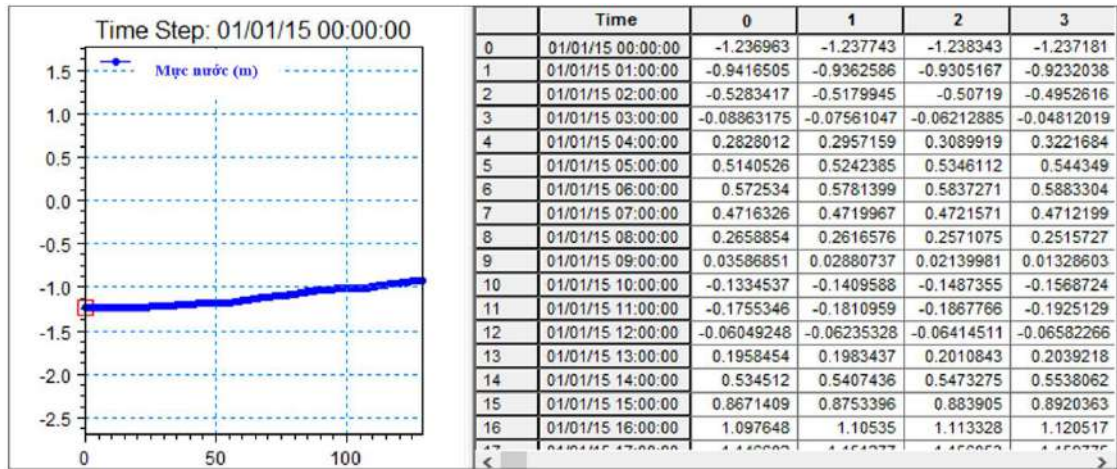


Hình 3-4: Biên lưu lượng cho mô hình

❖ Biên mực nước hạ lưu

Với mô hình 3D biên mực nước phải kéo dài ra phía ngoài biển để khỏi ảnh hưởng bởi các điều kiện trong sông do không có các trạm đo ngoài khơi nên trong luận án dùng công cụ Toolbox của Mike21 để xác định mực nước tại biên. Mực nước trích xuất từ công cụ Toolbox đã được hiệu chỉnh về thời gian theo trạm thủy văn Mỹ

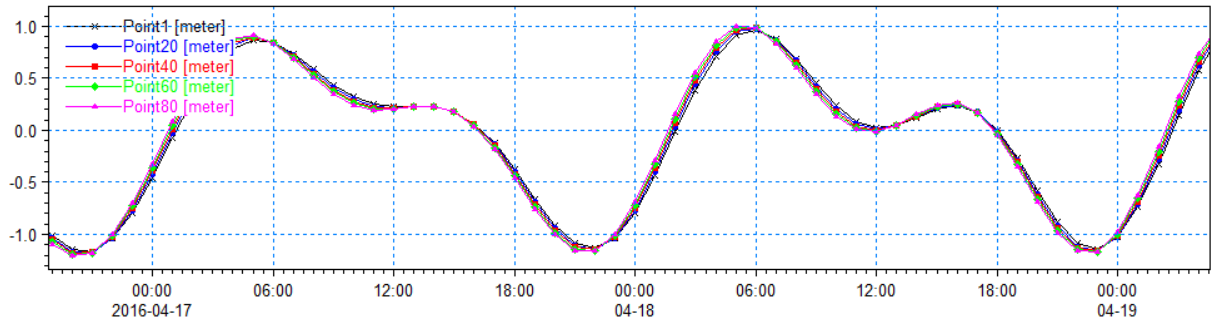
Thanh. Trong trích xuất biên mực nước cho mô hình đã theo dạng đường (line), trên đường này có nhiều điểm mực nước (tùy chọn) từ trong bờ ra ngoài khơi.



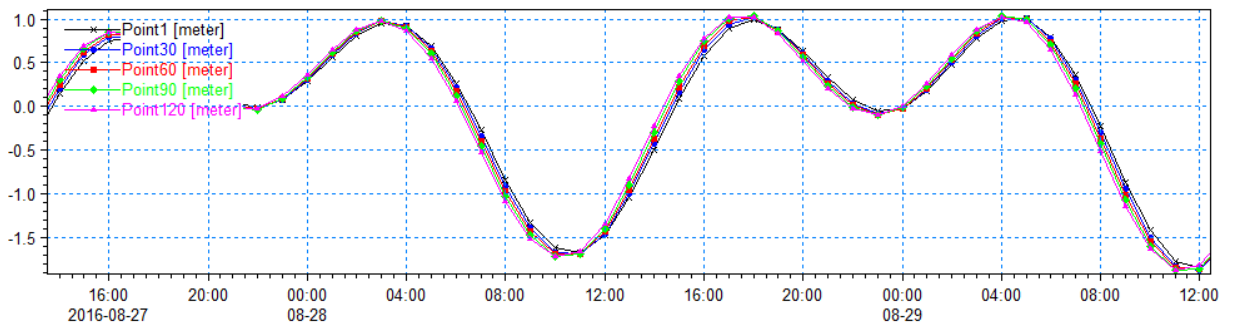
Hình 3-5: Định dạng kiểu biên mực nước trong mô hình

Biên mực nước code 3 (màu xanh) - biên sẽ được chia đều thành 79 đoạn, tương ứng với 80 điểm point (mỗi điểm point sẽ có giá mực nước khác nhau tại cùng một thời điểm).

Biên mực nước code 4 (màu đỏ) – biên sẽ được chia đều thành 119 đoạn, tương ứng với 120 điểm point (mỗi điểm point sẽ có giá mực nước khác nhau tại cùng một thời điểm).



Hình 3-6: Biên mực nước code 3



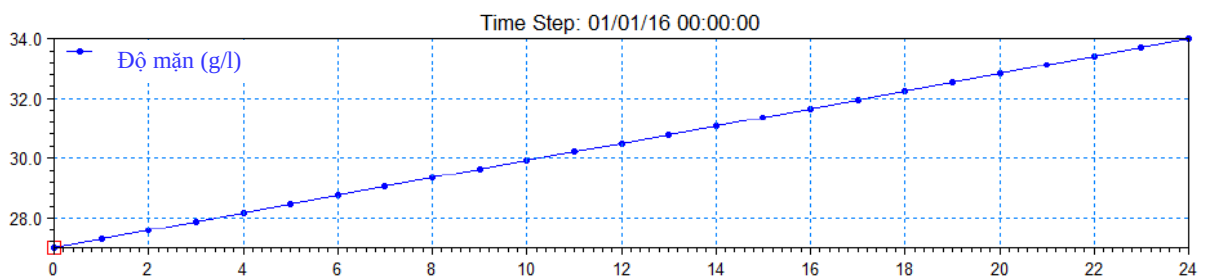
Hình 3-7: Biên mực nước code 4

❖ Biên mặn ngoài biển

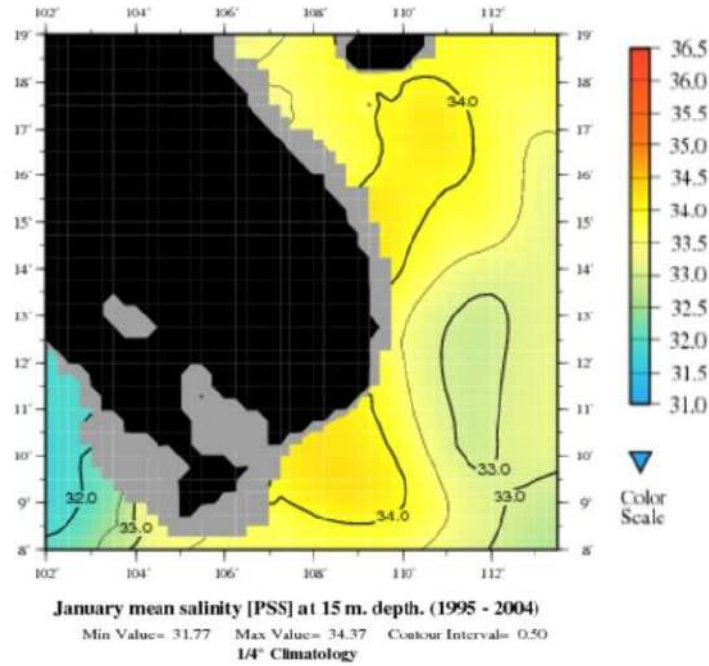
Để tính toán thủy lực và xâm nhập mặn hiện nay cho hệ thống sông kênh ĐBSCL mô hình toán là một lựa chọn ưu tiên, điều kiện biên cho các mô hình ĐBSCL hiện nay các biên thượng lưu tại Kratie, Campuchia, còn biên hạ lưu là mực nước và độ mặn thực đo tại các cửa sông của ĐBSCL. Xét về mặt toán học điều kiện biên (đặc biệt là mực nước và độ mặn tại cửa sông) phải là các giá trị không hoặc ít bị chi phối bởi sự biến động bên trong đồng bằng và các điều kiện khi tượng, thủy văn ngoài biển. Các cửa sông ĐBSCL thường rất rộng (từ 1 đến vài km) không thể đo đạc được độ mặn đặc trưng, mà có thực hiện đo đạc cũng rất tốn kém do đó thực tế hiện nay để tính toán mặn hiện nay các biên mặn phía biển hầu hết được lấy là hằng số (từ 25-27mg/l) hay lấy nội suy sau đó chạy mô phỏng và lấy kết quả từ mô phỏng làm biên cho các lần chạy mô phỏng tiếp theo việc làm này không phản ánh đúng bản chất tự nhiên.

Số liệu quan trắc đo đạc thực tế cho thấy ở khá xa ngoài biển (cách bờ biển trên 80-100km đối với ĐBSCL) độ mặn thường không đổi theo mùa (cỡ 34-36g/l). Hiện nay trên thế giới có nhiều nguồn tài liệu về độ mặn ngoài biển để có thể trích xuất làm biên cho mô hình tính toán. Khi biết các điều kiện biên từ ngoài biển xa thì sử dụng mô hình toán 2 chiều cho vùng biển cửa sông và các nhánh cửa sông để tính toán. Khi tính toán theo cách này có thể kể đến các yếu tố tác động đến xâm nhập mặn như ảnh hưởng của gió chướng thổi trực tiếp vào cửa sông, lực quay trái đất, nước biển dâng đến sự thay đổi độ mặn và mực ở cửa sông (khi triều vào), đồng thời cũng tính được sự ảnh hưởng của lưu lượng trong sông đến sự thay đổi độ mặn và mực nước vùng cửa sông khi triều rút.

Biên mặn sẽ được lấy theo dạng tuyến tính từ bờ ra đến biển với nồng độ mặn trong bờ và nồng độ mặn ngoài biển là hằng số theo thời gian.



Hình 3-8: Biên mặn trong mô hình



Nguồn: <https://www.nodc.noaa.gov/General/salinity.html>

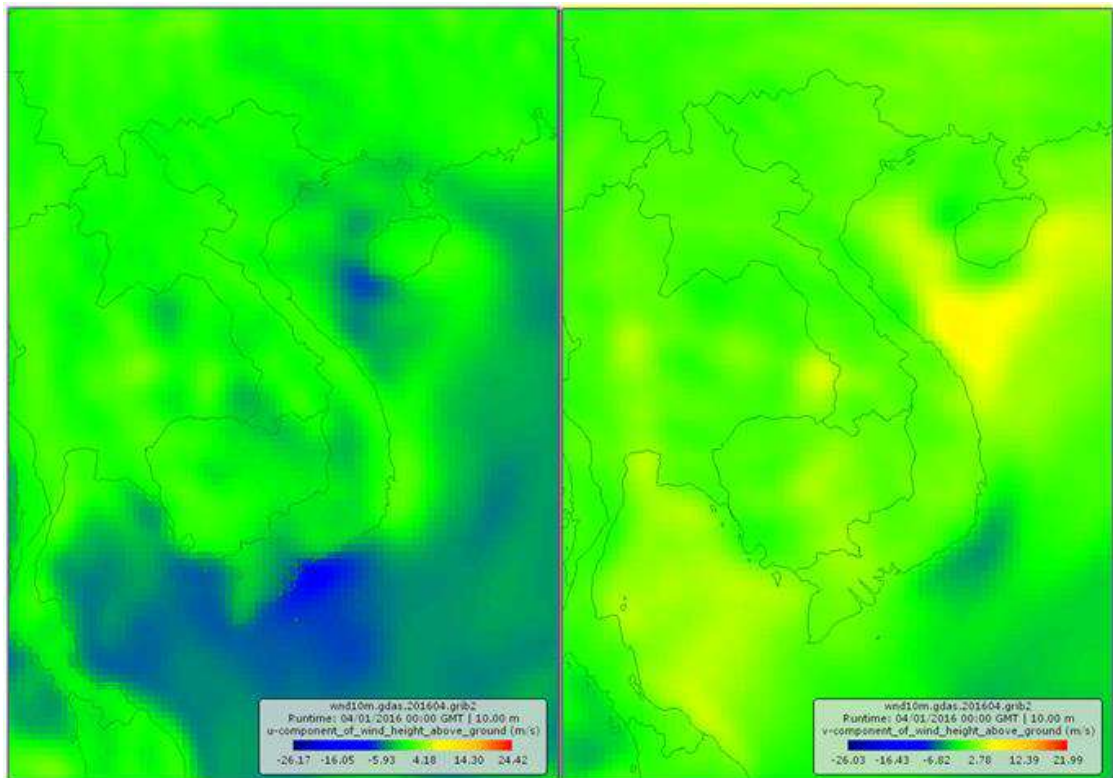
Hình 3-9: Giá trị nồng độ mặn vùng biển phía nam Việt Nam

3.2.2.3. Thiết lập thông số sóng gió

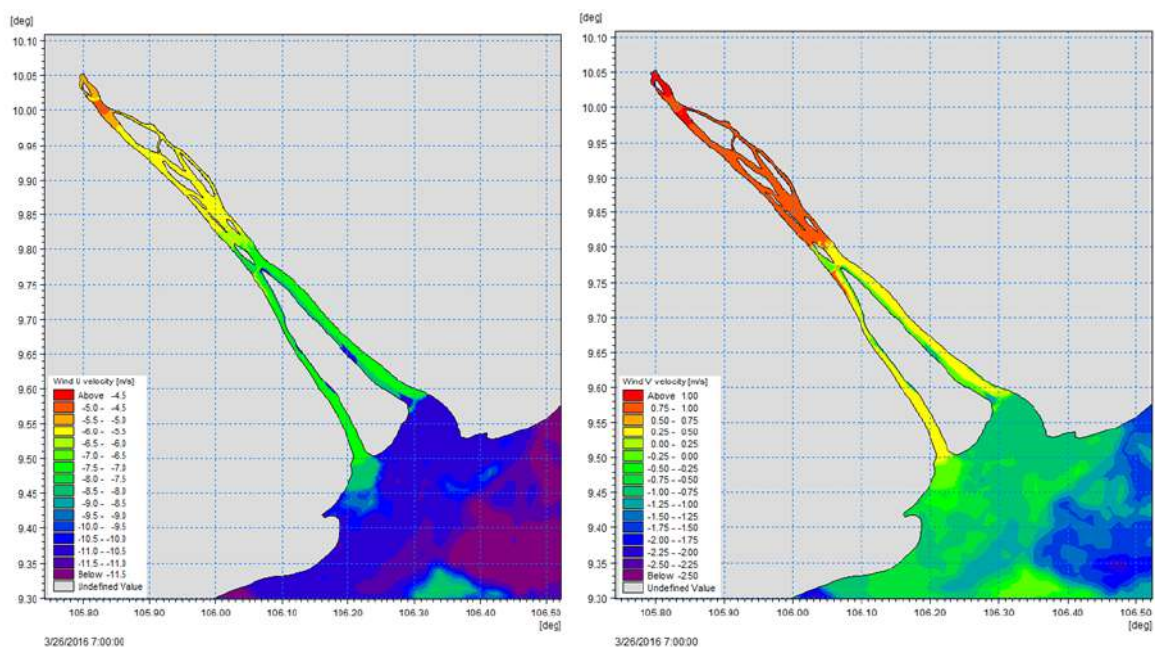
- Nguồn số liệu

Số liệu trường gió và áp suất khí quyển nền sử dụng trong nghiên cứu này được trích từ kết quả mô hình khí hậu toàn cầu CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) của Trung tâm dự báo môi trường thuộc Cơ quan quản lý đại dương và khí quyển Mỹ (NCEP/NOAA). Đây là kết quả trường gió, áp suất thu được từ mô phỏng lại (reanalysis) bao gồm việc hiệu chỉnh mô hình sử dụng các số liệu thực đo từ các hệ thống các trạm quan trắc hải văn toàn cầu nên có độ tin cậy khá cao. Số liệu trường gió này có từ 1979 đến nay với bước thời gian là 1 giờ và bước lưới là $0.312^\circ \times 0.312^\circ$. Đây là bộ số liệu rất tốt phục vụ nghiên cứu khí hậu sóng gió.

Trên cơ sở phạm vi mô hình tính và thời đoạn tính toán trong nghiên cứu đã trích xuất số liệu trường gió để đưa vào mô hình mô phỏng.



Hình 3- 10: Trường gió theo phương U, V lúc 0 giờ (GMT) ngày 1/4/2016 được thu thập từ CFSR



Hình 3-11: Trường gió trong mô hình tính toán

3.2.2.4. Thiết lập các thông số mô hình

Các thông số mô hình được thiết lập dựa trên kinh nghiệm thực tế, các chỉ dẫn có trong nội dung hướng dẫn xây dựng mô hình, phần cơ sở lý thuyết của mô hình và

các vấn đề liên quan đến thủy động lực và truyền chất trong sông, biển... Các thông số mô hình được thử dần, hiệu chỉnh, kiểm định kết quả mô phỏng với kết quả thực đo và lựa chọn được bộ thông số như bảng tính.

Bảng 3-1: Tổng hợp thông số thiết lập mô hình 3 chiều

Tên thông số	Trị số hoặc giá trị lựa chọn
Mô hình thủy động lực 3 chiều - Mike 3	
Bước thời gian tính toán	10s
Thời đoạn tính	5 tháng
Rối ngang (Turbulence Horizontal)	Hệ số nhớt rối theo công thức Smagorinsky (Eddy Coef.) = 0,28
Biên mở tại Cần Thơ	Lưu lượng giờ thực đo
Biên mở ngoài biển	Trích từ mô hình dự báo bão triều Toolbox trong MIKE21
Độ phân giải theo phương thẳng đứng	7 lớp Sigma, có tính hiệu ứng baroclinic do ảnh hưởng của độ muối
Các thông số vận chuyển và khuếch tán mặn	
Khuếch tán dọc (Dispersion Horizontal)	Tính theo nhớt rối (Scaled Horizontal Eddy), hệ số tỷ lệ (scaling factor) = 0,3
Khuếch tán đứng (Dispersion Vertical)	Tính theo nhớt rối (Scaled Vertical Eddy), hệ số tỷ lệ (scaling factor) = 0,02
Độ mặn ban đầu	Phân bố đều trên miền tính biến thiên từ 0 g/l đến 34 g/l tăng dần từ Cần Thơ, Mỹ Thanh ra biển.
Biên mở tại Cần Thơ	Nước ngọt
Biên mở ngoài biển	Độ muối là từ 26-34 g/l

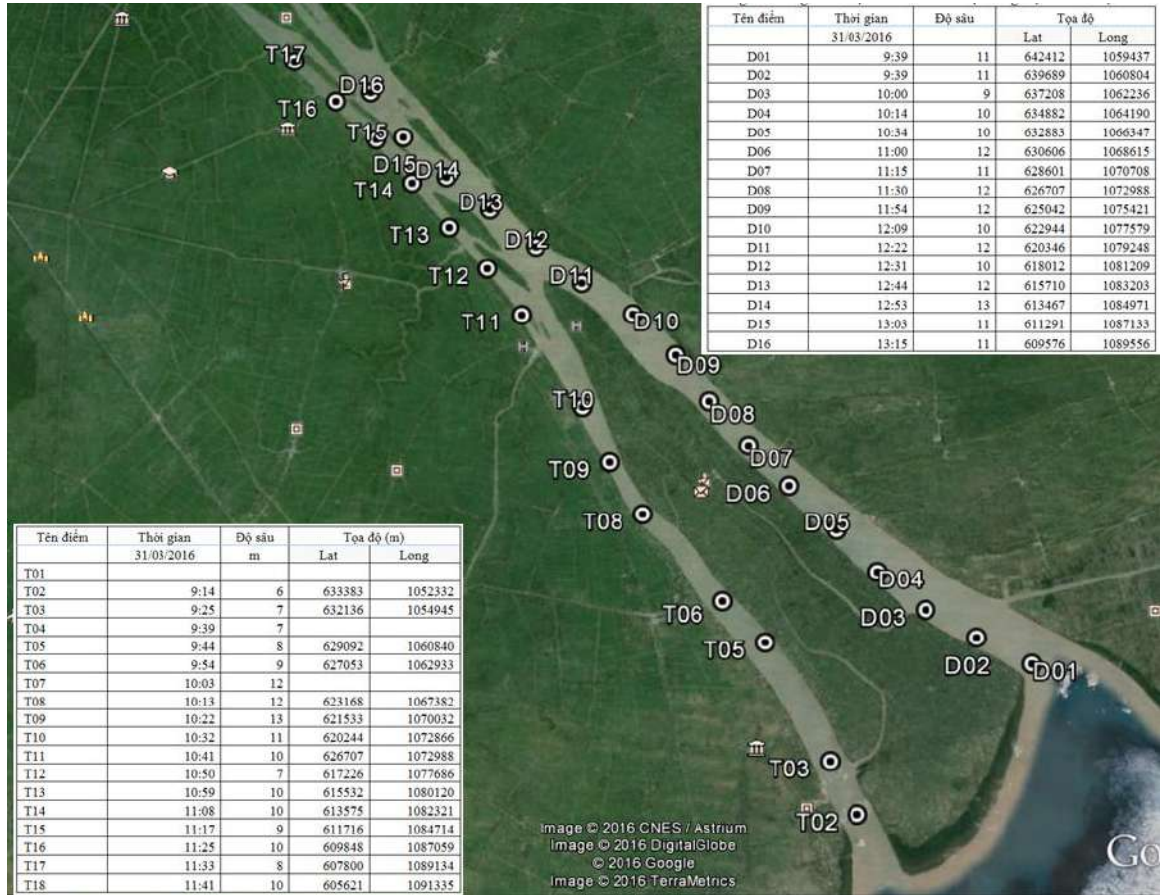
3.2.3. Hiệu chỉnh mô hình

3.2.3.1. Số liệu hiệu chỉnh mô hình

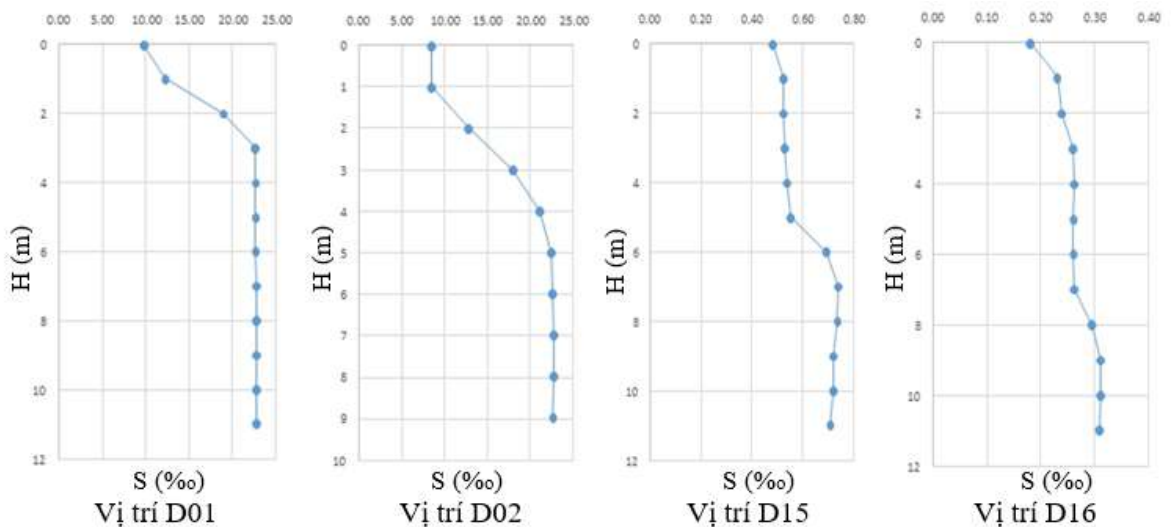
- Hiệu chỉnh thủy lực: Hiệu chỉnh với giá trị mực nước thực đo tại 2 trạm thủy văn quốc gia trên sông Hậu (Trần Đề và Đại Ngãi) và các trạm đo mực nước thực hiện trong đợt khảo sát năm 2016.
- Số liệu mặn: Số liệu mặn trung bình tại trạm Trần Đề và số liệu đo mặn phân tầng tại một số vị trí dọc theo hai nhánh sông Hậu (Định An và Trần Đề) từ

biển lên đến qua địa phận Cù Lao Dung được thực hiện trong đợt khảo sát năm 2016

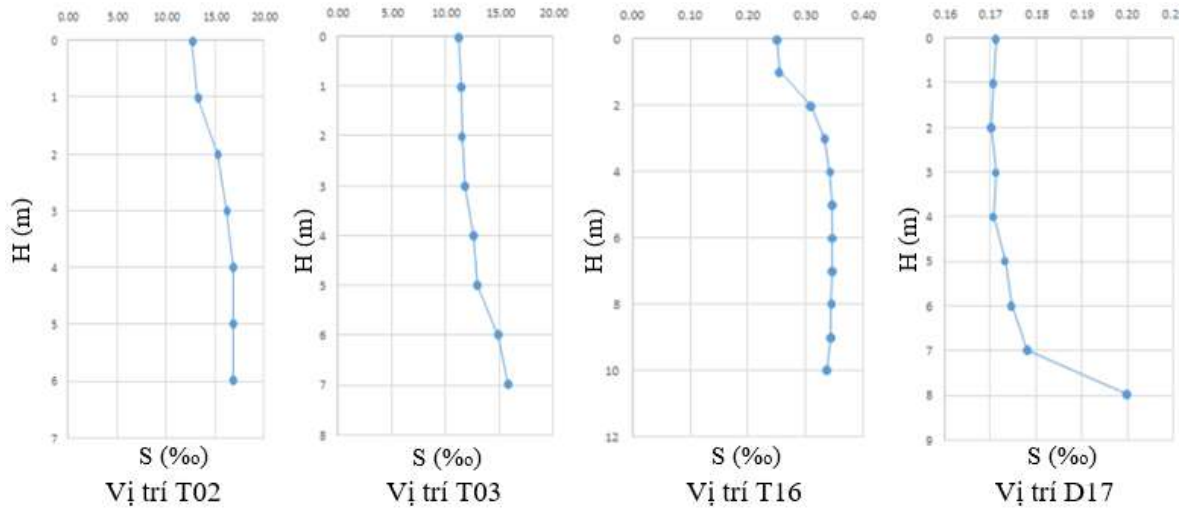
Ghi chú: Ký hiệu D là các vị trí đo dọc nhánh Định An và T là các vị trí đo dọc nhánh Trần Đề



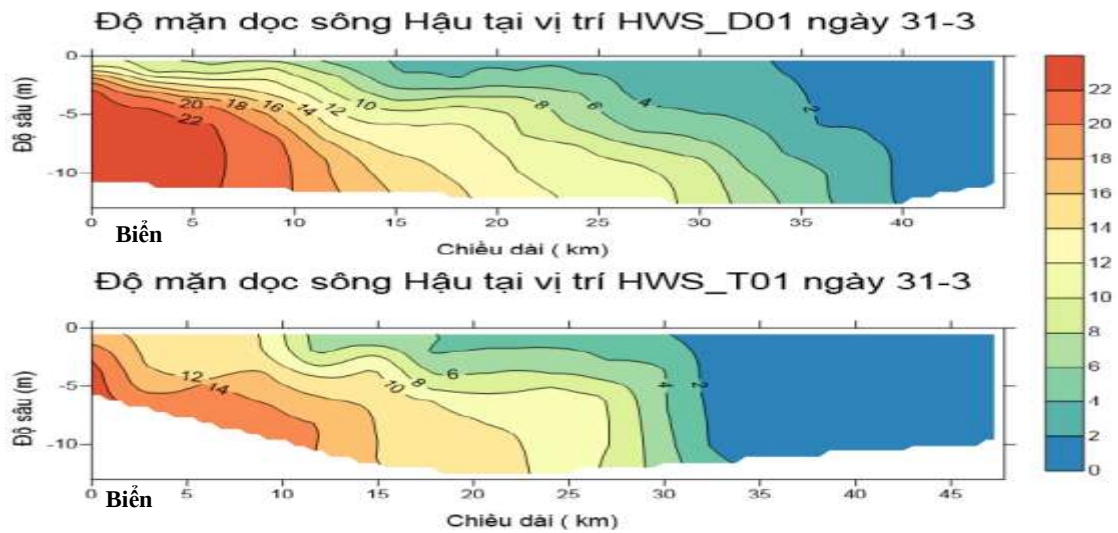
Hình 3-12: Sơ đồ bố trí các điểm khảo sát dọc sông Hậu



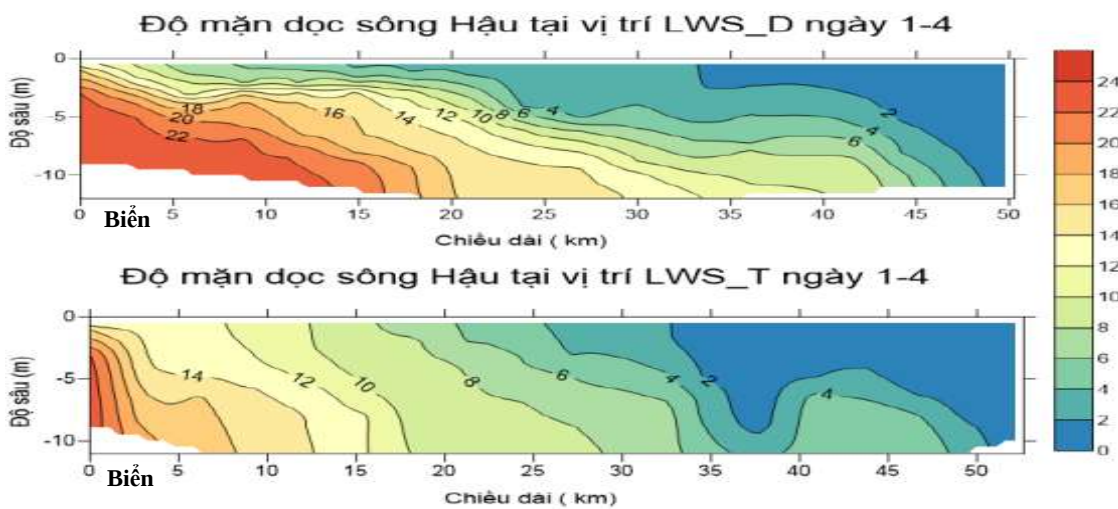
Hình 3-13: Một số kết quả đo mặn theo chiều sâu dọc sông Hậu - Định An



Hình 3-14: Một số kết quả đo mặn theo chiều sâu dọc sông Hậu - Trần Đề



Hình 3-15: Phân bố nồng độ mặn dọc sông Hậu ngày 31/3/2016 - khi triều lên

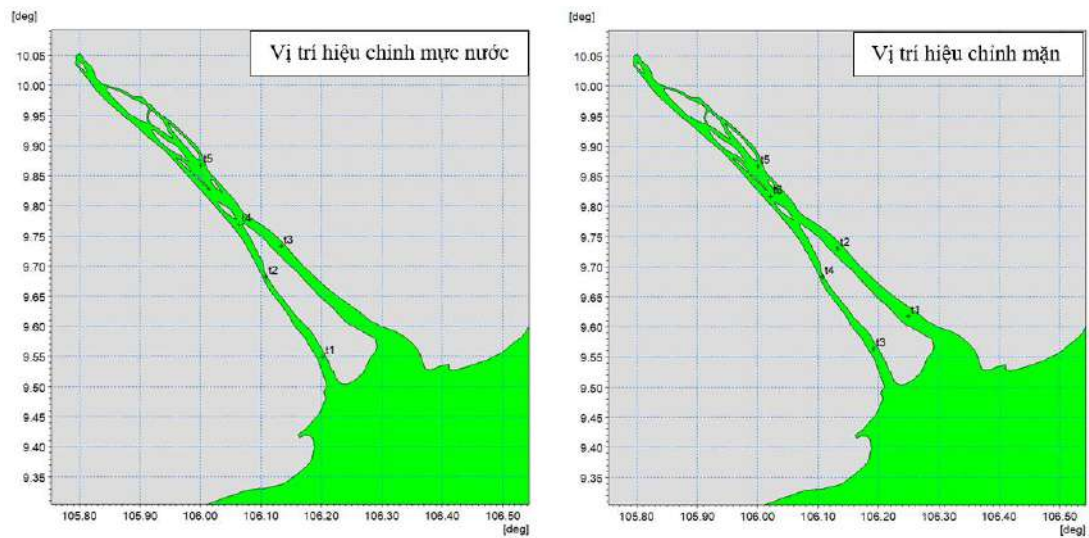


Hình 3-16: Phân bố nồng độ mặn dọc sông Hậu 01/4/2016 - khi triều xuống

3.2.3.2. Kết quả hiệu chỉnh mô hình

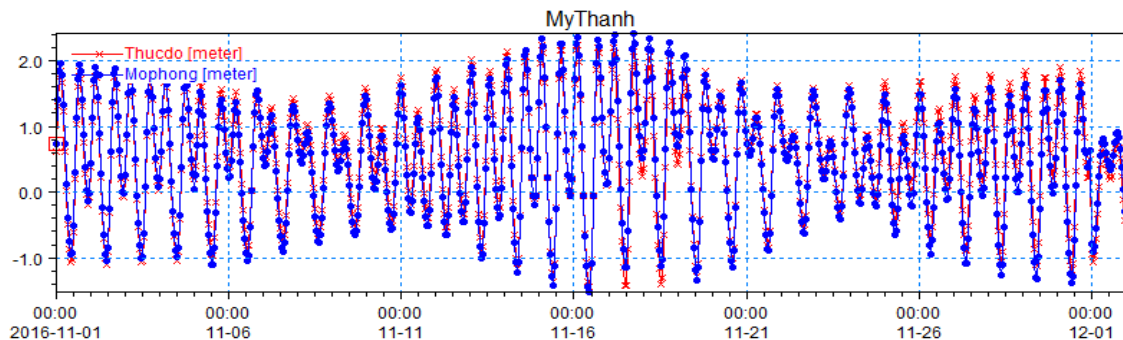
Trên phạm vi nghiên cứu có 2 trạm đo mực nước là trạm thủy văn Đại Ngãi và trạm thủy văn Trần Đề. Đồng thời trong quá trình khảo sát mặn phân tầng năm 2016 có kết hợp đo mực nước tại một số điểm dọc sông và số liệu này sẽ dùng để hiệu chỉnh mô hình.

Hiệu chỉnh mặn sẽ dùng số liệu mặn trung bình theo giờ tại trạm Đại Ngãi và để phù hợp với giá trị trung bình giá trị mặn trích từ mô hình sẽ trích từ lớp số 4 (lớp chiều sâu trung bình). Trong đợt đo mặn năm 2016 đã đo mặn phân tầng dọc theo sông và trong nghiên cứu đã lựa chọn một số trạm để phân tích hiệu chỉnh mô hình.

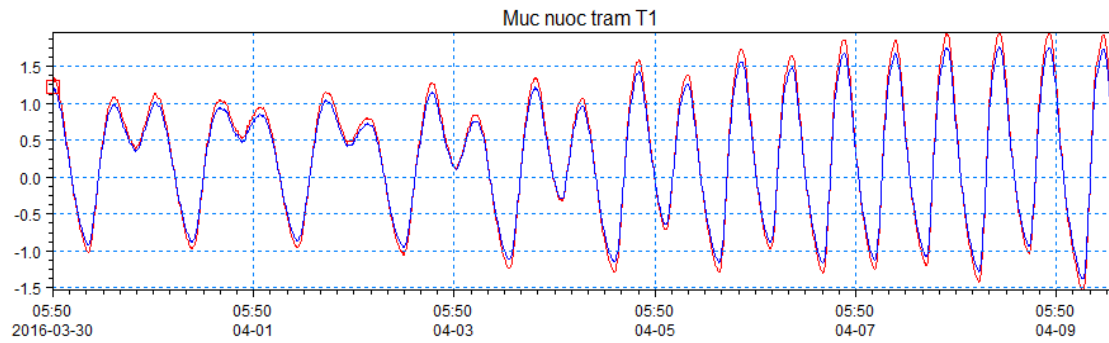


Hình 3-17: Một số vị trí đo mặn dùng để hiệu chỉnh mô hình

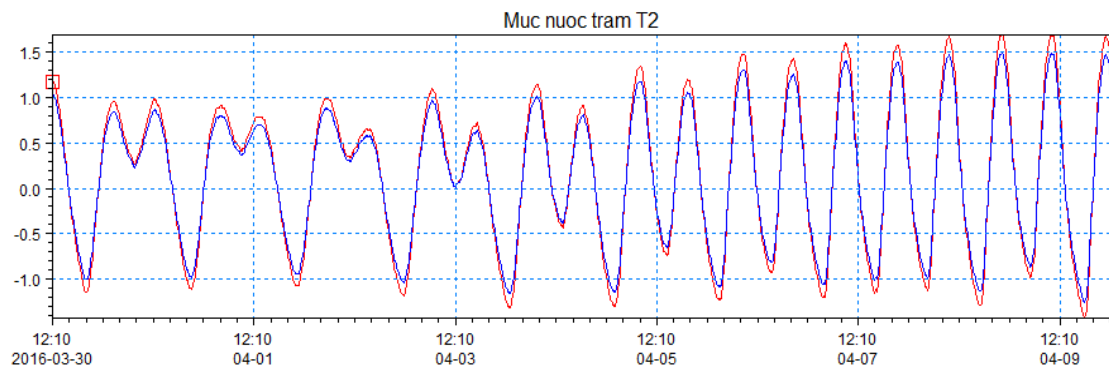
❖ Kết quả hiệu chỉnh thủy lực



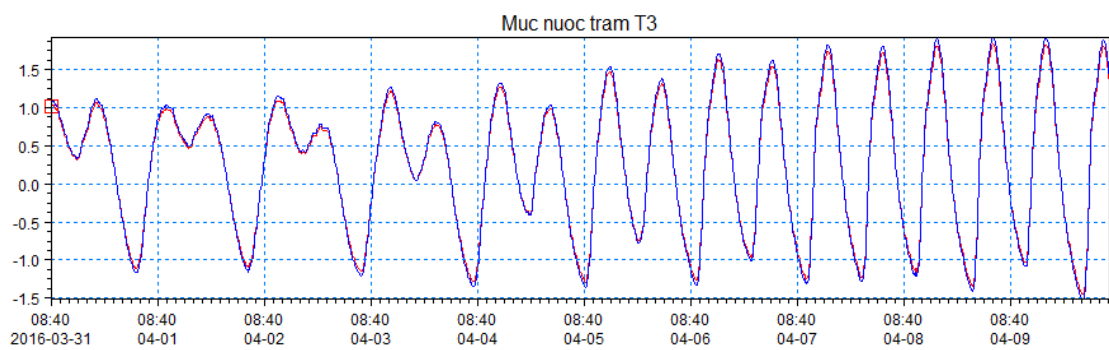
Hình 3-18: Mực nước thực đo mà mô phỏng tại trạm Mỹ Thanh



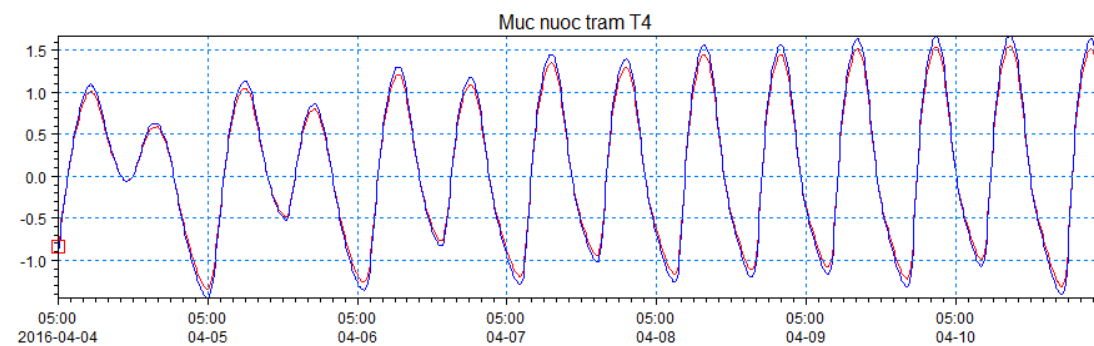
Hình 3-19: Mức nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T1



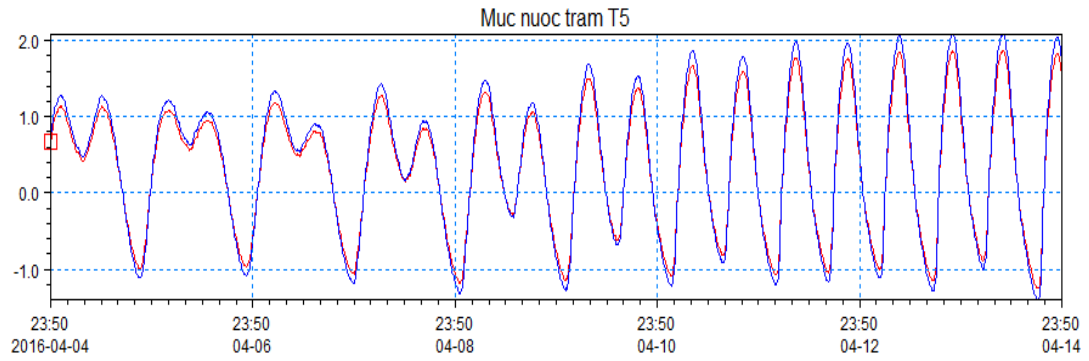
Hình 3-20: Mức nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T2



Hình 3-21: Mức nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T3

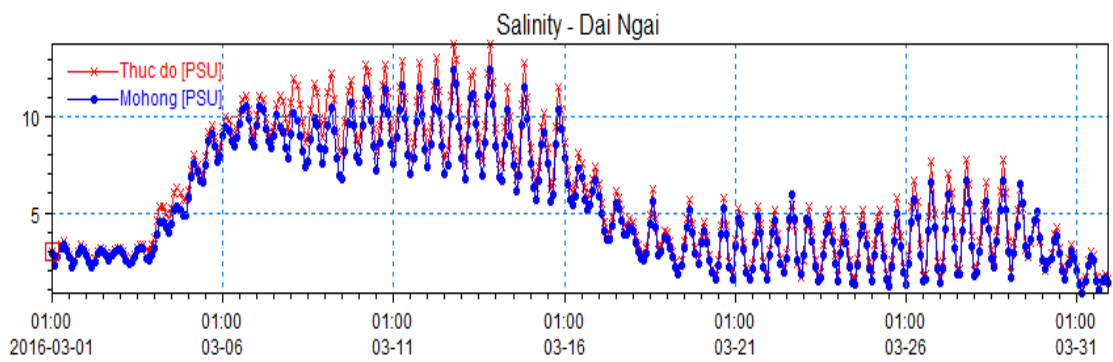


Hình 3-22: Mức nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T4

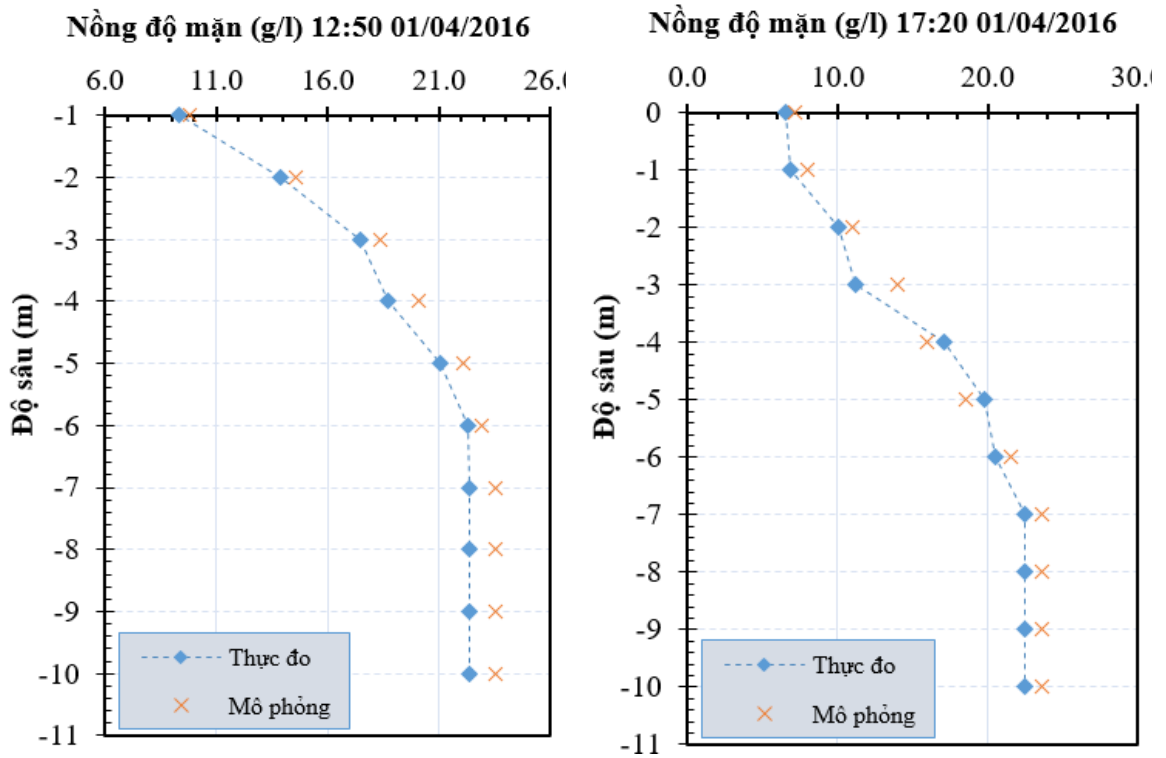


Hình 3-23: Mực nước thực đo mà mô phỏng tại vị trí T5

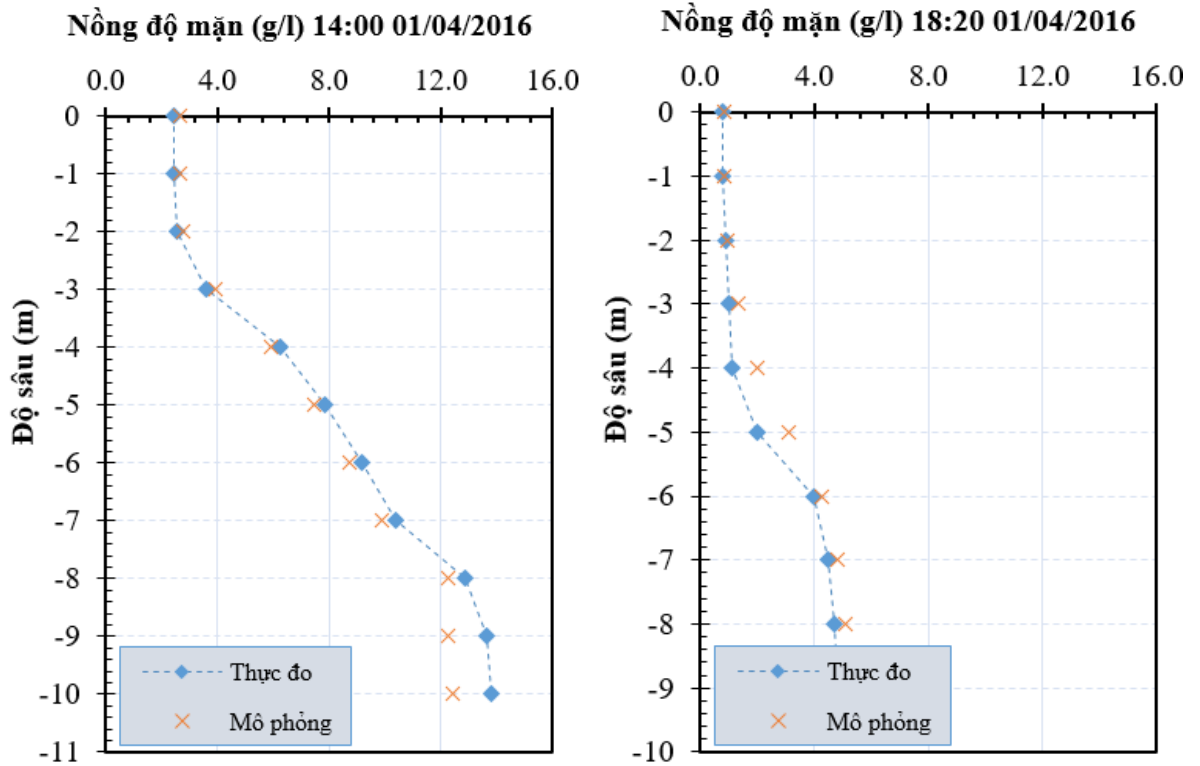
❖ Kết quả hiệu chỉnh mặn



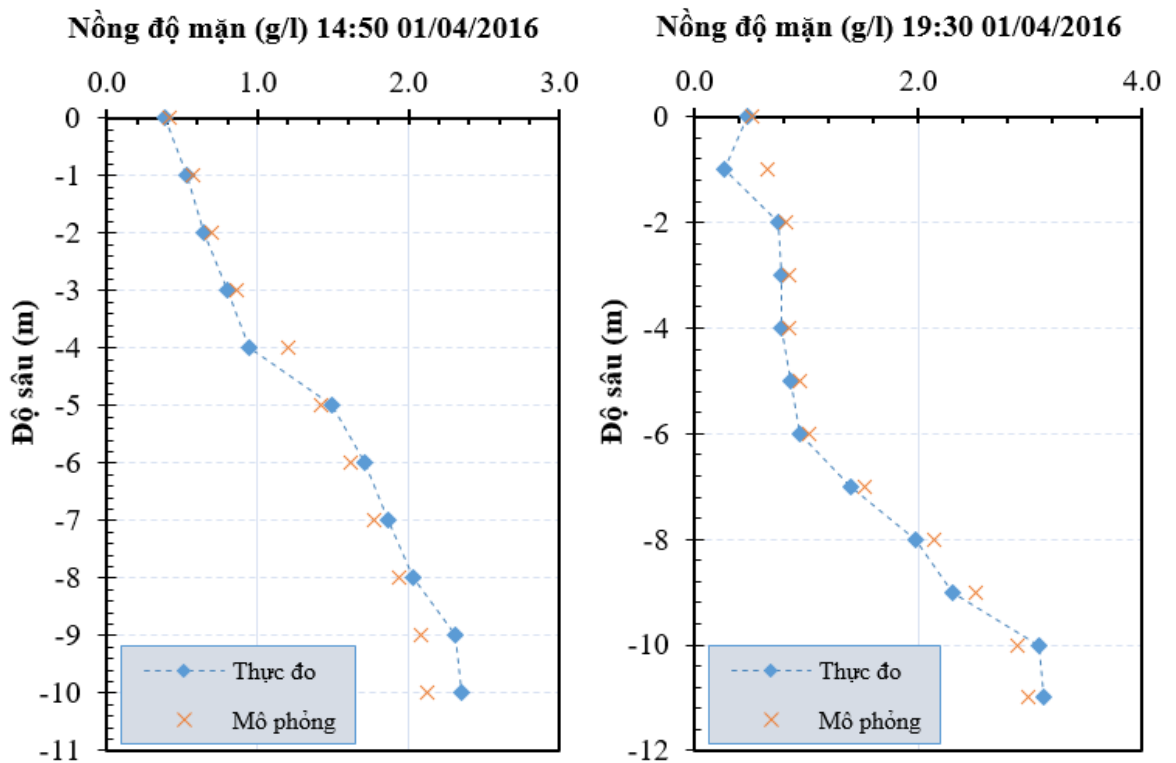
Hình 3-24: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại Đại Ngãi



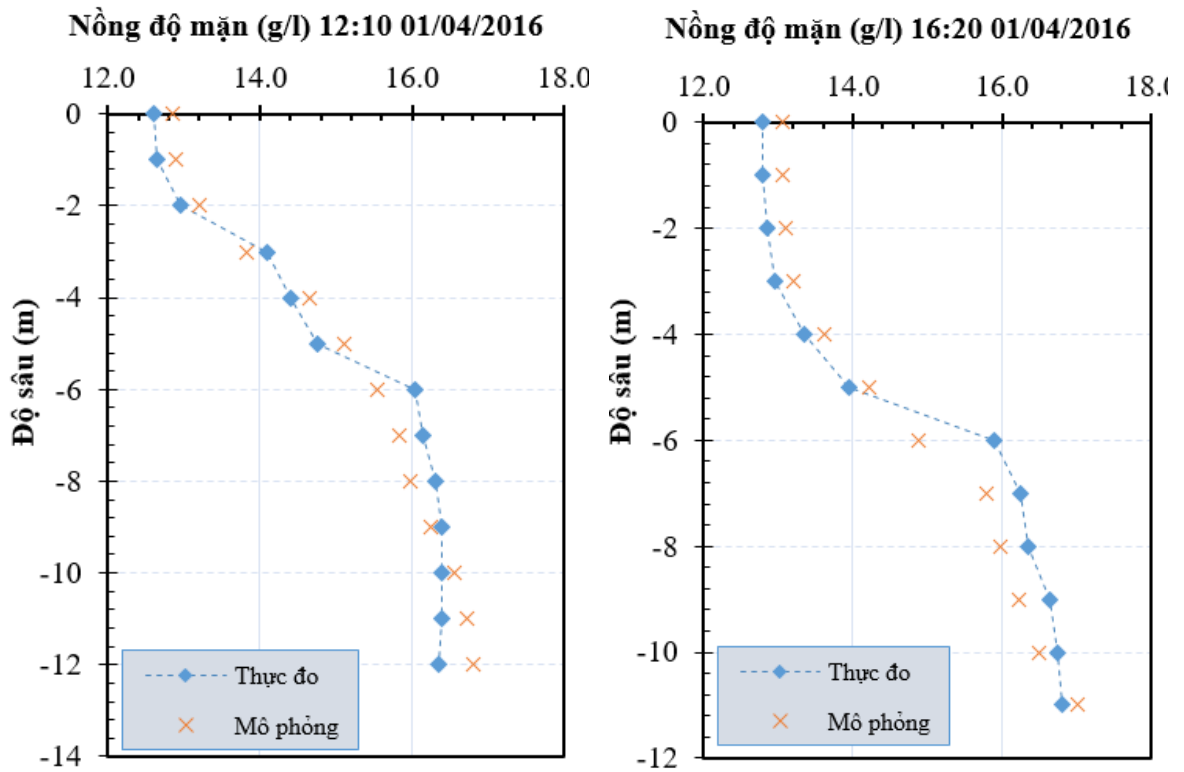
Hình 3-25: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T1



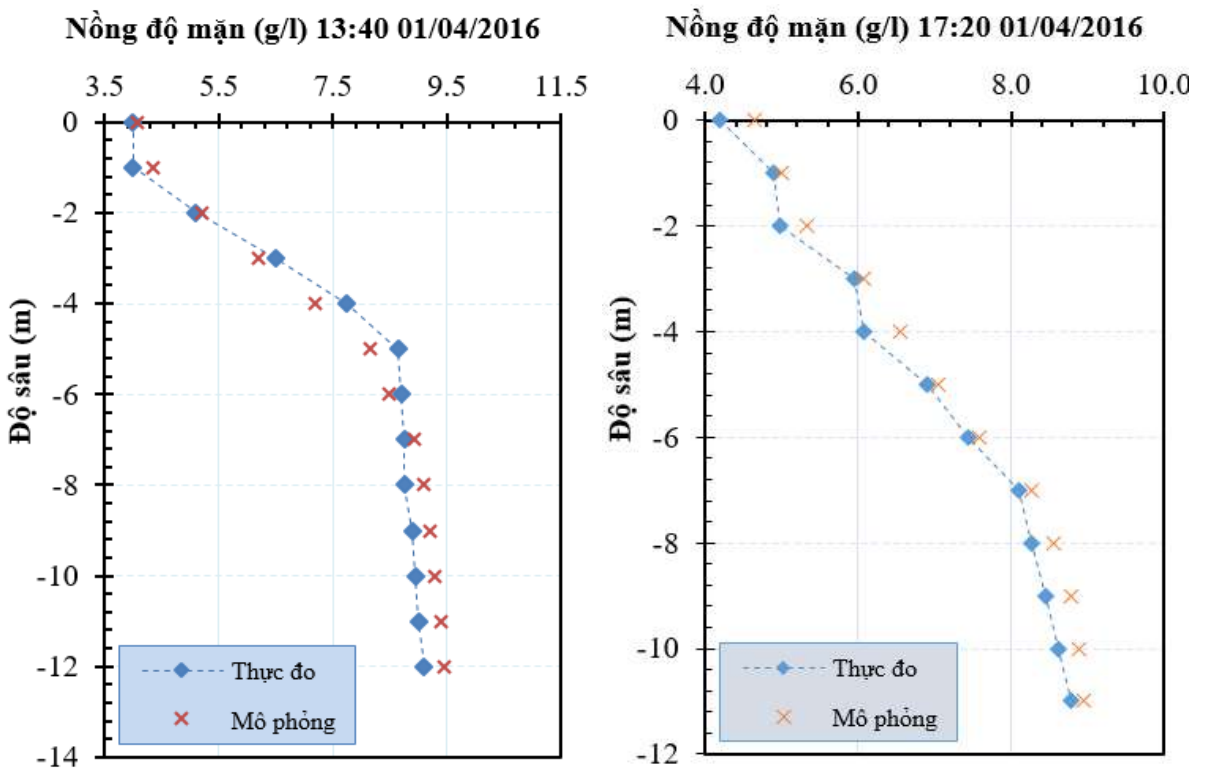
Hình 3-26: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T2



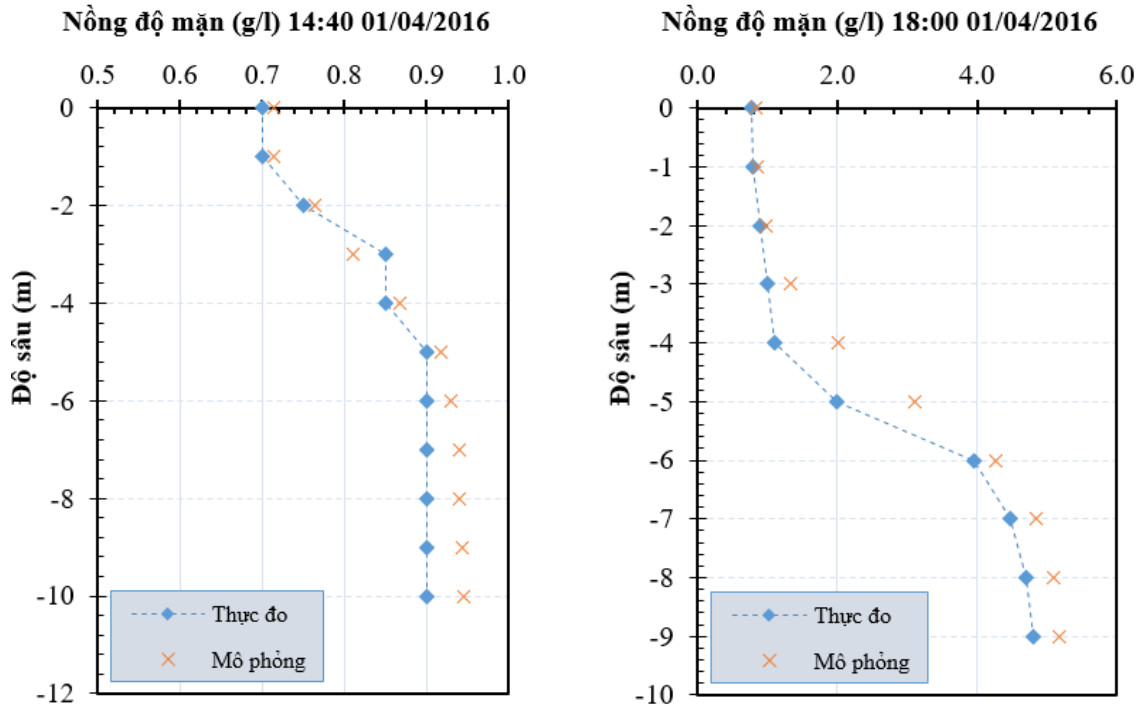
Hình 3-27: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T3



Hình 3-28: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T4



Hình 3-29: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T5



Hình 3-30: Nồng độ mặn thực đo mà mô phỏng tại vị trí T6

Để đánh giá độ chính xác của mô hình cần tiến hành hiệu chỉnh để trên cơ sở đó lựa chọn được bộ thông số mô hình phù hợp và qua đó có thể kiểm tra lại các số liệu đầu vào... 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 bình phương hệ số tương quan) R^2 . Đây thực sự là chỉ tiêu tốt thường dùng để đánh giá sự phù hợp giữa số liệu mô phỏng và thực đo và 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.

Kết quả hiệu chỉnh sẽ có ý nghĩa quyết định cho các bước tính tiếp theo. Kết quả hiệu chỉnh mô hình cho yếu tố mực nước tại các trạm thủy văn trong khu vực khá tốt với hệ số tương quan $R^2 = 0,8 \div 0,95$.

Đồng thời cũng đánh giá sự phù hợp giữa tính toán mô phỏng và thực đo trong nghiên cứu tính toán dùng phương pháp thử sai và dùng hệ số Nash-Sutcliffe (NSE)

để đánh giá. Mức độ phù hợp như sau: Rất tốt $0,75 < NSE \leq 1,0$; Tốt $0,65 < NSE \leq 0,75$; Chấp nhận được $0,5 < NSE \leq 0,65$ và không chấp nhận được $NSE \leq 0,5$.

Kết quả hiệu chỉnh mô hình cho yếu tố mực nước, nồng độ mặn tại các trạm thủy văn quốc gia và các trạm đo tăng cường năm 2016 trong khu vực nghiên cứu khá tốt với hệ số tương quan $NSE = 0,78 \div 0,90$.

Bảng 3-2: Kết quả tính toán tương quan R^2 và NSE trong hiệu chỉnh mô hình

Đại lượng	Trạm	R^2	NSE	Đánh giá
Mực nước	Mỹ Thanh (Trần Đề)	0,97	0,90	Tốt
	T1	0,91	0,87	Tốt
	T2	0,92	0,86	Tốt
	T3	0,91	0,85	Tốt
	T4	0,93	0,88	Tốt
	T5	0,94	0,91	Tốt
Nồng độ mặn	Đại Ngãi	0,84	0,81	Khá tốt
	t1	0,82	0,78	Khá tốt
	t2	0,83	0,77	Khá tốt
	t3	0,85	0,79	Khá tốt
	t4	0,82	0,77	Khá tốt
	t5	0,86	0,83	Khá tốt
	t6	0,81	0,77	Khá tốt

3.3. Kết quả tính toán và thảo luận

3.3.1. Kết quả tính toán và phân tích mặn theo các thời kỳ trong mùa kiệt

3.3.1.1. Thời kỳ phân tích đánh giá

Xâm nhập mặn nói chung và đặc điểm phân tầng mặn nói riêng tại các nhánh sông vùng cửa sông luôn có sự biến động, sự biến động phụ thuộc vào chế độ thủy văn thượng nguồn, sử dụng nước dọc theo sông, tác động của thủy triều ngoài biển theo các thời kỳ và thời điểm khác nhau. Để có một cái nhìn tổng thể về cơ chế phân tầng mặn trong các thời kỳ của mùa kiệt từ đầu đến cuối mùa kiệt trong nghiên cứu này sẽ phân tích so sánh giữa các thời điểm triều của các thời kỳ triều đặc trưng trong mùa kiệt.

Từ kết quả tính toán cho mùa kiệt năm 2015-2016 sẽ trích kết quả tại các thời điểm cho hai thời kỳ triều kém và triều cao trong các tháng 1/2016 - 3/2016 đây là thời kỳ mặn xâm nhập cao để so sánh đánh giá.

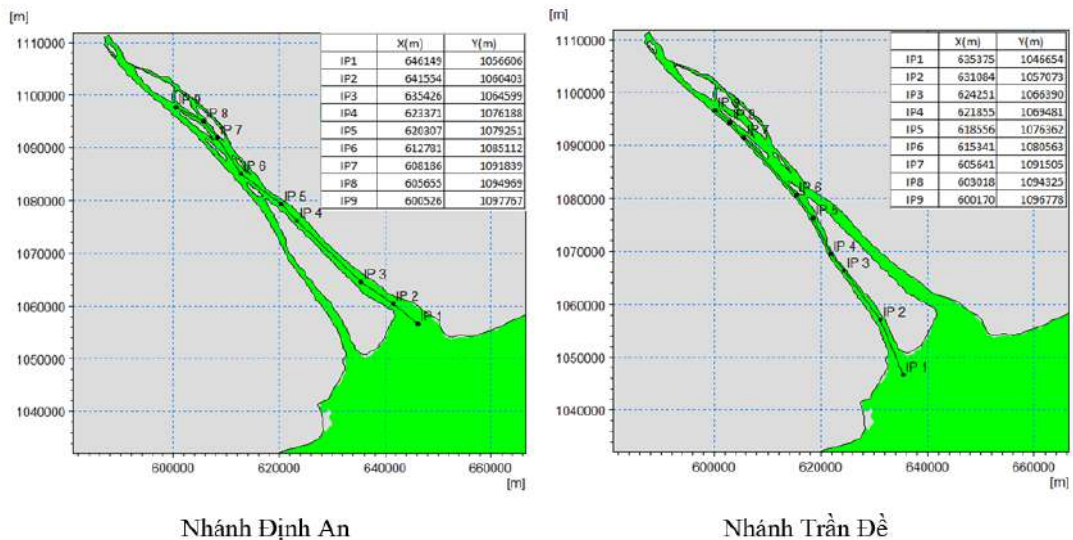
Bảng 3-3: Các thời điểm trích kết quả trong mùa kiệt

Tháng	Thời điểm trích xuất kết quả		Đặc điểm triều
	Triều thấp	Triều cao	
Tháng 1/2016	7h 06/1/2016	11h 24/1/2016	Chân triều thấp
	0h 7/1/2016	3h 25/1/2016	Đỉnh triều
Tháng 2/2016	4h 12/2/2016	11h 9/2/2016	Chân triều thấp
	21h 12/2/2016	3h 10/2/2016	Đỉnh triều
Tháng 3/2016	5h 4/3/2016	12h 10/3/2016	Chân triều thấp
	22h 4/3/2016	4h 11/3/2016	Đỉnh triều

3.3.1.2. Tuyến trích xuất kết quả

Trên nhánh sông Định An và Trần Đề sẽ trích xuất kết quả theo dọc sông từ cửa biển lên thượng nguồn khoảng 55km vượt qua Cù Lao Dung khoảng 25km. Trên sơ đồ tính sẽ trích xuất kết quả theo các điểm có tọa độ theo mặt bằng: nhánh Định An từ P1 đến P8 (P4 tại đầu Cù Lao Dung); nhánh Trần Đề từ P1 đến P9 (P5 tại đầu Cù Lao Dung). Các kết quả dọc theo hai nhánh sông Định An và Trần Đề 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.

Để có cơ sở so sánh đánh giá đặc điểm của nêm mặn, sự biến đổi hình dạng, tốc độ dịch chuyển của nêm mặn trong các thời kỳ triều và các thời điểm triều đặc trưng trong mỗi con triều lấy đường đẳng trị mặn có nồng độ mặn 2,0g/l làm chuẩn.

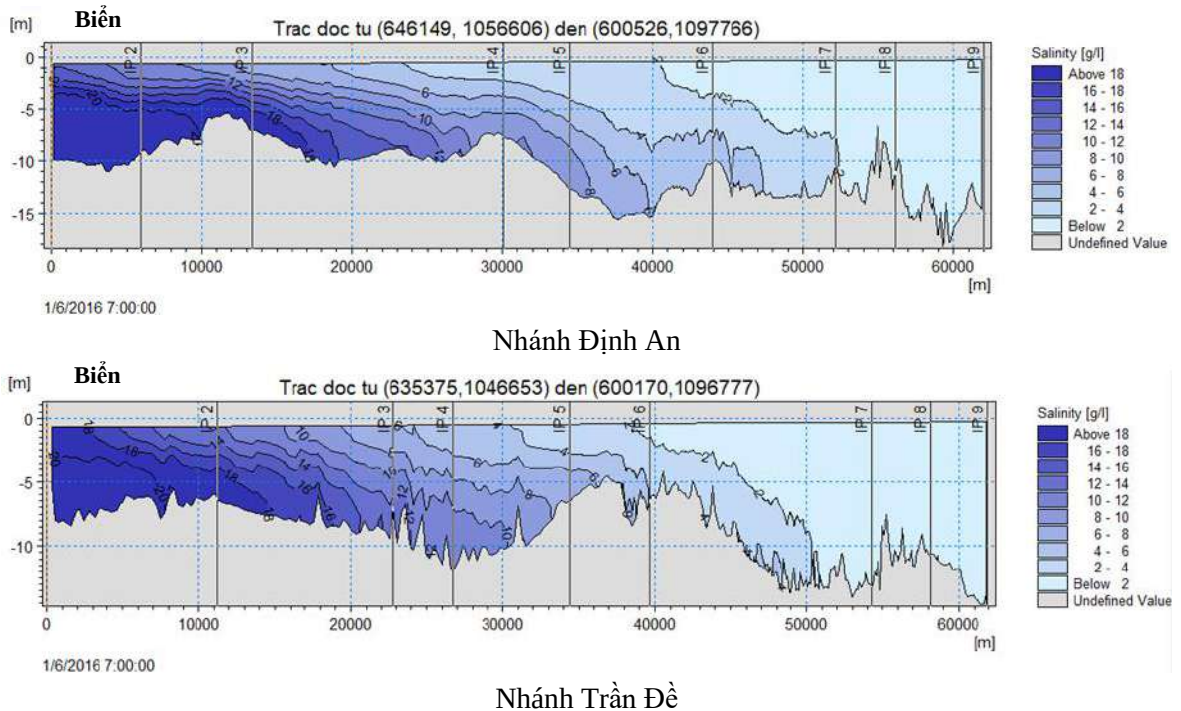


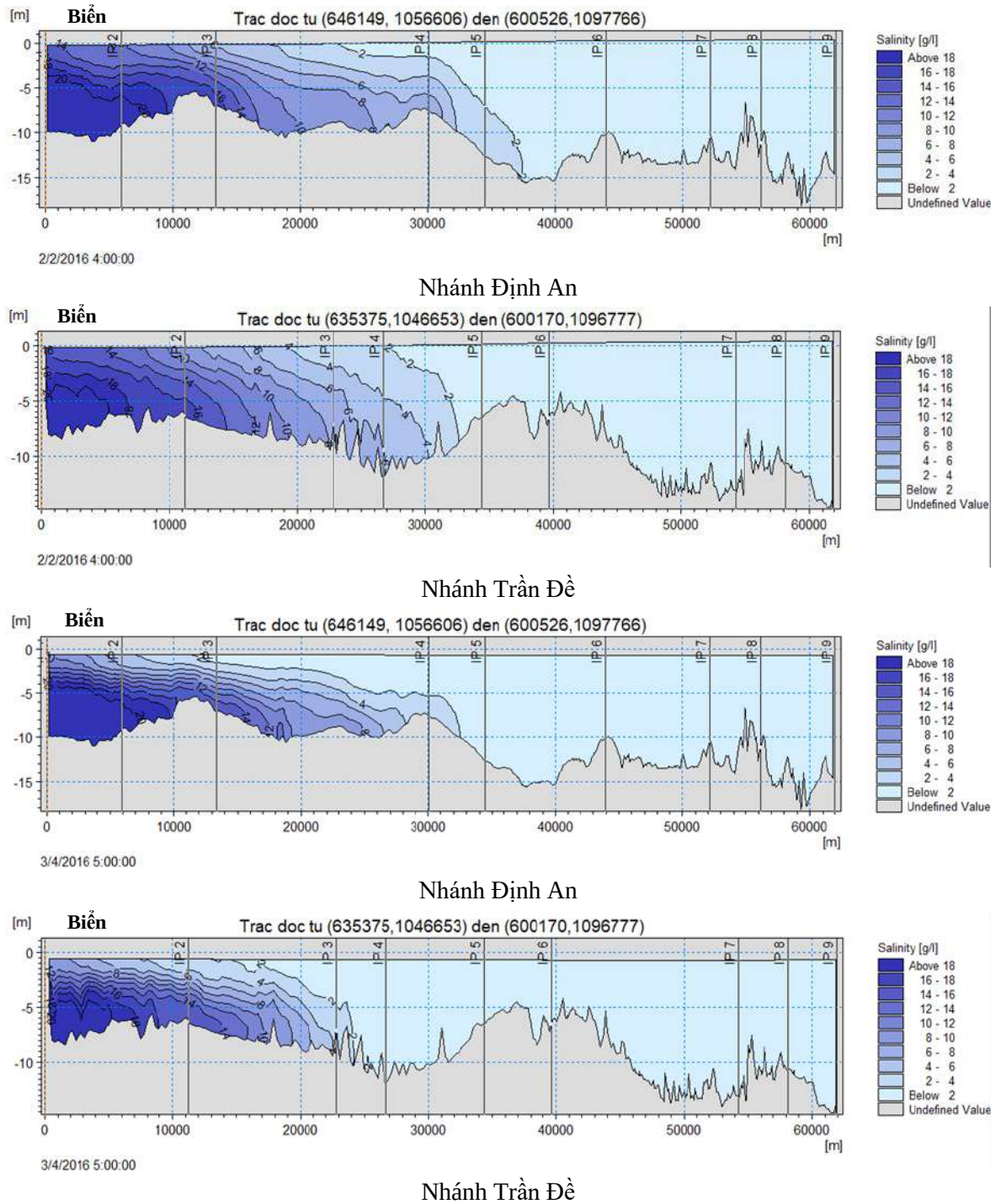
Hình 3-31: Sơ họa tuyến trích kết quả dọc nhánh Định An, Trần Đề

3.3.1.3. Thời kỳ triều thấp

Trong thời điểm chân triều thấp của thời kỳ triều thấp đường đẳng trị mặn của nêm mặn có xu thế khá thoải, nhánh Định An thoải hơn nhánh Trần Đề. Tầng đáy nêm mặn trên nhánh Định An có xu thế xâm nhập sâu hơn vào trong sông so với nhánh Trần Đề nhưng tầng mặt thì ngược lại, điều này phản ánh đúng thực tế là nhánh sông Định An có lượng dòng chảy lớn hơn nhánh Trần Đề. Mặc dù thời điểm chân triều thấp trong các tháng mùa kiệt mực nước chênh nhau không đáng kể nhưng xâm nhập mặn trong các tháng khác nhau khá lớn điều này chứng tỏ dòng chảy thượng lưu có tác động khá lớn đến chiều dài nêm mặn.

Vào thời điểm chân triều thấp thời kỳ triều thấp trong tháng 1 đường đẳng trị mặn 4g/l tại tầng đáy cả hai nhánh Định An và Trần Đề đều vượt qua mũi Cù Lao Dung. Nhánh Định An chiều dài nêm mặn vượt qua đầu mũi Cù Lao Dung khoảng 9,0km và nhánh Trần Đề là khoảng 3,0km. Sang tháng 2 và tháng 3 thời kỳ chân triều nêm mặn rút ra phía biển cách mũi Cù Lao Dung tại nhánh Định An lần lượt là 2,0km và 6,0km; nhánh Trần Đề là 6,0 và 11,0km. Tầng mặt vào thời điểm chân triều thấp trong thời kỳ đỉnh triều thấp nồng độ mặn 4g/l đều không vượt qua mũi Cù Lao Dung.

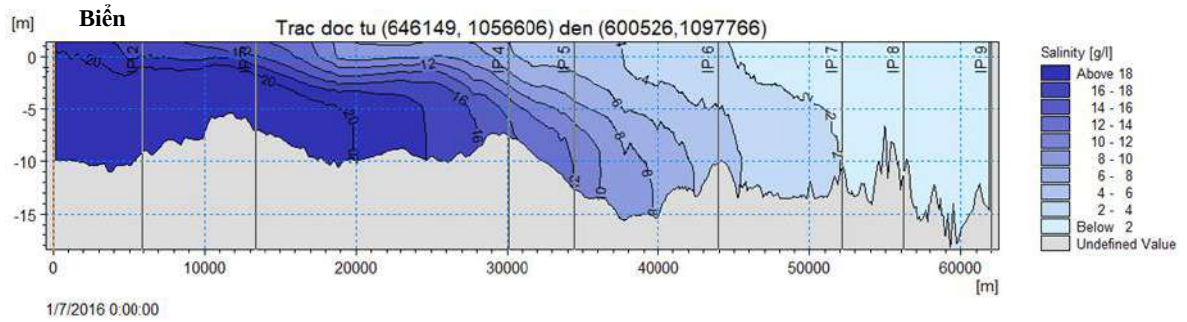




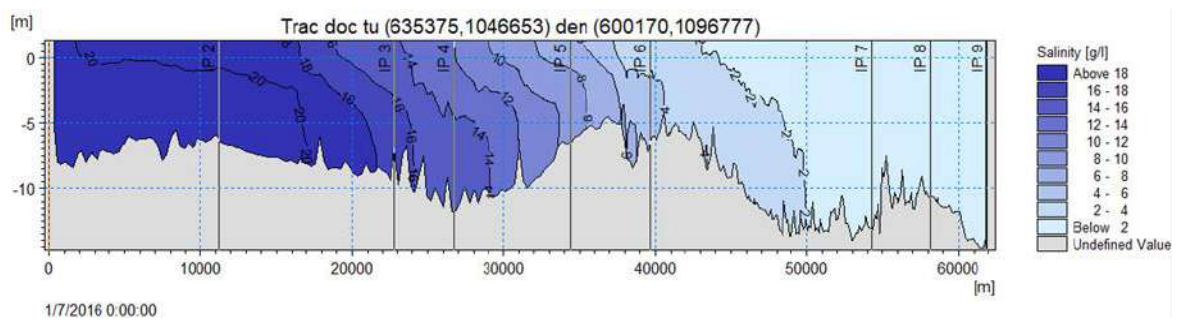
Hình 3-32: Phân bố mặn dọc sông thời điểm chân triều (kỳ triều thấp)

Nêm mặn trong thời điểm đỉnh triều có hình dáng dày hơn, đường đẳng trị mặn dốc hơn trong thời điểm chân triều. Trong thời điểm đỉnh triều thời kỳ triều thấp mặn tầng đáy (nồng độ 4g/l) của nhánh Định An đều vượt qua đầu mũi Cù Lao Dung, tháng 1 vượt qua khoảng 8,0km, tháng 2 và tháng 3 khoảng 2,0-4,0km; nhánh Trần Đề chỉ có tháng 1 là vượt qua mũi Cù Lao Dung khoảng 2,0km còn các tháng còn lại

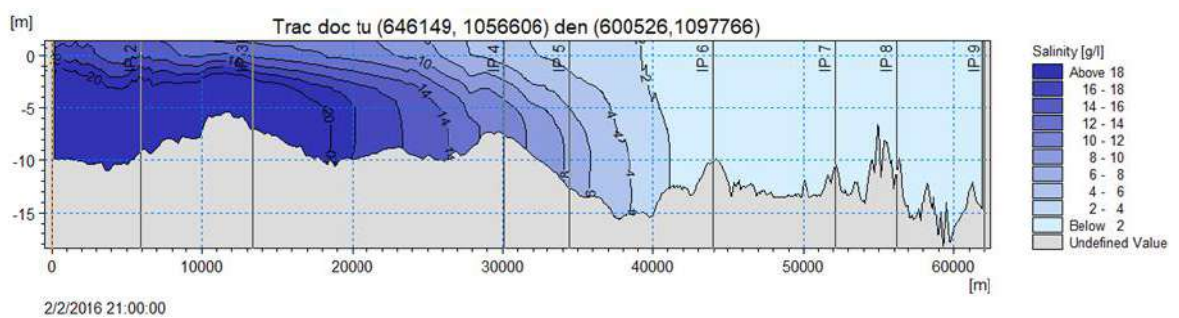
không vượt qua. Tầng mặt của cả hai nhánh sông nồng độ 4g/l đều không vượt qua đầu mũi Cù Lao Dung.



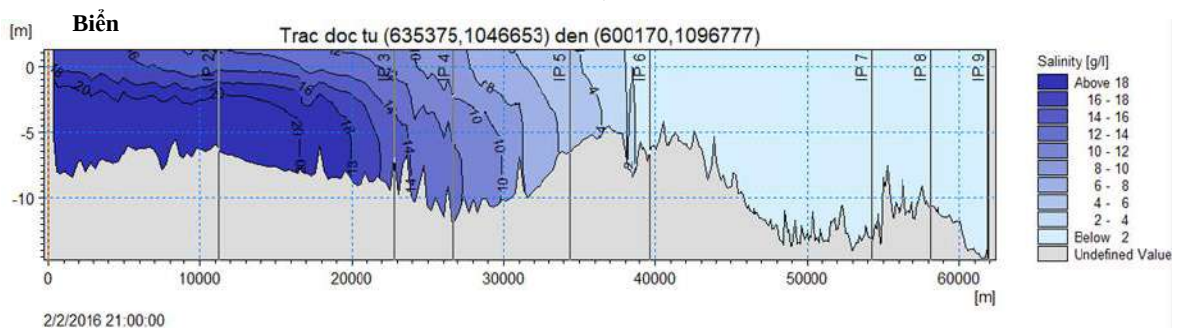
Nhánh Định An



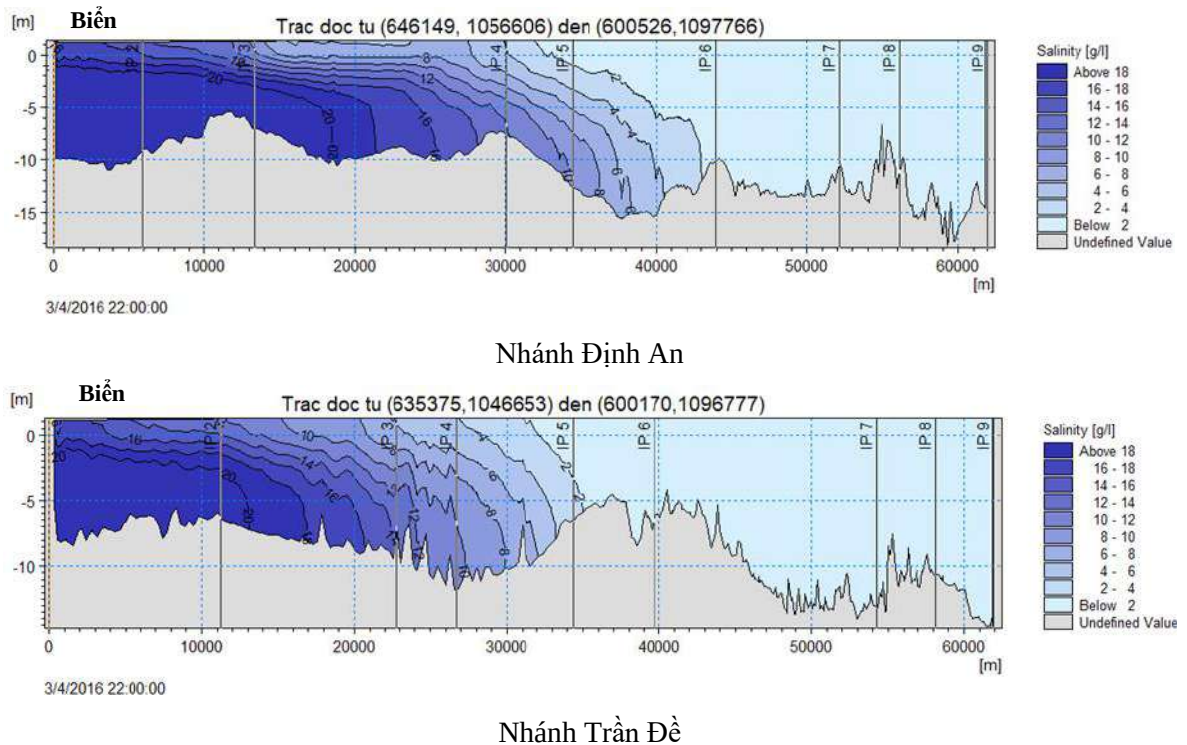
Nhánh Trần Đề



Nhánh Định An



Nhánh Trần Đề



Hình 3-33: Phân bố mặn dọc sông thời điểm đỉnh triều (kỳ triều thấp)

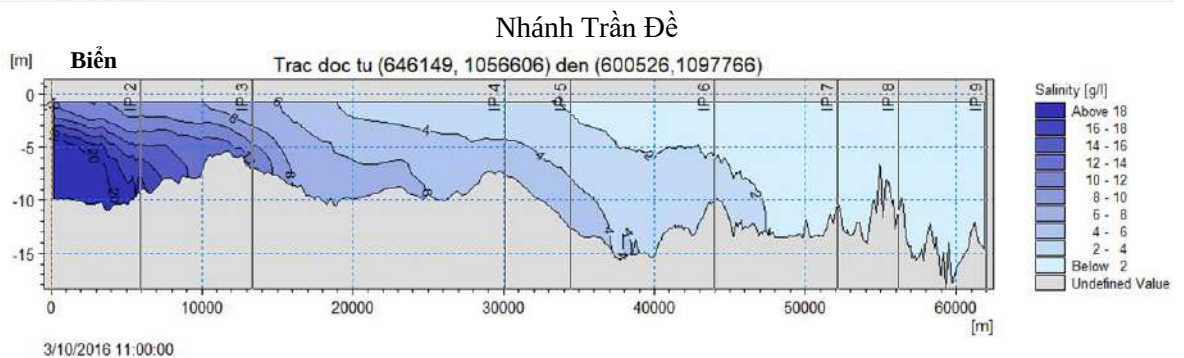
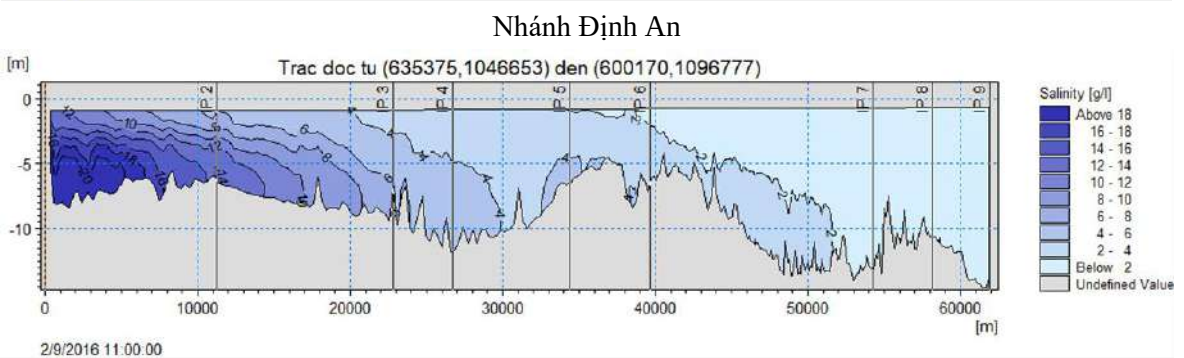
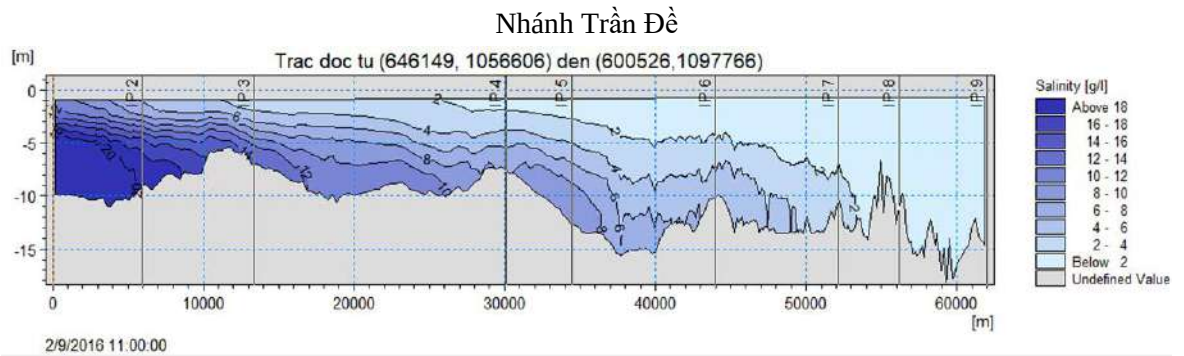
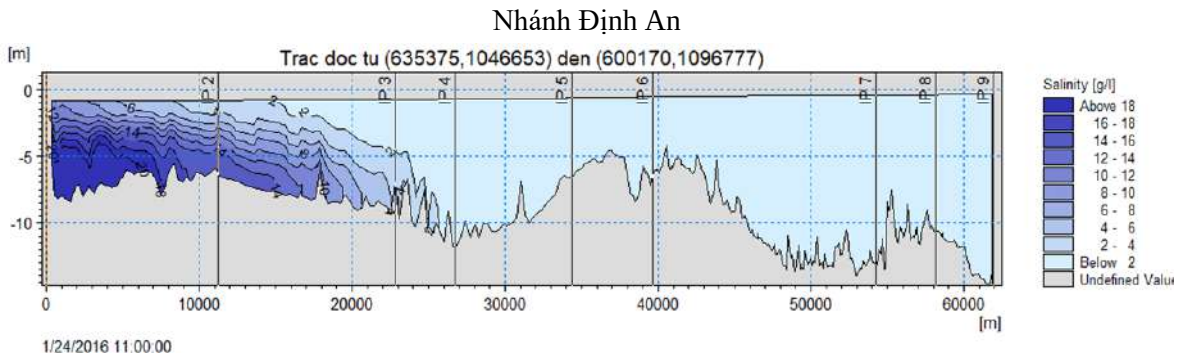
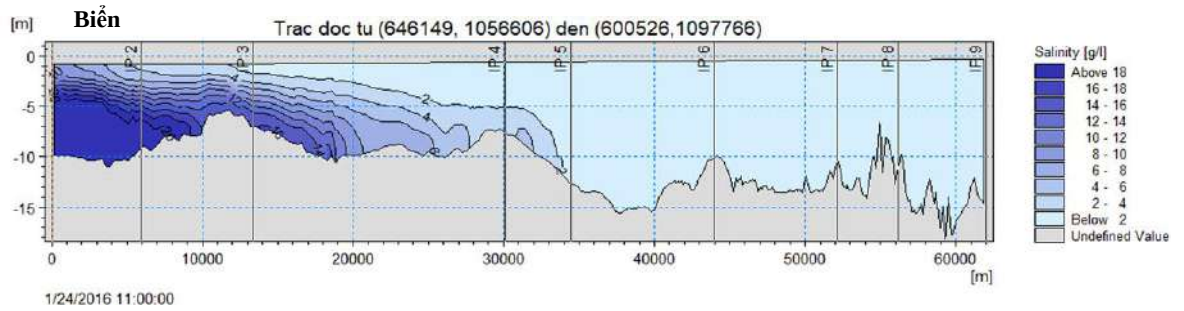
3.3.1.4. Thời kỳ triều cao

Vào thời điểm chân triều thấp mực nước chân triều xuống khoảng từ -1.4m đến -1,7m nên khi triều xuống dòng chảy sông khá mạnh nên nêm mặn cũng bị đẩy dịch ra phía biển.

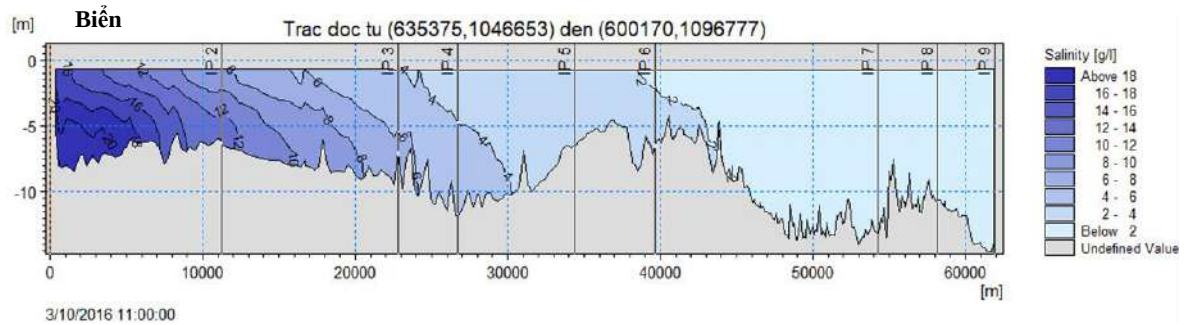
Thời điểm chân triều triều thấp của thời kỳ triều cao tháng 1 trên cả hai nhánh sông đường đẳng trị mặn 4g/l đều nằm phía dưới Cù Lao Dung, nhánh Định An cách mũi Cù lao Dung khoảng 5,0km và nhánh Trần Đề là khoảng 12,0km.

Thời điểm chân triều triều thấp của thời kỳ triều cao tháng 2 tại nhánh Định An mặn 4g/l tầng đáy vượt qua mũi Cù Lao Dung khoảng 12,0km nhưng tầng mặt lại cách mũi Cù lao Dung khá xa về phía biển. Nhánh Trần Đề tầng đáy cũng gần sát mũi Cù Lao Dung nhưng tầng mặt chưa tới.

Thời điểm chân triều triều thấp của thời kỳ triều cao tháng 3 tại nhánh Định An mặn 4g/l tầng đáy tại ngay mũi Cù Lao Dung nhưng tầng mặt lại cách mũi Cù lao Dung khá xa về phía biển. Nhánh Trần Đề cả tầng đáy và tầng mặt đều chưa vượt qua mũi Cù Lao Dung tầng đáy cách khoảng 7,0km, tầng mặt cách khoảng 12,0km.



Nhánh Định An

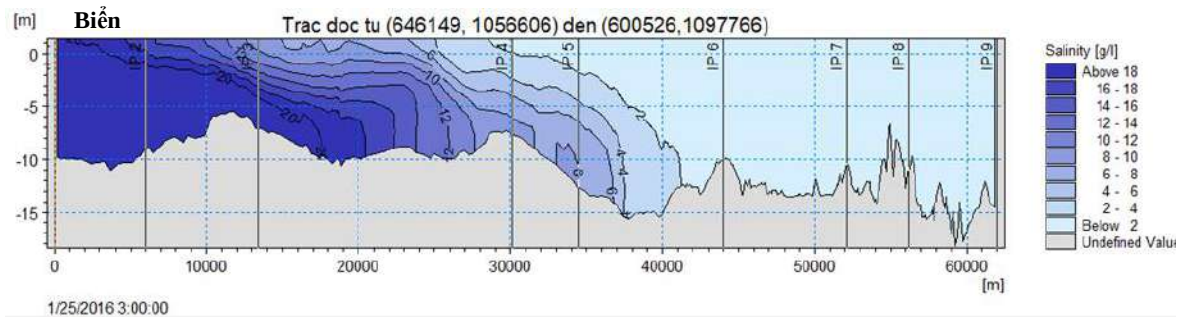


Nhánh Trần Đề

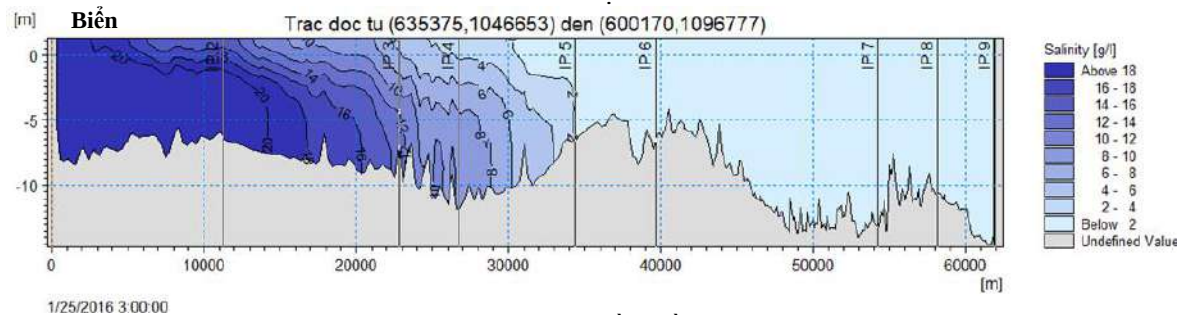
Hình 3-34: Phân bố mặn dọc sông thời điểm chân triều (kỳ triều cao)

Vào thời điểm đỉnh triều trong thời kỳ triều cao nồng độ mặn 4g/l tăng dần trên nhánh Định An đều lên tới đầu mũi Cù Lao Dung và vào tháng 2 vượt qua mũi khoảng 10,0km. Vào thời điểm đỉnh triều nồng độ mặn 4g/l trên nhánh Trần Đề ít thay đổi và đều chưa vượt qua mũi Cù Lao Dung.

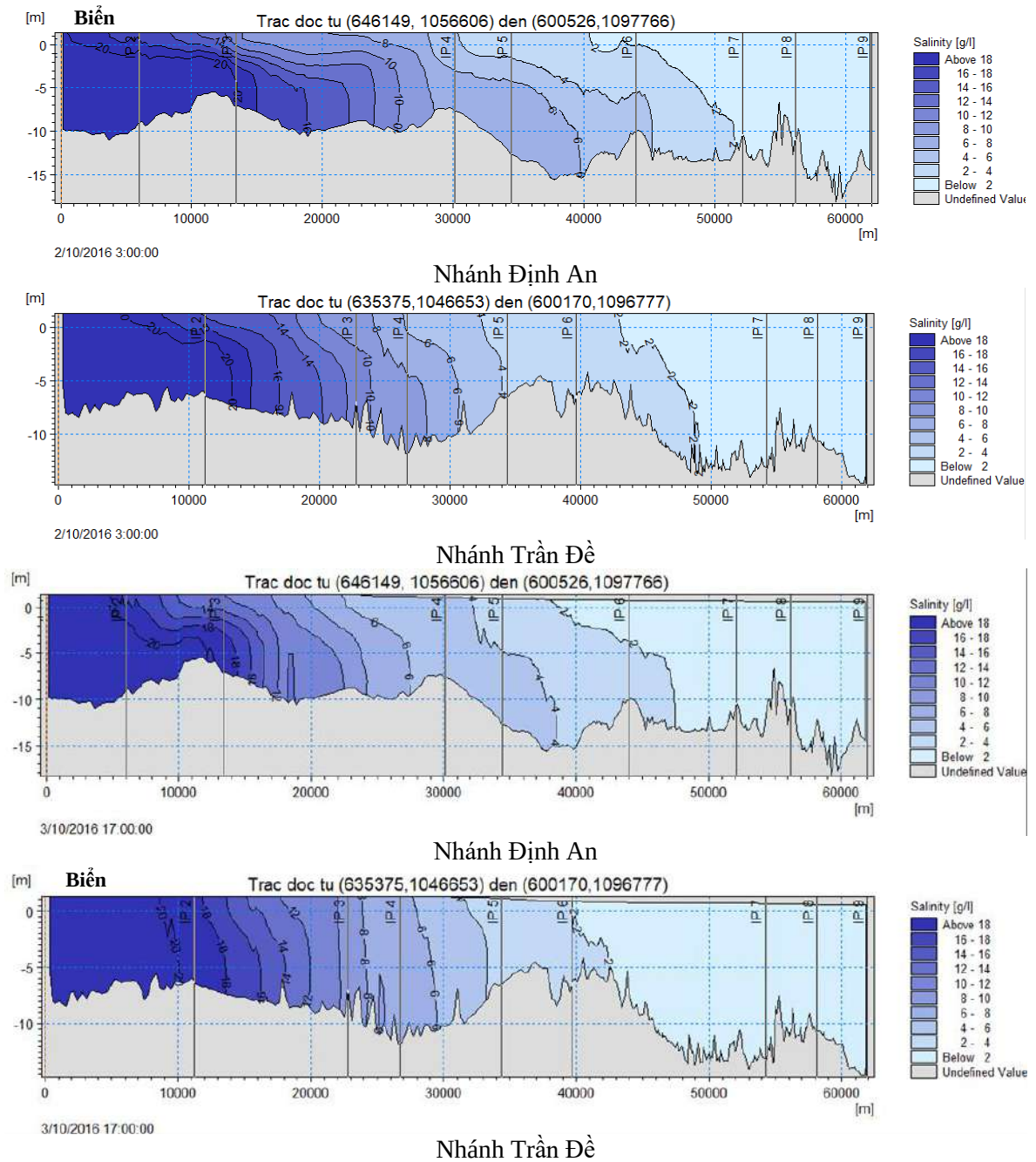
Tương tự như thời kỳ triều thấp, hình dáng nêm mặn cũng có sự khác nhau khá rõ giữa thời điểm đỉnh triều và thời điểm chân triều. Thời điểm chân triều nêm mặn mỏng, đường đẳng trị mặn thoải hơn so với thời điểm đỉnh triều và trên hai nhánh sông cũng có sự khác biệt đáng kể nêm mặn nhánh Định An chiều dày mỏng hơn nhánh Trần Đề.



Nhánh Định An



Nhánh Trần Đề



Hình 3-35: Phân bố mặn dọc sông thời điểm đỉnh triều (kỳ triều cao)

3.3.2. Kết quả tính toán và phân tích mặn dọc theo hai nhánh sông

3.3.2.1. Thời điểm phân tích kết quả

Để thể hiện được đặc tính xâm nhập mặn vùng cửa sông ven biển trong kết quả tính toán sẽ phân tích theo 3 chiều phân tầng theo chiều sâu dọc sông, phân tầng theo chiều sâu ngang sông và phân tầng trên mặt bằng theo các lớp độ sâu tính toán khác nhau từ tầng trên mặt xuống tầng đáy. Các kết quả phân tích này đã cơ bản thể hiện đầy đủ đặc tính của cơ chế phân tầng mặn. Đồng thời cũng phân tích theo từng thời

đoạn theo chu kỳ triều, theo thời điểm trong ngày cho các con triều đặc trưng của vùng nghiên cứu.

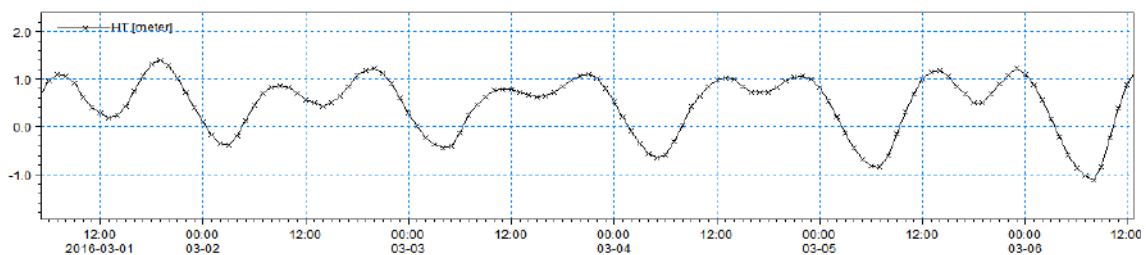
Trong nghiên cứu đã tính toán đánh giá cho các thời đoạn của năm thủy văn (mùa kiệt và mùa lũ) trong điều kiện hiện tại và có xét đến nước biển dâng. Theo đặc tính thủy triều vùng nghiên cứu là bán nhật triều không đều, xâm nhập mặn và phân tầng mặn sẽ phụ thuộc vào sự lên xuống của thủy triều do đó sẽ phân tích chi tiết các kết quả tính cho các thời kỳ triều kém, thời kỳ triều lớn, con triều cao và con triều nhỏ.

Chọn các thời điểm đặc trưng của thủy triều để phân tích, thời đoạn trích xuất kết quả sẽ được chọn là các thời đoạn, thời điểm thủy triều đặc trưng cho vùng. Thời kỳ triều kém từ ngày 2-5/3, thời kỳ trung bình từ ngày 7-9/3 và thời kỳ triều cao từ 11-13/3.

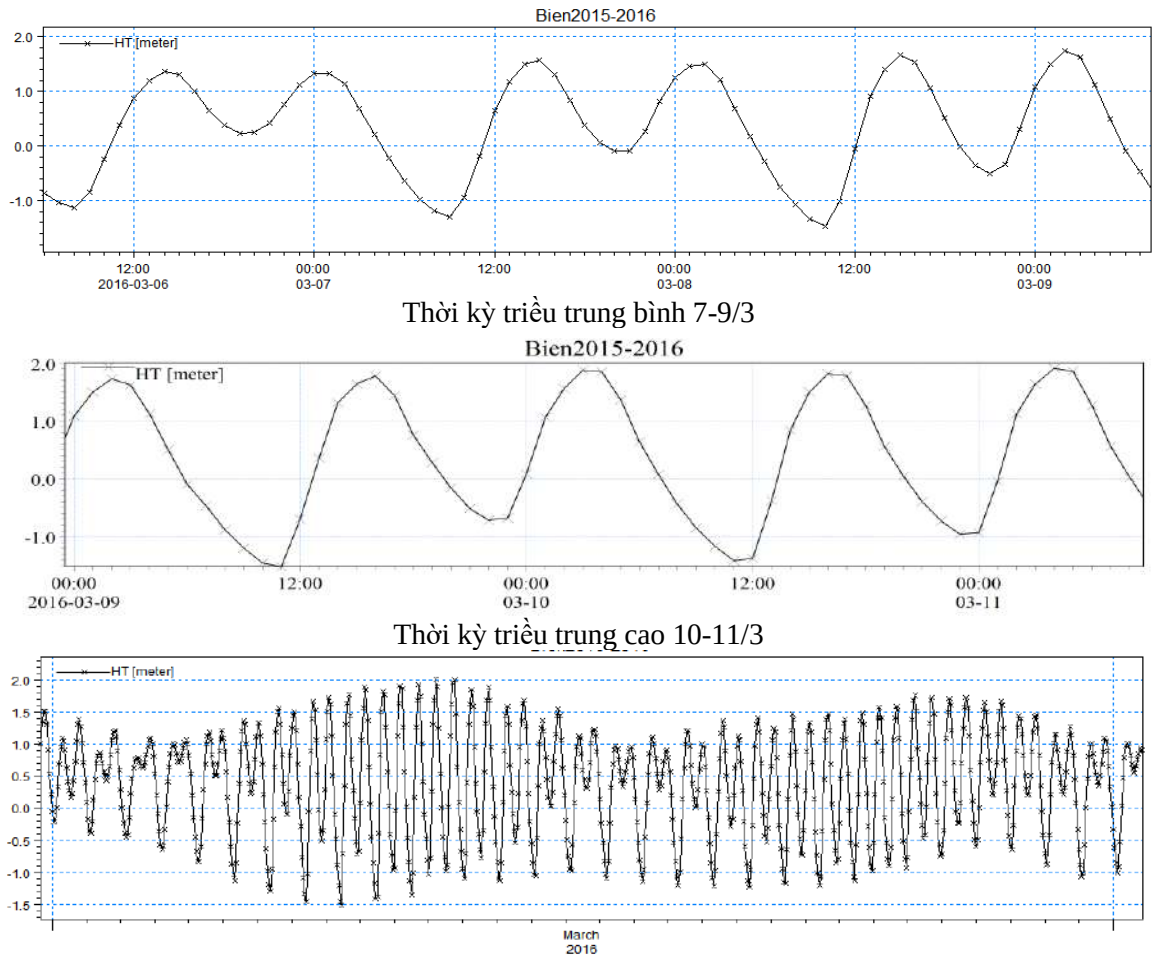
Trích xuất các kết quả tính cho một con triều trong các thời kỳ triều kém, trung bình và cao. Các thời điểm trích xuất sẽ lựa chọn vào thời điểm đặc trưng của một con triều trong 24h gồm có: chân triều thấp, triều lên, đỉnh triều, triều xuống, chân triều thấp, triều lên, đỉnh triều, triều xuống và chân triều.

Bảng 3-4: Các thời điểm trích kết quả trong mùa kiệt

STT	Thời điểm trích xuất kết quả			Đặc điểm triều
	Triều thấp	Triều trung bình	Triều cao	
1	5h 4/3/2016	9h 7/3/2016	12h 10/3/2016	Chân triều thấp
2	13h 4/3/2016	15h 7/3/2016	17h 10/3/2016	Đỉnh triều
3	17h 4/3/2016	20h 7/3/2016	0h 10/3/2016	Chân triều cao
4	22h 4/3/2016	02h 8/3/2016	4h 11/3/2016	Đỉnh triều
5	06h 5/3/2016	10h 5/3/2016	12h 11/3/2016	Chân triều thấp



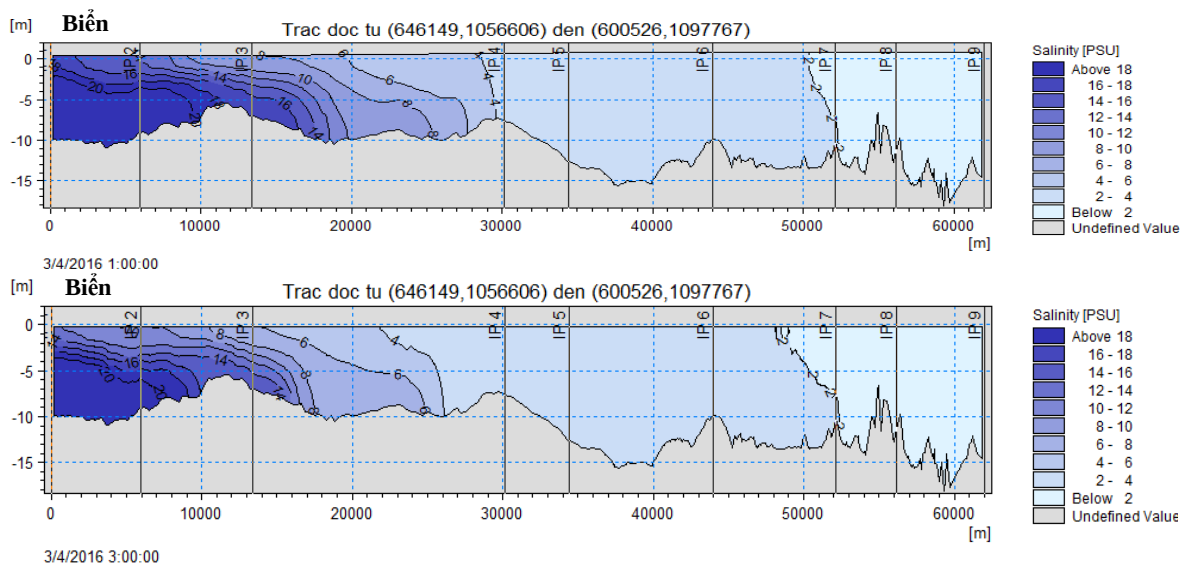
Thời kỳ triều kém từ ngày 2-5/3

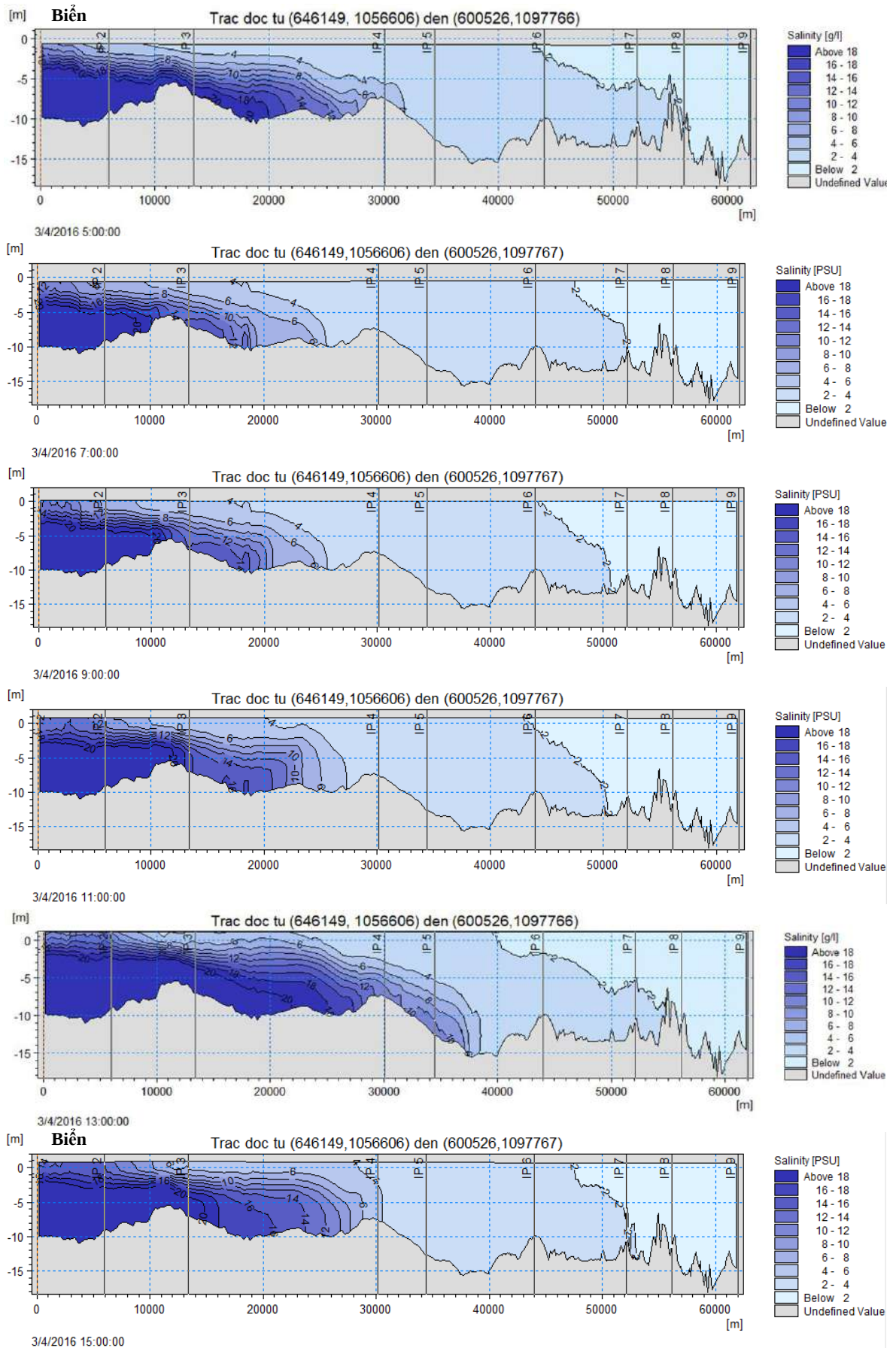


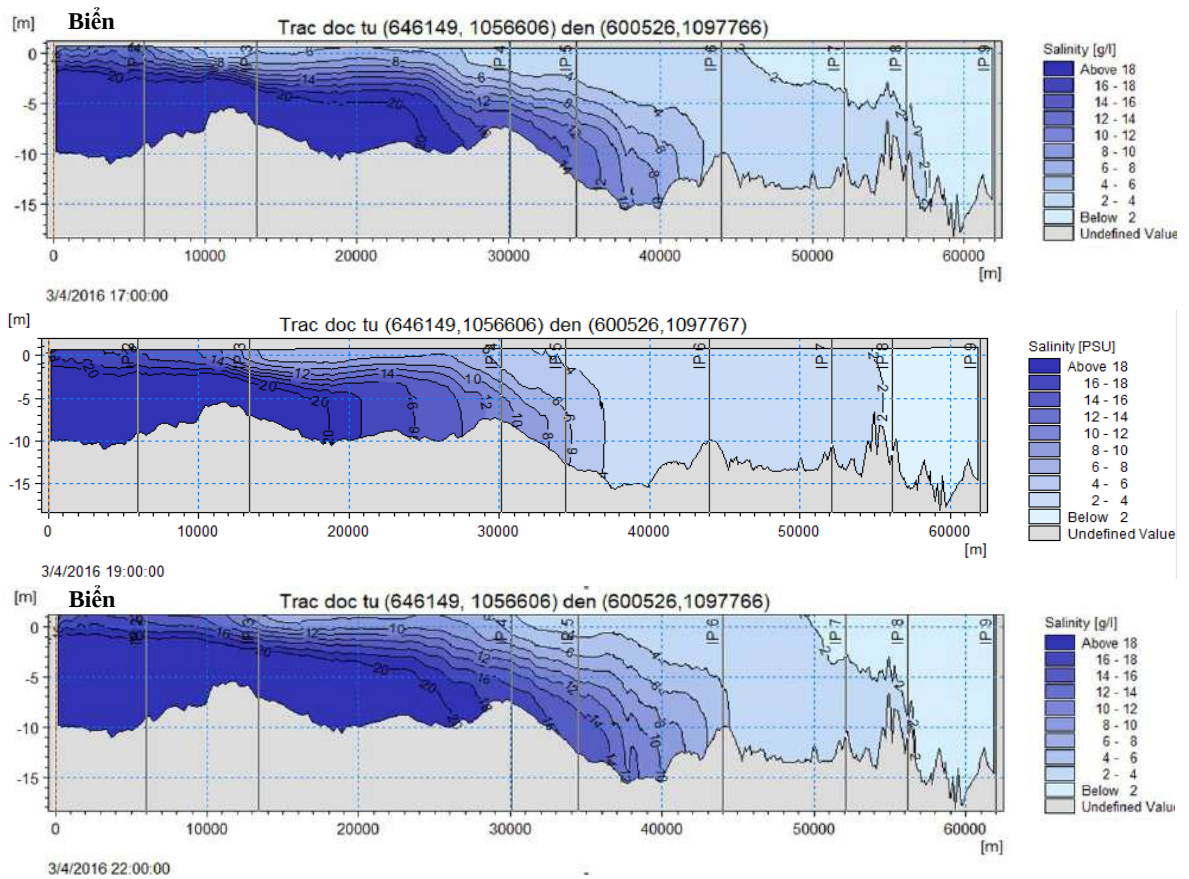
Hình 3-36: Thủy triều trong tháng 3/2016 tại vùng cửa sông Hậu

3.3.2.2. Đánh giá diễn biến xâm nhập mặn trong một con triều

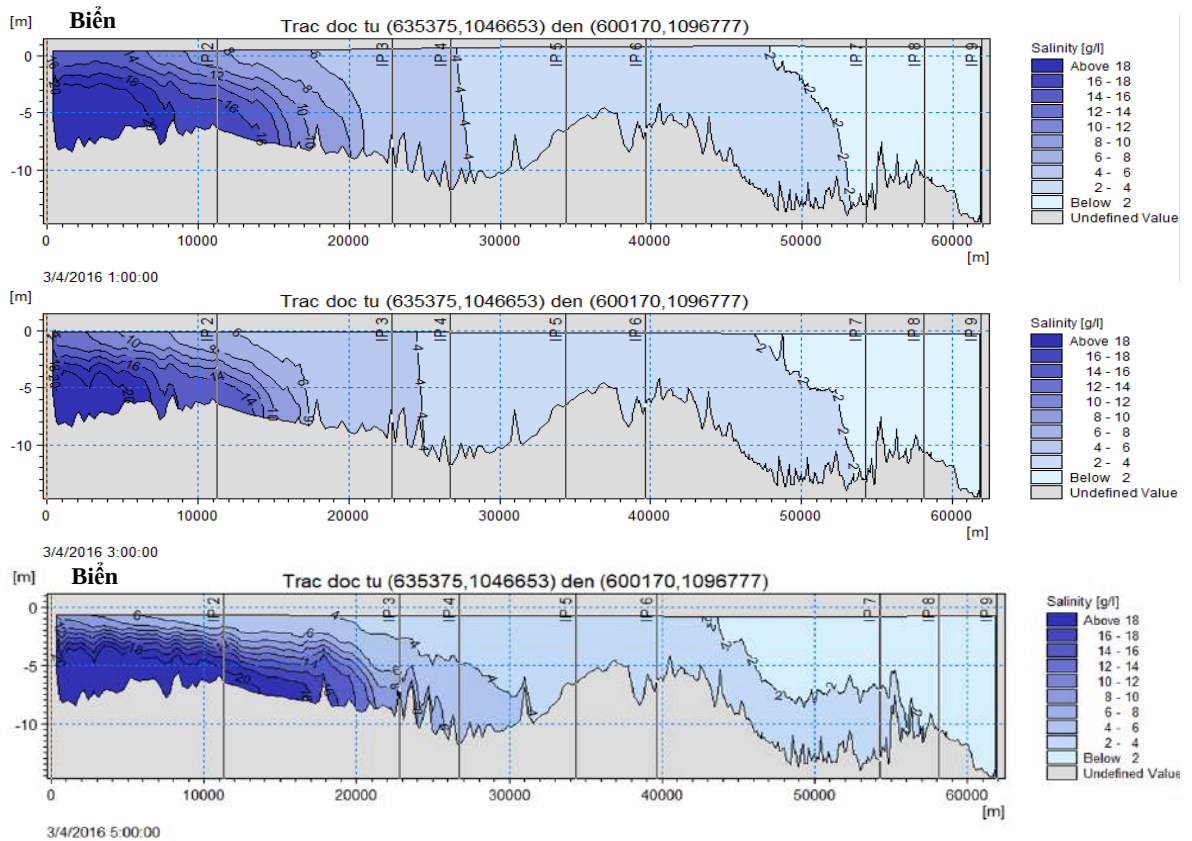
Để đánh giá xu thế chung về cơ chế xâm nhập mặn trong phân tích này sẽ trích xuất kết quả trong 1 con triều điển hình để phân tích.

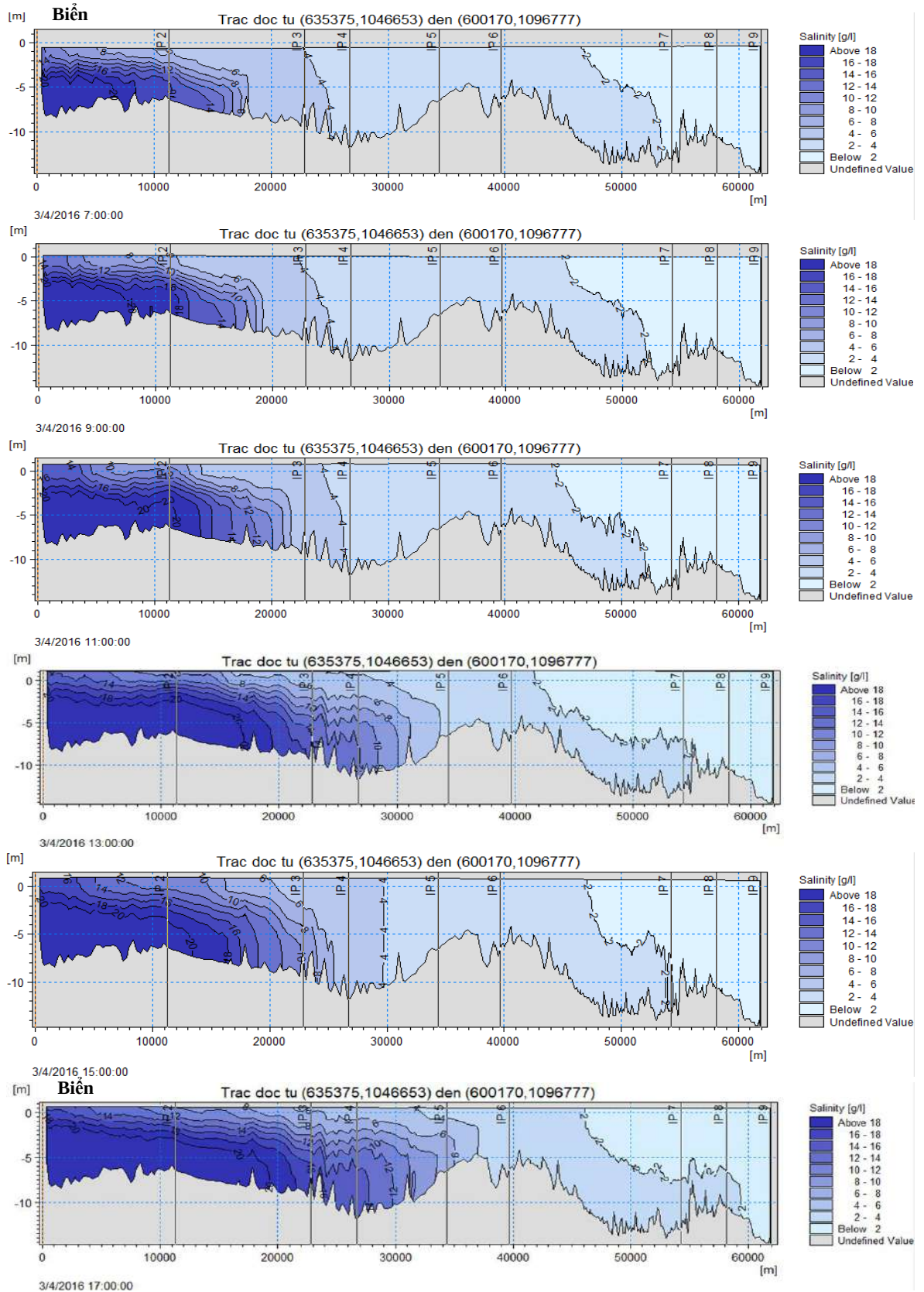


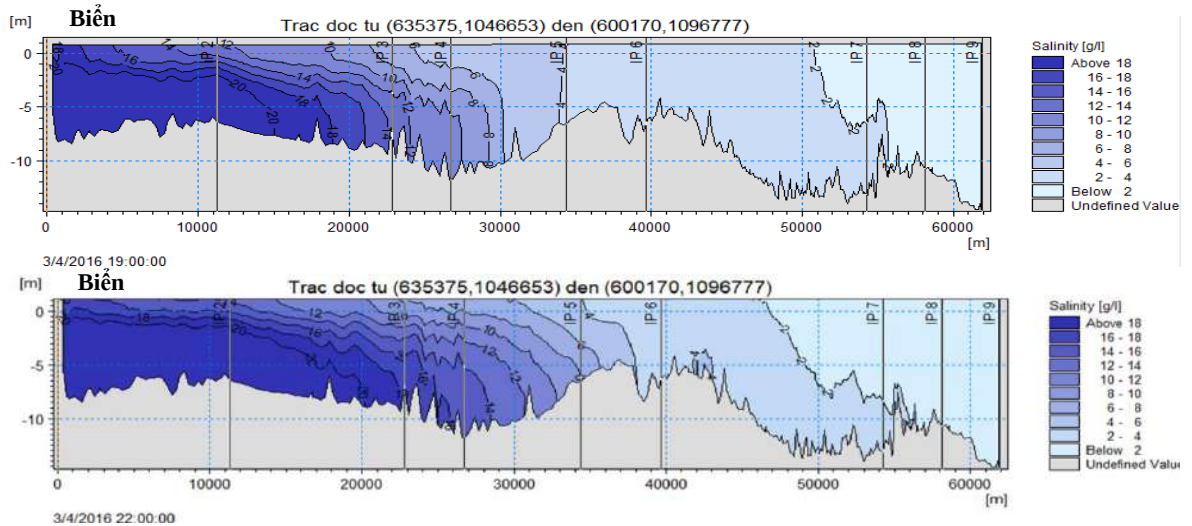




Hình 3- 37: Kết quả xâm nhập mặn trong ngày 4/3/2016- Nhánh Định An





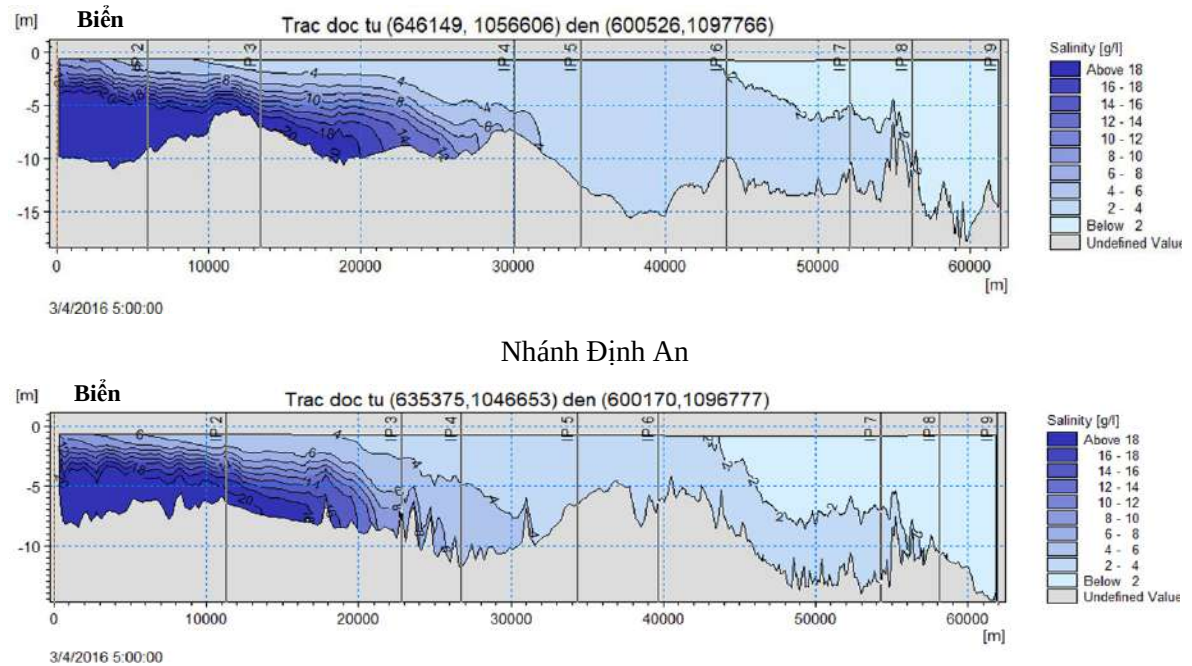


Hình 3-38: Kết quả xâm nhập mặn trong ngày 4/3/2016- Nhánh Trần Đề

Kết quả tính toán cho thấy sự phân tầng rõ nét trên hai nhánh sông là tại các thời điểm nước ngưng khi đỉnh hoặc chân triều hoặc khi đổi chiều dòng chảy (5h, 13h, 17h và 22h). Từ kết quả này cho thấy bản chất phân tầng mặn trên hai nhánh sông Hậu là: *sự phân tầng không xảy ra đồng thời tại cửa sông và không xảy ra theo mọi thời điểm.*

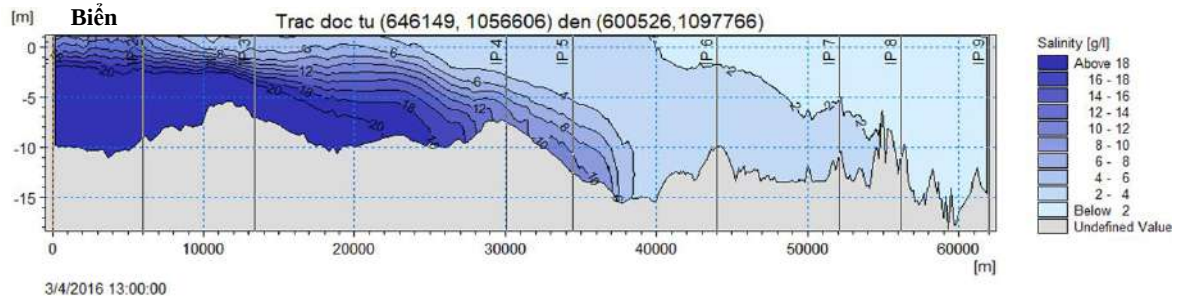
3.3.2.3. Thời kỳ thủy triều kém từ ngày 2-5/3

Trích xuất các kết quả tính cho một con triều trong thời kỳ triều thấp đỉnh triều lúc này chỉ khoảng +1,0m.

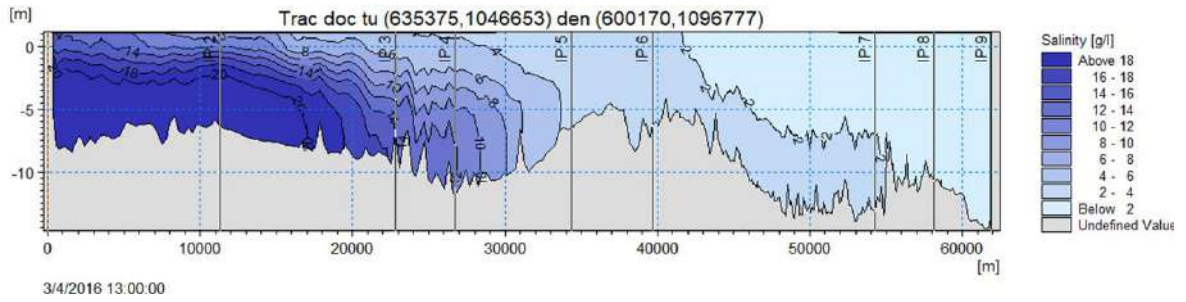


Nhánh Trần Đề

Hình 3-39: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 05h, 4/3/2016 (chân triều thấp)

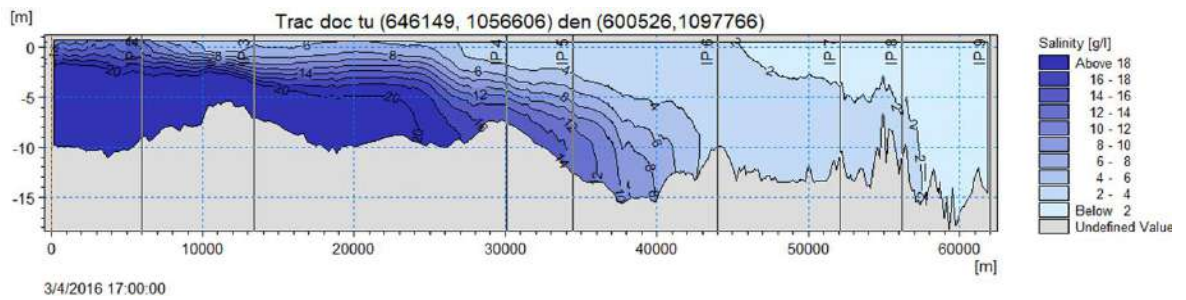


Nhánh Định An

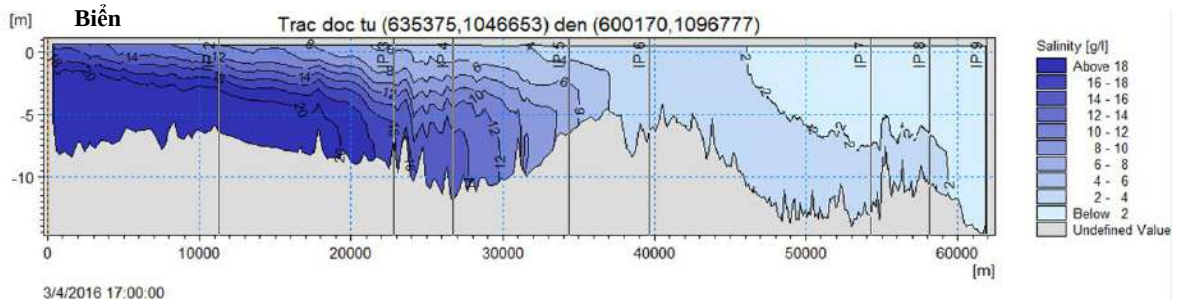


Nhánh Trần Đề

Hình 3-40: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 13h, 4/3/2016 (đỉnh triều)

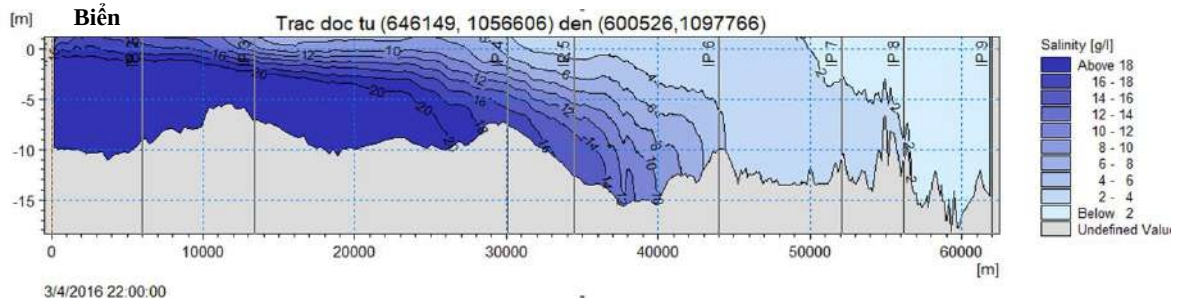


Nhánh Định An

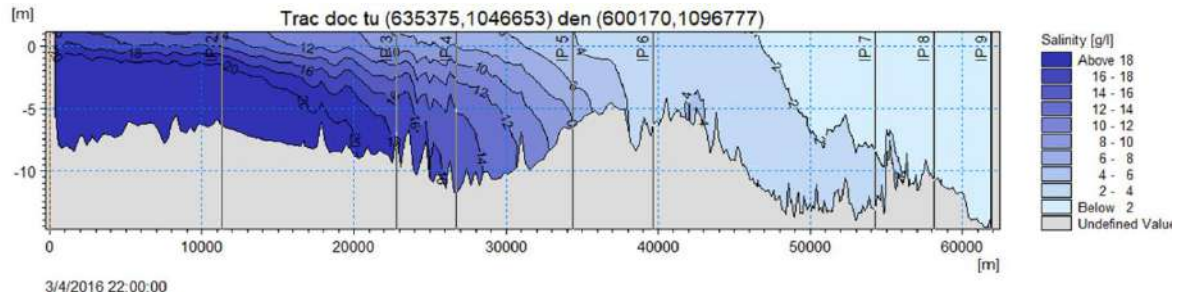


Nhánh Trần Đề

Hình 3-41: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 17h, 4/3/2016 (chân triều cao)

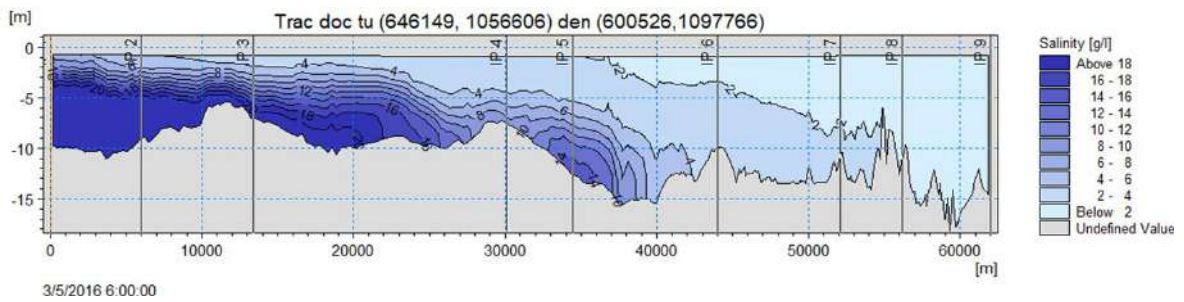


Nhánh Định An

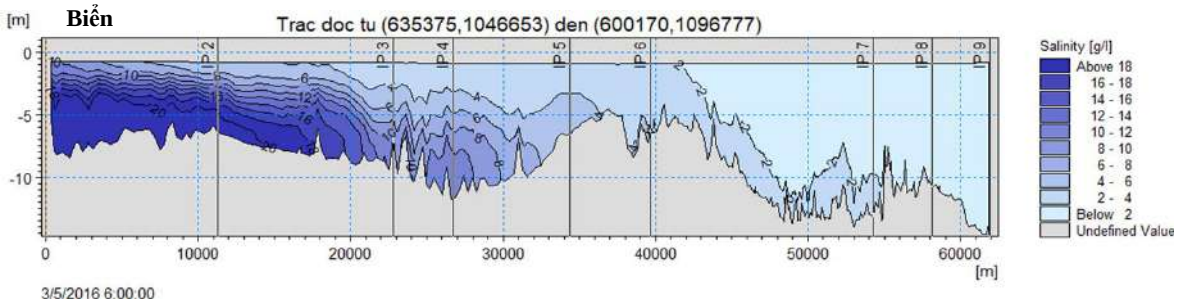


Nhánh Trần Đề

Hình 3-42: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 22h, 4/3/2016 (đỉnh triều)



Nhánh Định An



Nhánh Trần Đề

Hình 3-43: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 06h, 5/3/2016 (chân triều thấp)

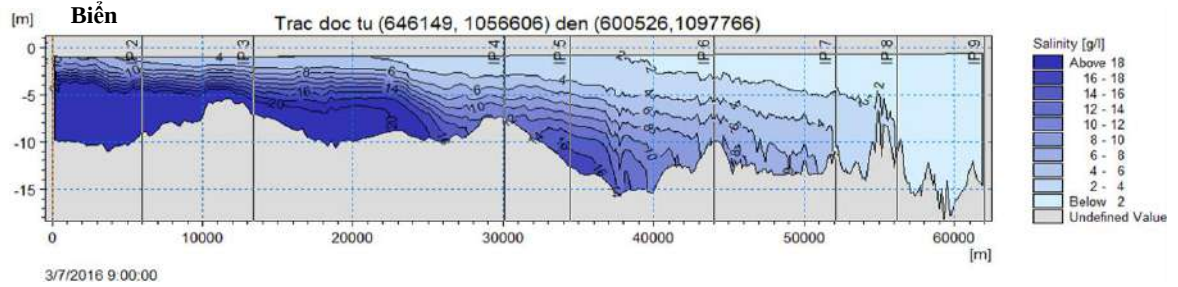
Từ kết quả của trích xuất dọc theo hai nhánh sông của nồng độ mặn phân bố theo các lớp chiều sâu tính toán rút ra được một số đặc điểm chính của nê m mặn cho hai nhánh sông như sau:

- Biến động hình dáng nêm mặn trên hai nhánh sông có cùng xu thế thời điểm chân triều nêm mặn có xu thế mỏng (đường đẳng trị mặn thoải), tiếp theo nêm mặn có xu thế dày lên (đường đẳng trị mặn dốc) khi triều đạt đỉnh và hầu như hình dạng ít thay đổi trong quá trình giữa hai đỉnh triều (nêm mặn có xu thế tịnh tiến đều vào trong sông nhưng gia tăng không nhiều, khi triều xuống nêm mặn mỏng dần cho đến thời điểm chân triều để bắt đầu một chu kỳ mới.
- Chiều dài nêm mặn trên 2 nhánh Cù Lao Dung có sự khác nhau rõ rệt, chiều dài nêm mặn lớp dưới đáy của nhánh Định An xâm nhập sâu hơn nhánh Trần Đề trong các thời điểm khác nhau của con triều từ 0-8km, thời điểm chân triều xâm nhập sâu hơn. Tuy nhiên, phía trên mặt lại có xu hướng ngược lại với phía đáy sâu, khoảng cách xâm nhập mặn trên nhánh Định An phía trên mặt lại nhỏ hơn nhánh Trần Đề từ 2-10km, thời điểm chân triều chênh lệch là lớn nhất. Từ các kết quả này cho thấy về tổng thể khả năng đẩy mặn của nhánh Định An tốt hơn nhánh Trần Đề khi triều xuống đồng nghĩa với khả năng hút ngọt trên nhánh Định An tốt hơn nhánh Trần Đề.
- Vào thời kỳ triều kém nêm mặn trên nhánh Định An xâm nhập sâu vào trong sông trong thời điểm giữa hai đỉnh triều và chân triều cao với chiều dài lớn nhất phía đáy khoảng 39km, trên mặt khoảng 30km, phía đáy nêm mặn vượt qua mũi Cù Lao Dung khoảng 6,0km. Trên nhánh Trần Đề nêm mặn không vượt qua mũi Cù Lao Dung và chiều dài lớn nhất phía đáy khoảng 33,5km và trên mặt khoảng 32,5km.
- Tốc độ dịch chuyển của nêm mặn của hai nhánh sông cũng khá khác nhau. Tốc độ dịch chuyển nêm mặn của nhánh Trần Đề phía trên mặt và phía dưới ít thay đổi hơn so với nhánh Định An trong cùng thời điểm của con triều. Trong thời kỳ triều lên từ thời điểm chân triều thấp đến thời điểm đỉnh triều thứ nhất (khoảng 8h) tốc độ phát triển nêm mặn tịnh tiến vào phía trong sông của nhánh Định An là: tầng mặt 1,4km/h, tầng đáy 0,7km/h; nhánh Trần Đề là: 1,0km và tầng đáy là 1,25km/h. Trong thời kỳ giữa hai đỉnh triều nêm mặn vẫn có xu hướng tịnh tiến vào trong sông với tốc độ nhánh Định An là: lớp mặt 0,8-1,0km/h, lớp đáy 0,5-1,3km/h và nhánh Trần Đề là: lớp mặt 0,3-0,8km/h, lớp đáy 0,2-0,4km/h. Vào thời kỳ triều xuống tốc độ dịch chuyển của nêm mặn ra phía biển khá nhanh nhánh Định An: lớp mặt 3,1km/h, lớp đáy 0,9km/h và

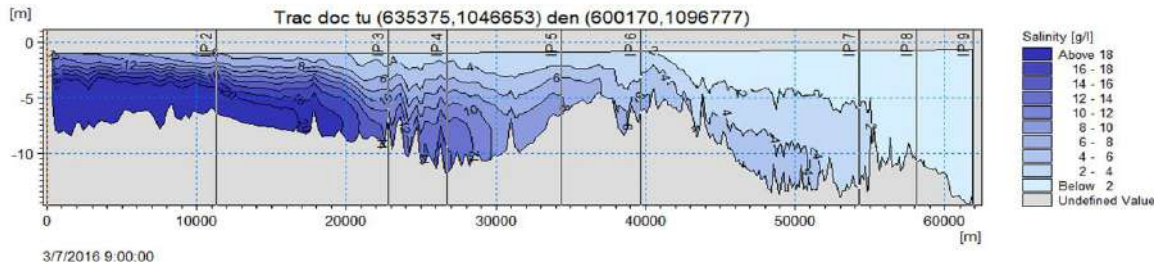
nhánh Trần Đề: lớp mặt 1,9km/h và lớp đáy 0,9km/h. Qua kết quả tính toán về vận tốc dịch chuyển cho thấy vào thời kỳ triều kém biến đổi về hình dạng cấu tạo của nê-m mặn trên nhánh Trần Đề chậm hơn nhánh Định An.

3.3.2.4. Thời kỳ triều trung bình từ ngày 7-8/3

Trích xuất các kết quả tính cho một con triều trong thời kỳ triều trung bình đỉnh triều lúc này khoảng +1,5m.

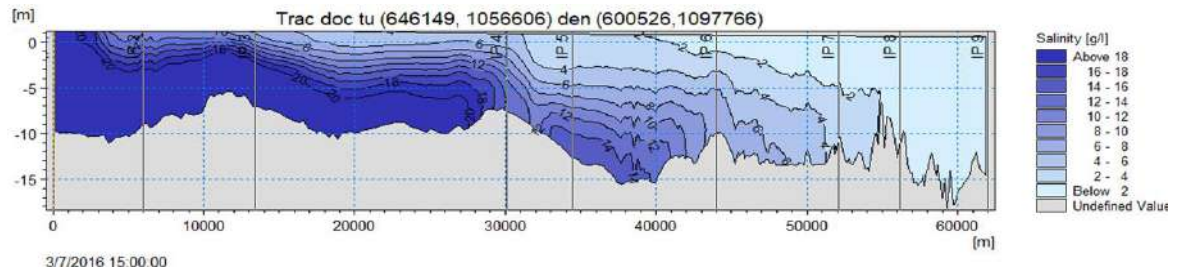


Nhánh Định An

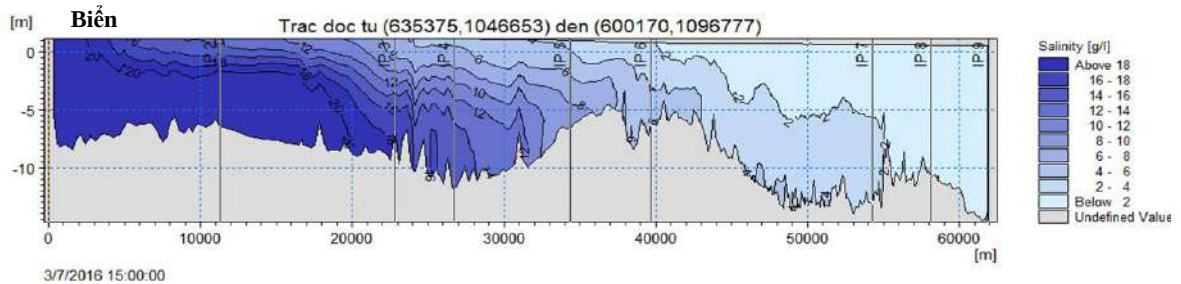


Nhánh Trần Đề

Hình 3-44: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 09h, 7/3/2016 (chân triều thấp)

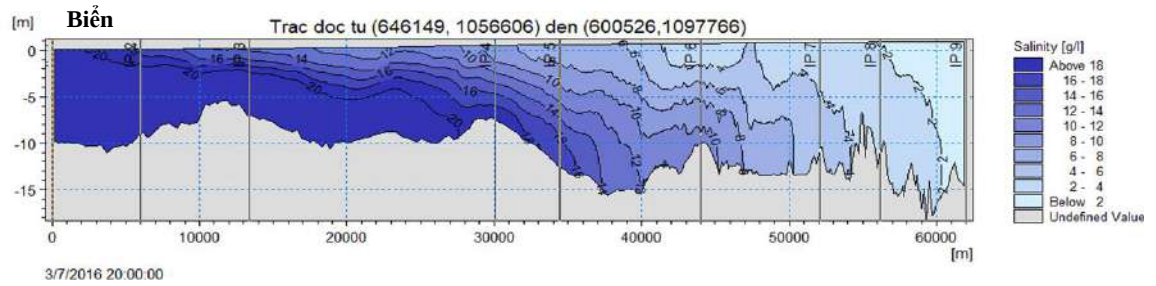


Nhánh Định An

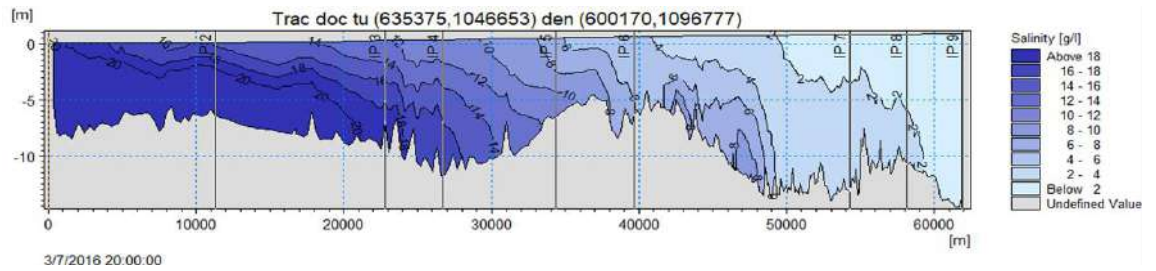


Nhánh Trần Đề

Hình 3-45: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 15h, 7/3/2016 (đỉnh triều)

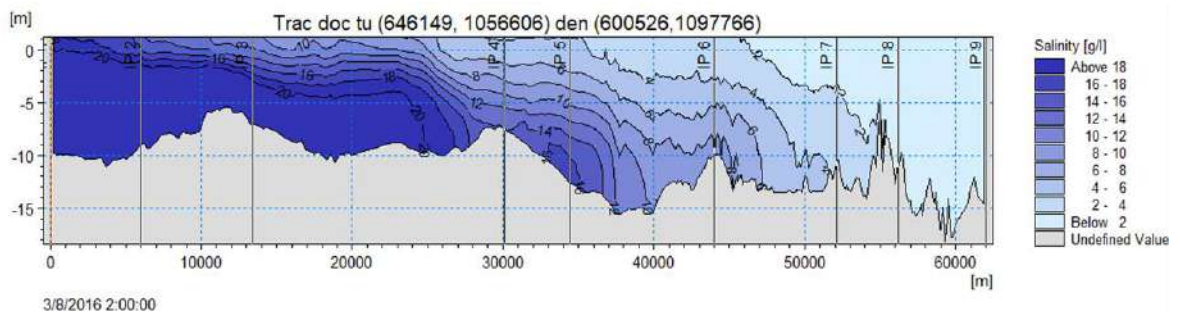


Nhánh Định An

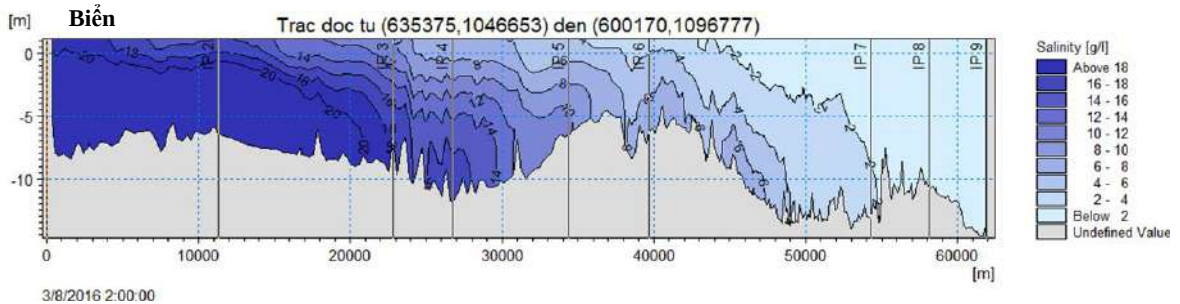


Nhánh Trần Đề

Hình 3-46: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 20h, 7/3/2016 (chân triều cao)

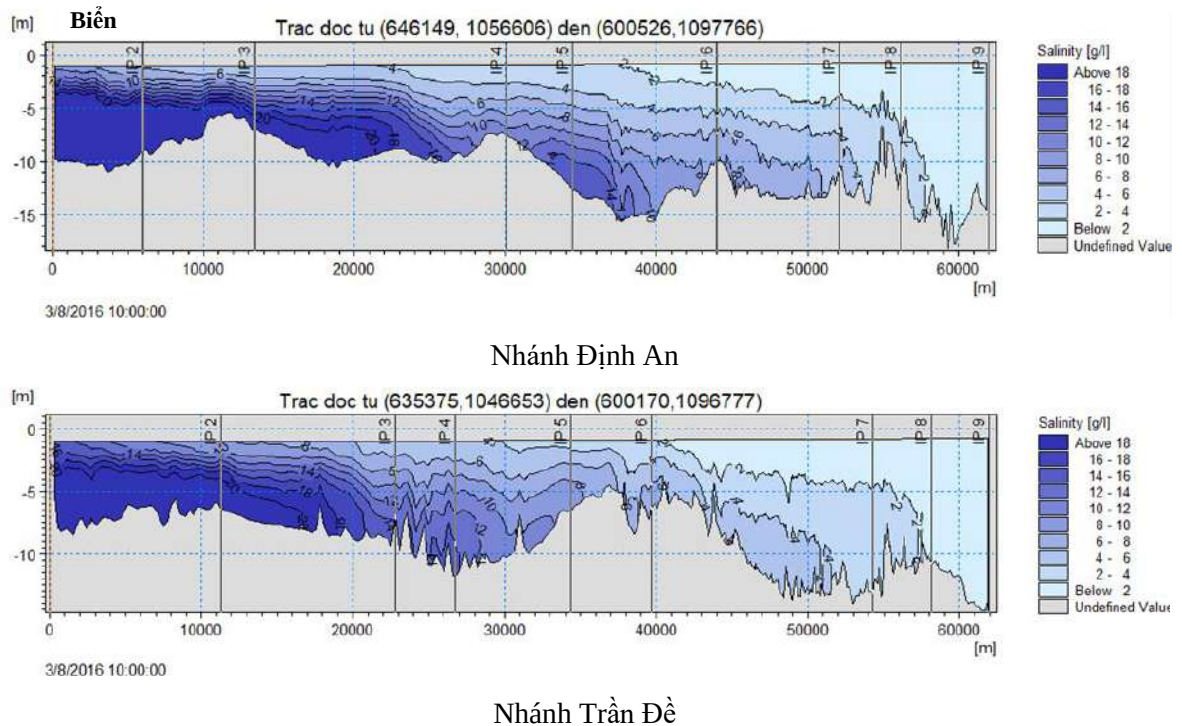


Nhánh Định An



Nhánh Trần Đề

Hình 3-47: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 02h, 8/3/2016 (đỉnh triều)



Hình 3-48: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 10h, 8/3/2016 (chân triều thấp)

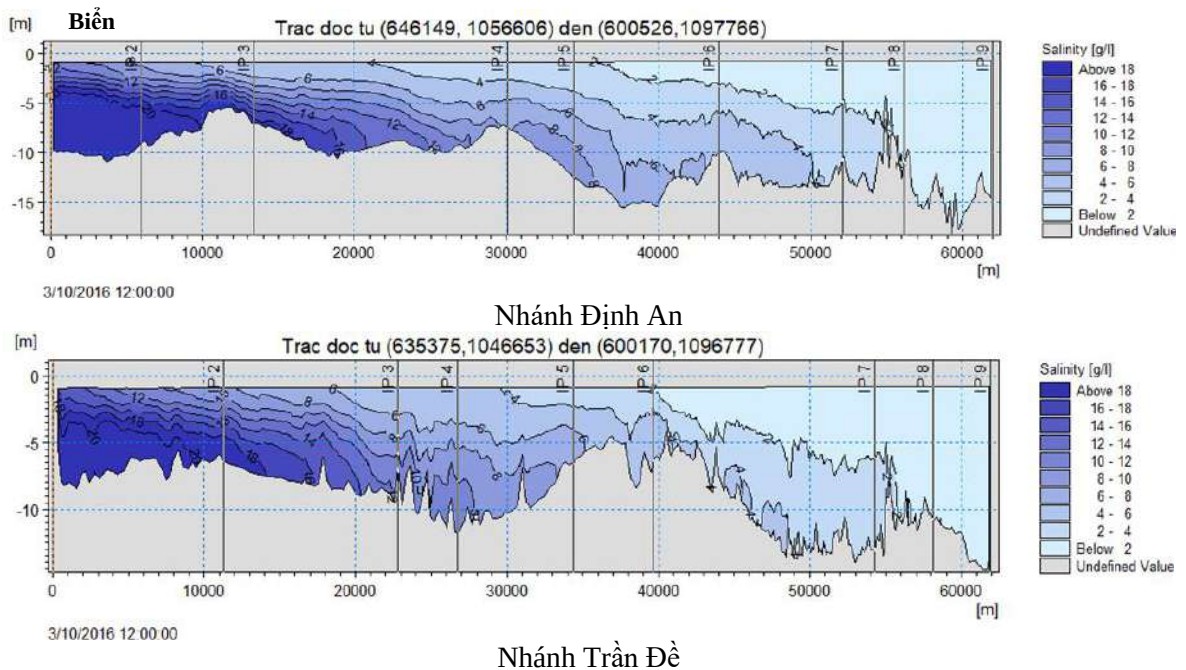
- Cũng tương tự như thời điểm triều thấp biến động hình dáng nêm mặn trên hai nhánh sông có cùng xu thế thời điểm chân triều nêm mặn có xu thế mỏng (đường đẳng trị mặn thoải), tiếp theo nêm mặn có xu thế dày lên (đường đẳng trị mặn dốc) khi triều đạt đỉnh và hầu như hình dạng ít thay đổi trong quá trình giữa hai đỉnh triều (nêm mặn có xu thế tịnh tiến đều vào trong sông nhưng gia tăng không nhiều), khi triều xuống nêm mặn mỏng dần cho đến thời điểm chân triều để bắt đầu một chu kỳ mới.
- Chiều dài nêm mặn trên 2 nhánh Cù Lao Dung có sự khác nhau rõ rệt chỉ trong các thời điểm chân triều thấp. Xu thế chiều dài nêm mặn trên nhánh Định An lớn hơn nhánh Trần Đề nhưng không đáng kể. Chiều dài nêm mặn lớp dưới đáy của nhánh Định An xâm nhập sâu hơn nhánh Trần Đề trong các thời điểm khác nhau của con triều từ 3-10km, thời điểm chân triều xâm nhập sâu hơn. Tuy nhiên, phía trên mặt lại có xu hướng ngược lại với phía đáy sâu, khoảng cách xâm nhập mặn trên nhánh Định An phía trên mặt lại nhỏ hơn nhánh Trần Đề từ 0-9km vào thời điểm chân triều chênh lệch là lớn nhất. Từ các kết quả này cho thấy về tổng thể khả năng đẩy mặn của nhánh Định An tốt hơn nhánh

Trần Đề khi triều xuống đồng nghĩa với khả năng hút ngọt trên nhánh Định An tốt hơn nhánh Trần Đề.

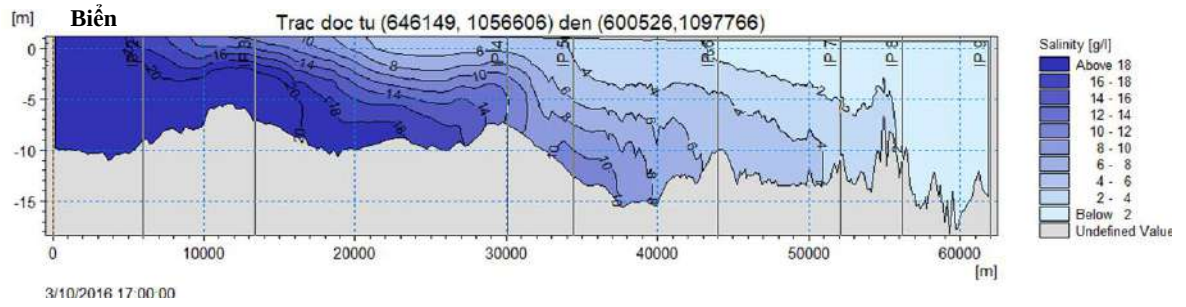
- Vào thời kỳ triều trung bình nê m mặn trên hai nhánh có chiều dài lần lượt là: nhánh Định An: lớp mặn từ 19-43km, lớp đáy từ 43-47,5km; nhánh Trần Đề: lớp mặn từ 19,5-37,5km, lớp đáy từ 36,0-47,0km. Trên nhánh Định An xâm nhập sâu vào trong sông trong thời điểm giữa hai đỉnh triều và chân triều cao, chiều dài lớn nhất tầng đáy tính từ cửa biển vào lên tới khoảng 48,5km, trên mặt khoảng 44,0km và nồng độ mặn 4g/l đều vượt qua mũi Cù Lao Dung lần lượt là 15,5km và 11,0km. Cũng tương tự như nhánh Định An chiều dài nê m mặn trên nhánh Trần Đề cũng đạt cao nhất vào thời điểm giữa hai đỉnh triều và chân triều cao với tầng đáy là 47,0km và 37,5km và cũng đều vượt qua mũi Cù Lao Dung lần lượt là 12km và 2km.
- Tốc độ dịch chuyển của nê m mặn trong thời kỳ triều cao có sự khác nhau đáng kể so với thời kỳ triều thấp. Có những thời điểm xu thế dịch chuyển của phía trên và phía dưới ngược chiều nhau. Tốc độ dịch chuyển lớn nhất của nê m mặn vào trong sông đối với nhánh Định An lớp mặt là 1,7km/h, lớp đáy là 0,9km/h và nhánh Trần Đề lớp mặt là 1,7km/h, lớp đáy 0,8km/h.

3.3.2.5. Thời kỳ triều cao từ ngày 10-13/3

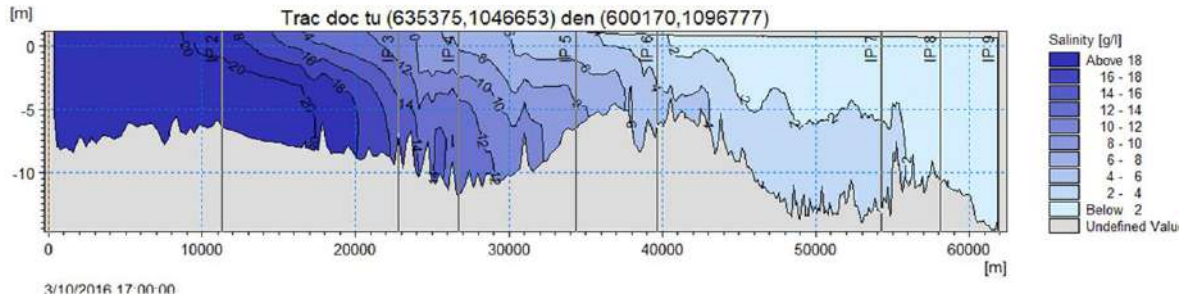
Trích xuất các kết quả tính cho một con triều trong thời kỳ triều cao đỉnh triều lúc này khoảng +1,9m.



Hình 3-49: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 12h, 10/3/2016 (chân triều thấp)

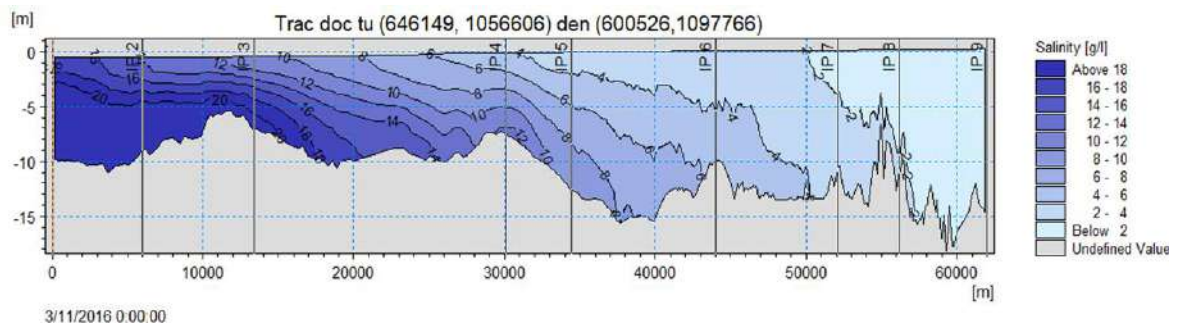


Nhánh Định An

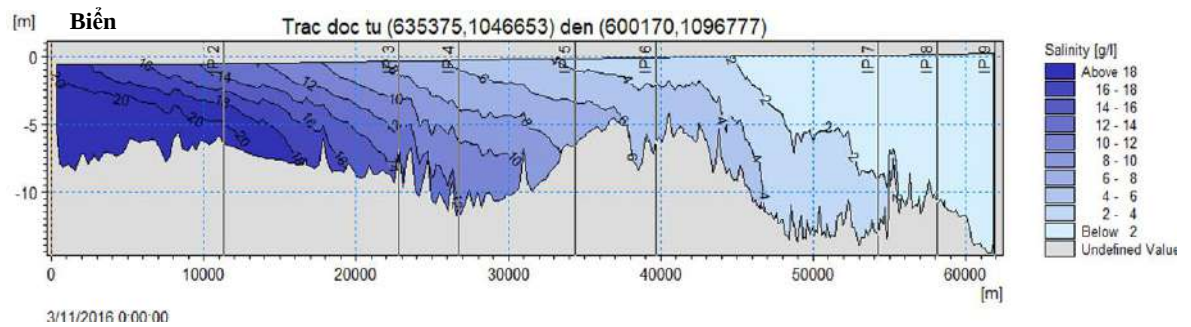


Nhánh Trần Đề

Hình 3-50: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 17h, 10/3/2016 (đỉnh triều)

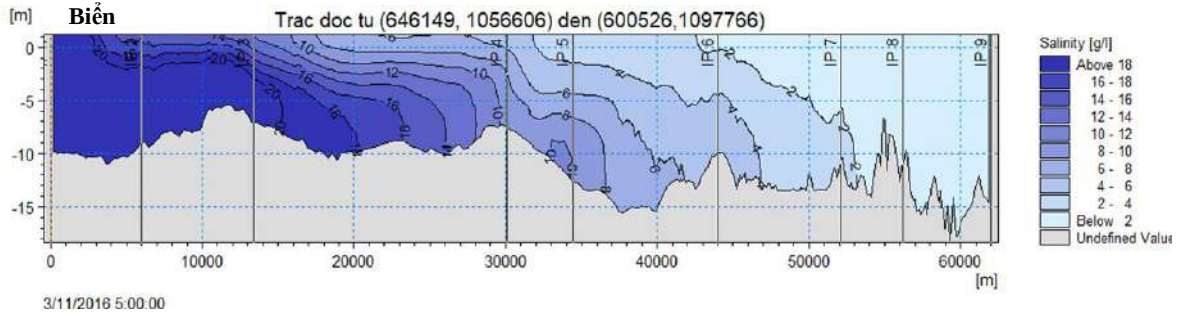


Nhánh Định An

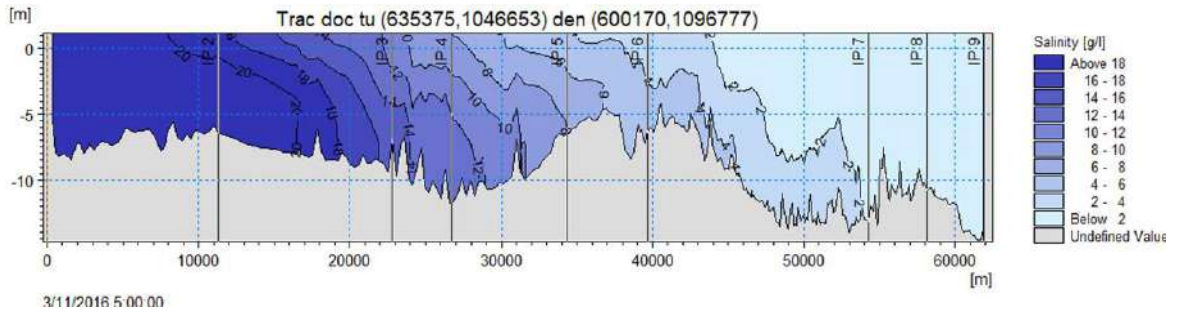


Nhánh Trần Đề

Hình 3-51: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 0h, 11/3/2016 (chân triều cao)

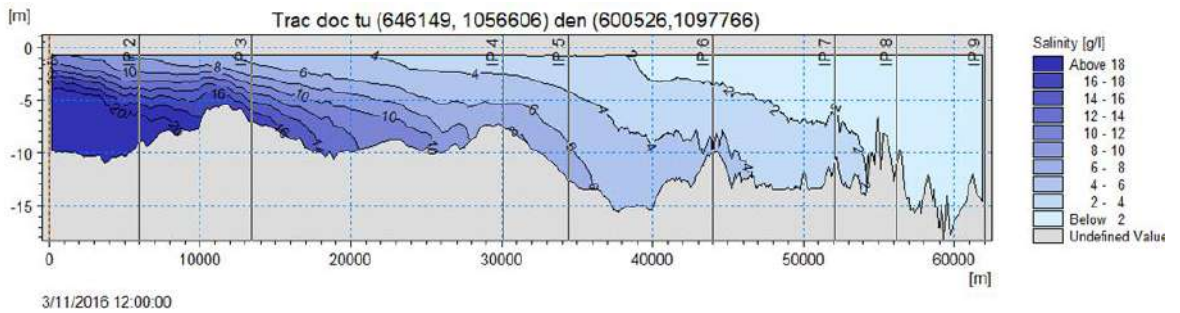


Nhánh Định An

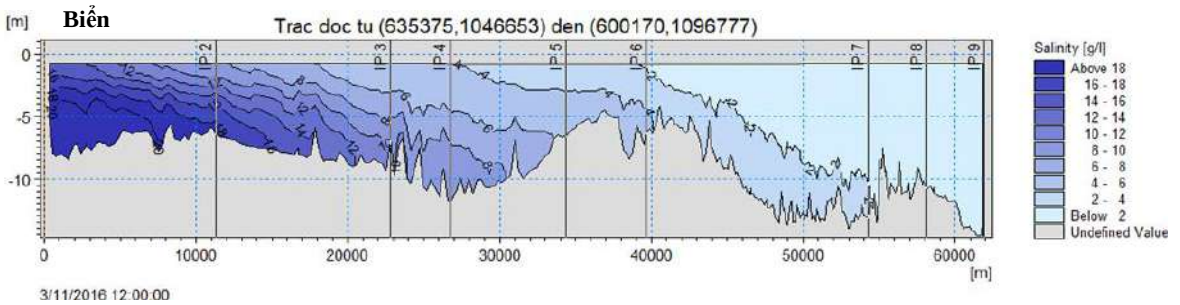


Nhánh Trần Đề

Hình 3-52: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 05h, 11/3/2016 (đỉnh triều)



Nhánh Định An



Nhánh Trần Đề

Hình 3-53: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 10h, 11/3/2016 (chân triều thấp)

- Cũng tương tự như thời điểm triều thấp, triều trung bình biến động hình dáng nêm mặn trên hai nhánh sông có cùng xu thế thời điểm chân triều nêm mặn có xu thế mỏng (đường đẳng trị mặn thoải), tiếp theo nêm mặn có xu thế dày lên (đường đẳng trị mặn dốc) khi triều đạt đỉnh và hầu như hình dạng ít thay đổi

trong quá trình giữa hai đỉnh triều (nêm mặn có xu thế tịnh tiến đều vào trong sông nhưng gia tăng không nhiều), khi triều xuống nêm mặn mỏng dần cho đến thời điểm chân triều để bắt đầu một chu kỳ mới. Kết quả cũng chỉ ra rằng trong thời kỳ triều cao thì xu thế phân tầng giảm hơn so với các thời kỳ triều thấp và trung bình và với nhánh Trần Đề nhiều thời điểm đường đẳng trị mặn 4g/l vuông góc với đáy sông.

- Chiều dài nêm mặn trên 2 nhánh Cù Lao Dung có sự khác nhau rõ rệt chỉ trong các thời điểm chân triều thấp. Xu thế chiều dài nêm mặn trên nhánh Định An lớn hơn nhánh Trần Đề. Chiều dài nêm mặn lớp dưới đáy của nhánh Định An xâm nhập sâu hơn nhánh Trần Đề trong các thời điểm khác nhau của con triều từ 4,0-12,0km, thời điểm chân triều xâm nhập sâu hơn. Tuy nhiên, phía trên mặt lại có xu hướng ngược lại với phía đáy sâu, khoảng cách xâm nhập mặn trên nhánh Định An phía trên mặt lại nhỏ hơn nhánh Trần Đề từ 0-8,0km vào thời điểm chân triều chênh lệch là lớn nhất. Từ các kết quả này cho thấy về tổng thể khả năng đẩy mặn của nhánh Định An tốt hơn nhánh Trần Đề khi triều xuống đồng nghĩa với khả năng hút ngọt trên nhánh Định An tốt hơn nhánh Trần Đề.
- Vào thời kỳ triều cao nêm mặn trên hai nhánh có chiều dài lần lượt là: nhánh Định An: lớp mặn từ 19-35km, lớp đáy từ 30-42km; nhánh Trần Đề: lớp mặn từ 24-33km, lớp đáy từ 29-34,0km. Trên nhánh Định An xâm nhập sâu vào trong sông trong thời điểm giữa hai đỉnh triều và chân triều cao, chiều dài lớn nhất tầng đáy tính từ cửa biển vào lên tới khoảng 40,5km, trên mặt khoảng 35,0km và nồng độ mặn 4g/l đều tại tầng đáy vượt qua mũi Cù Lao Dung khoảng 7,0km. Cũng tương tự như nhánh Định An chiều dài nêm mặn trên nhánh Trần Đề cũng đạt cao nhất vào thời điểm giữa hai đỉnh triều đường đẳng trị 4g/l vuông góc với đáy sông với khoảng cách so với biển khoảng 34km.
- Tốc độ dịch chuyển của nêm mặn trong thời kỳ triều cao tương tự như thời kỳ triều thấp. Trong thời kỳ này tốc độ xâm nhập mặn sâu vào trong sông tầng mặt của nhánh Định An trong thời kỳ triều lên tăng mặt lên đến 2,1km/h, tầng đáy tốc độ rất nhỏ và trong thời kỳ triều xuống khoảng 1,8km/h, tầng đáy

khoảng 1,2km/h. Tốc độ xâm nhập mặn trên nhánh Trần Đề trong thời kỳ triều lên tăng mặt 1,4km/h và tăng đáy là 0,5km/h và trong thời kỳ triều xuống là 1,1km/h và cũng bằng 0,5km/h.

- Qua các kết quả tính toán cho 3 con triều thấp, trung bình và cao cho thấy con triều cao nêu mặn dày và dốc hơn so với con triều kém và trung bình. Kết quả tính toán cho thấy với con triều cao xu thế xâm nhập mặn lại thấp hơn do với con triều trung bình, điều này có vẻ bất hợp lý trong tính toán. Để làm rõ vấn đề này nghiên cứu sinh đã phân tích lưu lượng thượng nguồn về trong hai thời điểm cho thấy vào thời điểm triều trung bình và thời điểm triều cao lưu lượng tại trạm Kratie có sự thay đổi khoảng gần 500m³/s. Từ vấn đề này cho thấy lưu lượng tại thượng nguồn có tính chất quyết định khá lớn đối với xâm nhập mặn nói chung và nêu mặn nói riêng.

3.3.2.6. *Đánh giá chung về kết quả tính toán, phân tích dọc theo sông*

Qua kết quả tính toán cho các thời điểm của ba con triều trong các thời kỳ triều kém, trung bình, và cao trong mùa kiệt có thể rút ra một số nhận xét chung về phân tầng mặn và nêu mặn như sau:

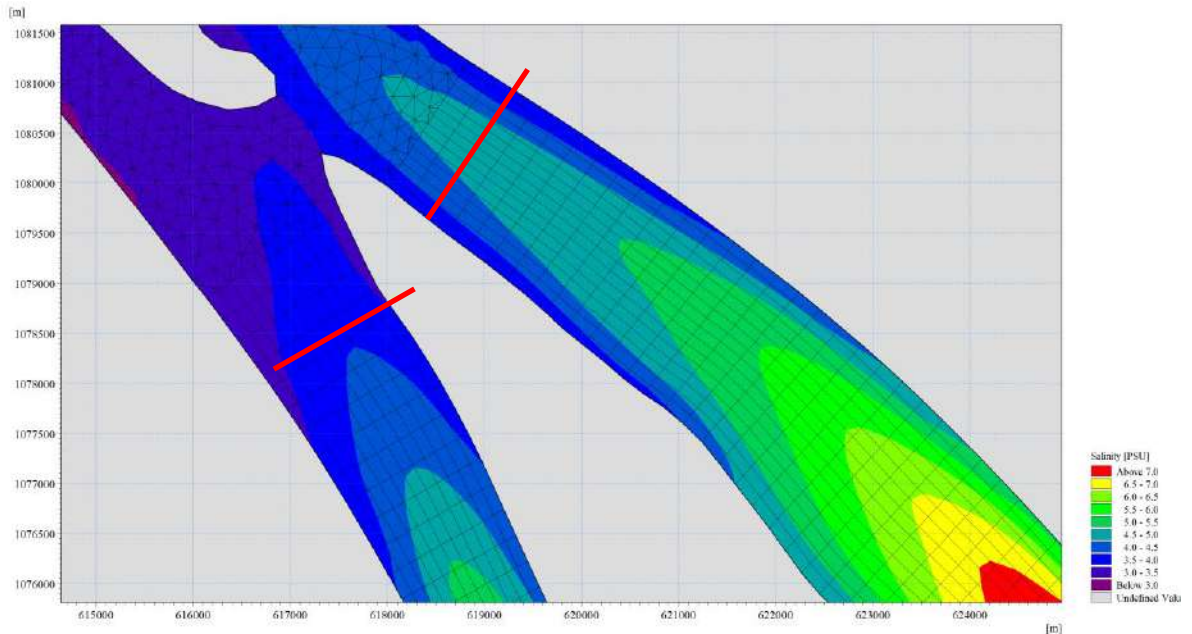
- Về hình dáng nêu mặn luôn có xu thế mỏng trong thời điểm chân triều và triều rút và tăng dần trong thời điểm triều lên và đỉnh triều. Sự biến hình nêu mặn chủ yếu diễn ra trong hai thời kỳ triều lên và triều xuống của nhánh chân triều thấp còn trong thời kỳ giữa hai đỉnh triều và chân triều cao thì nêu mặn ít có sự biến hình.
- Tốc độ phát triển của nêu mặn không đều nhau giữa lớp mặt và lớp đáy, lớp trên mặt nhanh hơn lớp dưới sâu là nguyên nhân thay đổi hình dáng nêu mặn. Tốc độ dịch chuyển ra phía biển của nêu mặn khi triều xuống nhanh hơn tốc độ khi triều lên.
- So sánh về nêu mặn giữa hai nhánh sông Định An và Trần Đề cho thấy nhánh Định An có xu thế mỏng và thoải hơn so với nhánh Trần Đề trong mọi thời điểm tính toán trong các kỳ triều. Tại nhánh Định An, hình dáng nêu mặn thay đổi theo thời gian nhanh hơn nhánh Trần Đề và chiều dài nêu mặn nhánh Định An cũng xâm nhập sâu hơn so với nhánh Trần Đề tối đa khoảng 10km.

Bảng 3-5: Một số tóm tắt kết quả về phân tầng mặn theo chiều dọc sông

Tên sông	Thời điểm trích kết quả	Hình dáng nêm mặn	Chiều dài nêm mặn (km)		Khoảng cách với đầu CLD (km)	
			Trên mặt	Dưới đáy	Trên mặt	Dưới đáy
I	Thời kỳ thủy triều thấp					
Định An	5h 4/3/2016 - chân triều	Thoải	11,0	26,0	26,0	11,0
Trần Đề		Dốc	20,5	24,0	18,4	14,9
Định An	13h 4/3/2016 - đỉnh triều	Thoải	22,5	31,5	14,5	5,5
Trần Đề		Dốc	24,5	28,5	14,4	10,4
Định An	17h 4/3/2016 - chân triều	Thoải	26,5	36,5	10,5	0,5
Trần Đề		Dốc	30,5	32,0	8,4	6,9
Định An	22h 4/3/2016- đỉnh triều	Thoải	30,5	39,0	6,5	-2,0
Trần Đề		Dốc	32,5	33,5	6,4	5,4
Định An	06h 5/3/2016 - chân triều	Thoải	9,0	33,0	28,0	4,0
Trần Đề		Dốc	17,5	26,0	21,4	12,9
II	Thời kỳ thủy triều trung bình					
Định An	9h 7/3/2016 - chân triều	Thoải	19,0	46,0	18,0	-9,0
Trần Đề		Thoải	19,5	39,0	19,4	-0,1
Định An	15h 7/3/2016 - đỉnh triều	Thoải	29,0	44,0	8,0	-7,0
Trần Đề		Dốc	29,5	36,0	9,4	2,9
Định An	20h 7/3/2016 - chân triều	Thoải	40,5	48,5	-3,5	-11,5
Trần Đề		Dốc	37,0	37,5	1,9	1,4
Định An	02h 8/3/2016 - đỉnh triều	Thoải	29,0	44,0	8,0	-7,0
Trần Đề		Dốc	34,5	45,5	4,4	-6,6
Định An	10h 5/3/2016 - chân triều	Thoải	19,0	47,5	18,0	-10,5
Trần Đề		Thoải	27,5	41,5	11,4	-2,6
III	Thời kỳ thủy triều cao					
Định An	12h 10/3/2016 - chân triều	Thoải	21,0	41,5	16,0	-4,5
Trần Đề		Dốc	27,0	31,5	11,9	7,4
Định An	17h 10/3/2016 - đỉnh triều	Hơi thoải	31,5	40,5	5,5	-3,5
Trần Đề		Dốc	34,0	34,0	4,9	4,9
Định An	0h 10/3/2016 - chân triều	Hơi thoải	30,0	40,5	7,0	-3,5
Trần Đề		Dốc	32,5	34,0	6,4	4,9
Định An	5h 11/3/2016 - đỉnh triều	Hơi thoải	35,0	41,0	2,0	-4,0
Trần Đề		Quá dốc	33,5	33,5	5,4	5,4
Định An	12h 11/3/2016 - chân triều	Hơi thoải	21,0	31,5	16,0	5,5
Trần Đề		Dốc	24,5	29,5	14,4	9,4

3.3.3. Kết quả phân bố mặn trên mặt cắt ngang sông

Trên cơ sở kết quả tính toán mặn từ mô hình MIKE3 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.



Hình 3-54: Sơ họa tuyến cắt ngang

Trong nghiên cứu đánh giá chi tiết cho mặt cắt ngang sông tại khu vực đầu Cù Lao Dung đây là khu vực thường là ranh giới mặn lợ. Cắt một mặt cắt ngang vuông góc với trục dọc sông trên nhánh Định An và nhánh Trần Đề. Phân tích tại các thời điểm đặc trưng cho một con triều (chân triều thấp, đỉnh triều, chân triều cao) trong các thời kỳ triều khác nhau (triều thấp, trung bình và cao). Tại khu vực trích xuất kết quả mặt cắt ngang có thời gian triều trễ hơn so với triều cửa sông khoảng 1 giờ. Do đó các thời điểm (bước thời gian) trích xuất kết quả sẽ chậm hơn 1 giờ so với kết quả trích xuất theo cắt dọc sông.

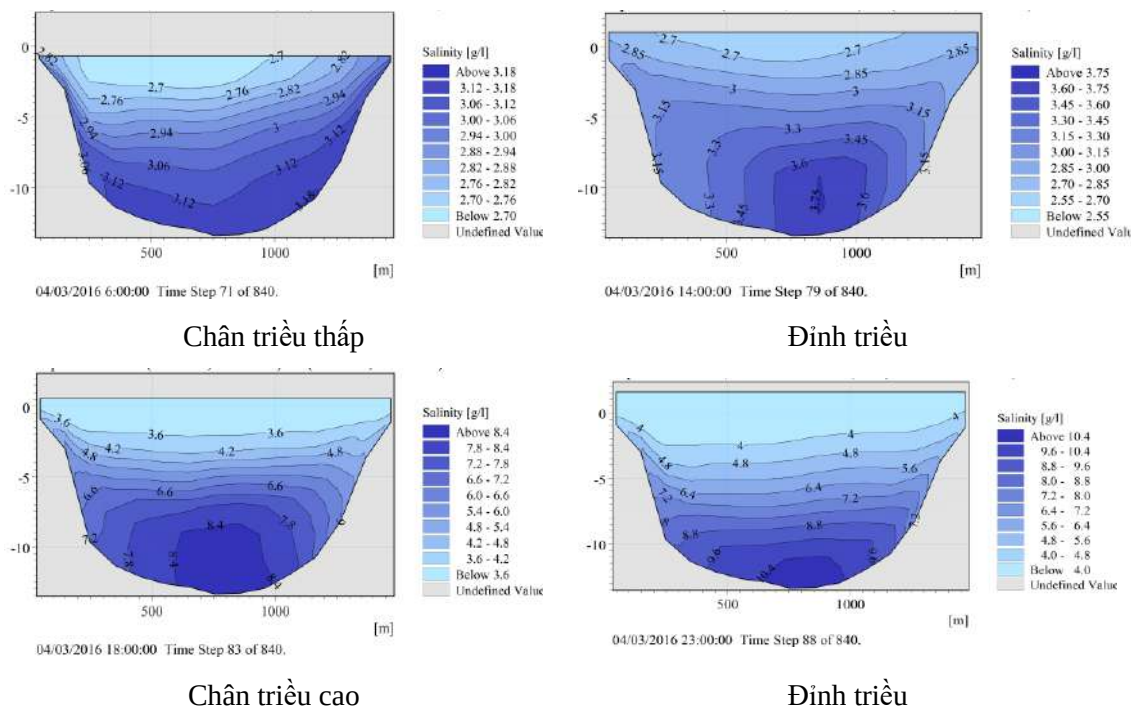
Qua các hình ảnh từ kết quả cho ba thời kỳ thủy triều kém, triều trung bình và triều cao cho thấy có sự phân tầng khá rõ nét theo các lớp chiều sâu. Sự phân tầng trên chiều ngang sông không có sự đồng nhất từ trên xuống dưới.

Trong thời kỳ triều thấp và trung bình lớp nước phía trên mặt (khoảng 40- 50% chiều sâu) nồng độ mặn phía sát bờ có xu thế cao hơn ở giữa dòng và đường đẳng trị mặn có xu thế cong theo hình dáng mặt cắt ngang đỉnh cong hướng xuống đáy, ngược lại các lớp dưới sâu (50%) phía dưới thì có xu hướng ngược lại nồng độ mặn phía

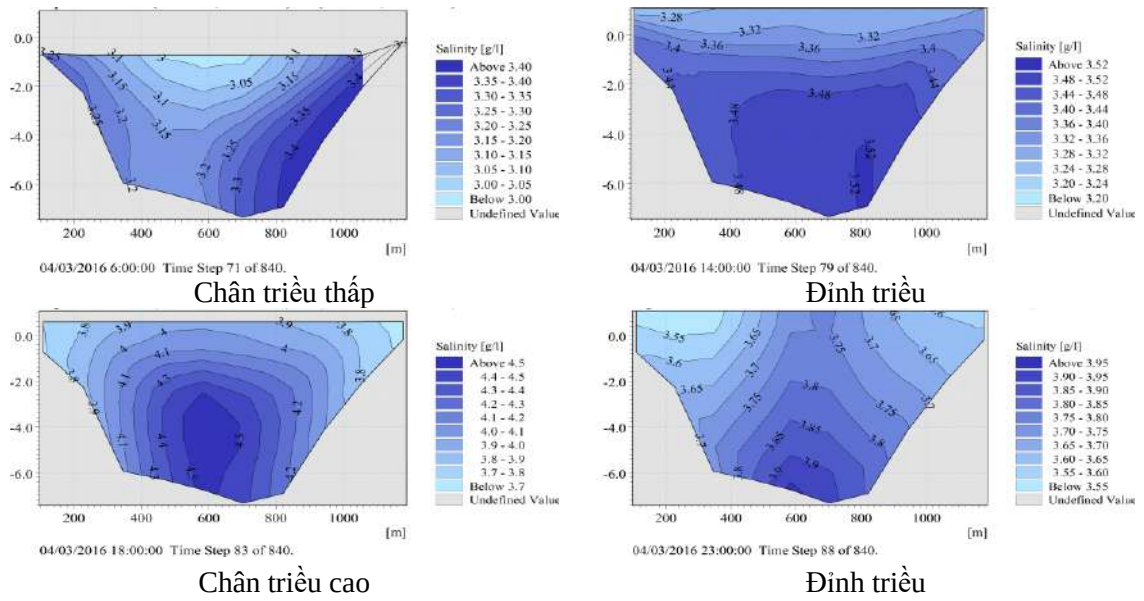
trong bờ có xu thế nhỏ hơn ở giữa sông và đường đẳng mặn có đỉnh cong hướng lên phía mặt thoáng.

Trong thời kỳ triều cao thì phân bố mặn trên mặt cắt ngang giữa các thời điểm có sự khác nhau vào thời điểm chân triều phân bố mặn trên mặt cắt ngang tương tự như hai thời điểm triều thấp và triều trung bình. Thời điểm đỉnh triều các đường đẳng trị mặn hầu như không có sự phân tầng từ trên xuống dưới nhiều mà có xu thế vuông góc với đáy và nồng độ mặn cao ở giữa sông và giảm dần vào trong bờ.

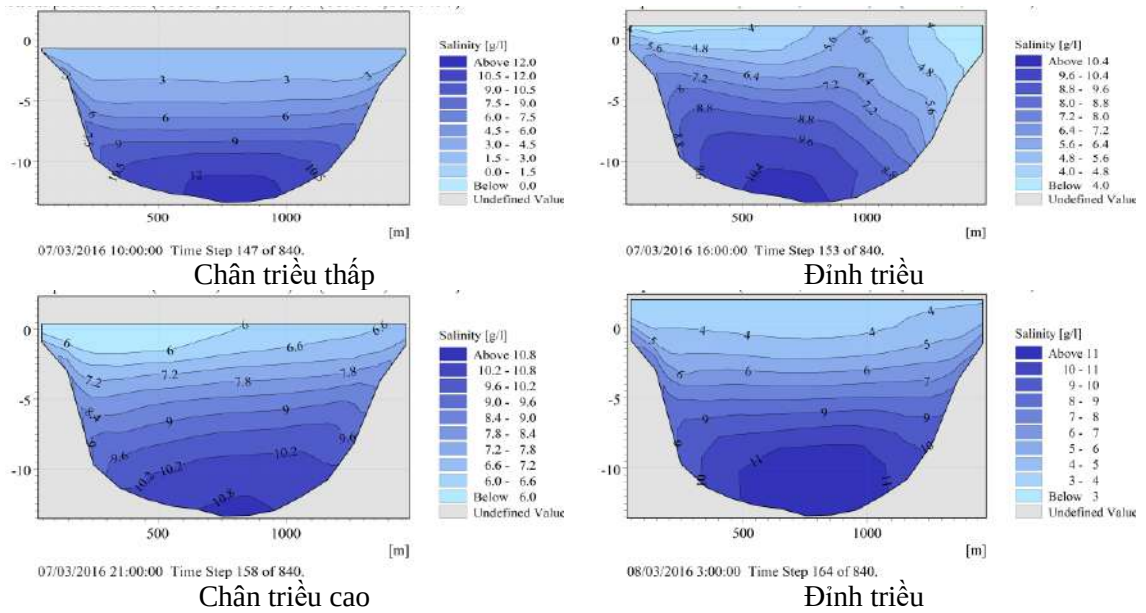
Từ kết quả phân tích trên mặt cắt ngang cho thấy phân tầng trên mặt cắt ngang cũng tương đồng với trục dọc sông. Vào thời kỳ triều kém và triều trung bình phân tầng mặn trên mặt cắt ngang mạnh hơn thời kỳ triều cường và trong một con triều thì thời điểm chân triều có sự phân tầng rõ hơn thời kỳ đỉnh triều. Vào thời kỳ triều xuống và chân triều dòng chảy sông chảy ra kết hợp với dòng triều rút nên tại vùng giữa sông (lạch sâu) mặn sẽ có nồng độ thấp hơn hai bên bờ và ngược lại khi triều lên dòng thủy triều chảy ngược lại phía sông theo các lạch sâu nên vùng giữa sông nồng độ mặn cao hơn hai bên bờ.



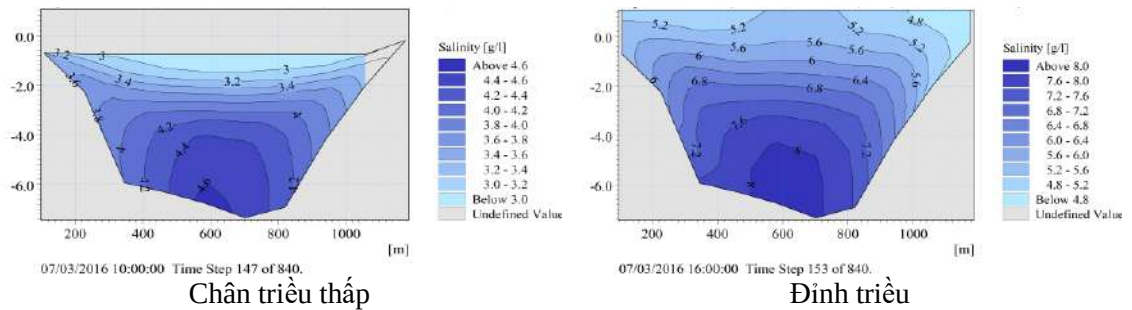
Hình 3-55: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Định An (triều thấp)

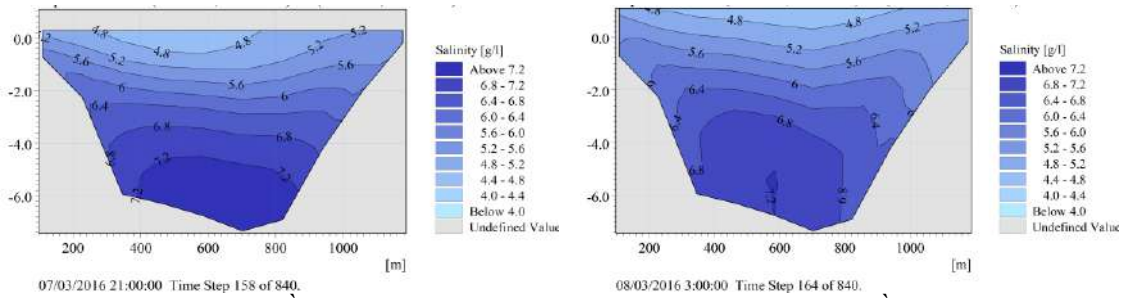


Hình 3-56: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Trần Đề (triều thấp)

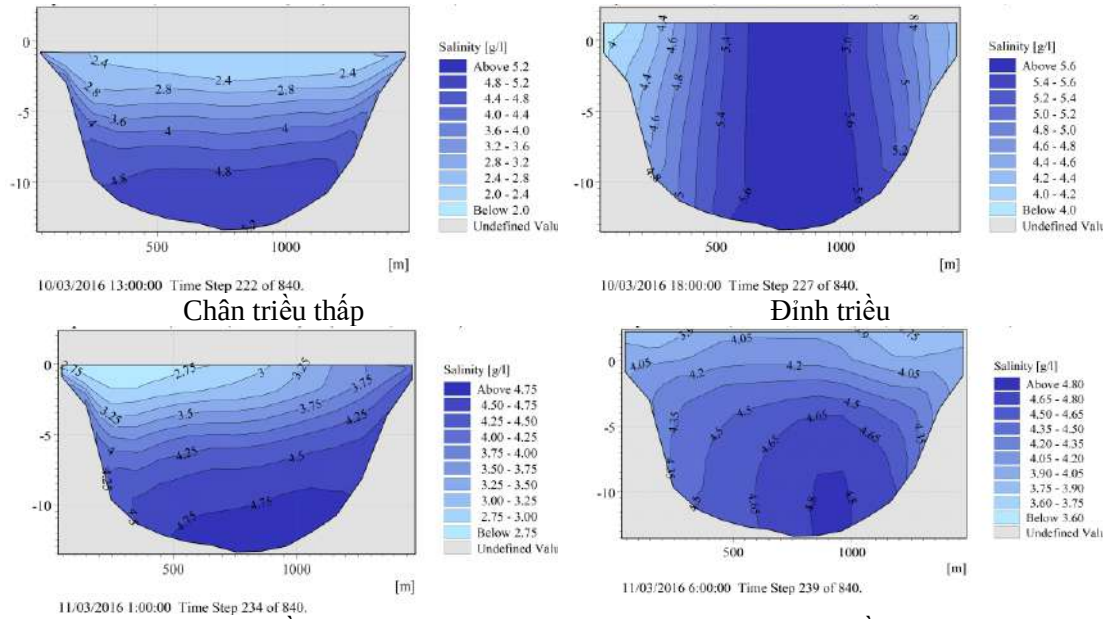


Hình 3-57: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Định An (triều trung bình)

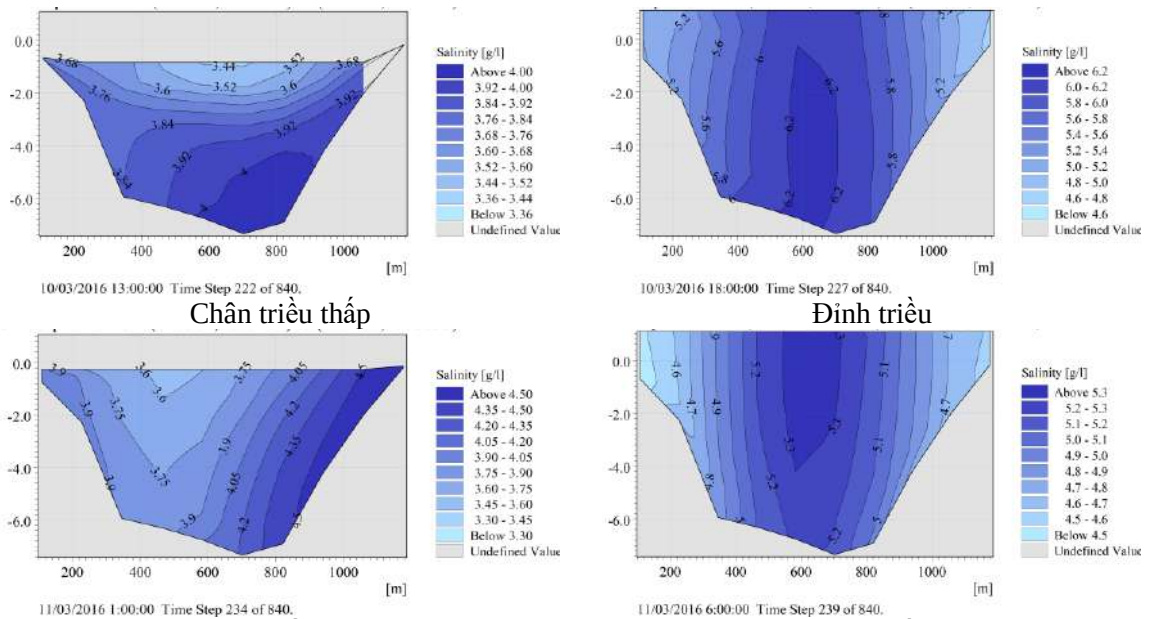




Hình 3-58: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Trần Đề (triều trung bình)



Hình 3-59: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Định An (triều cao)



Hình 3-60: Phân bố mặn theo mặt cắt qua nhánh Trần Đề (triều cao)

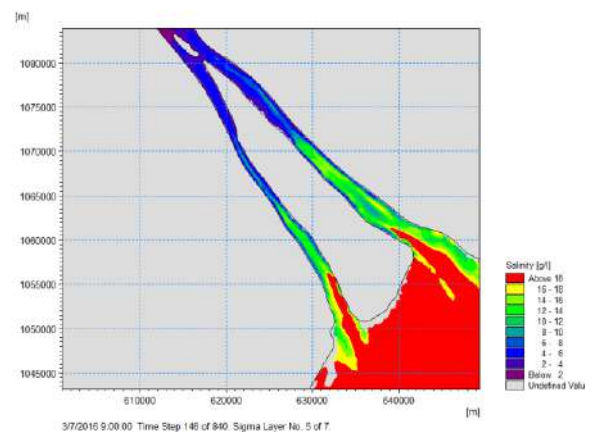
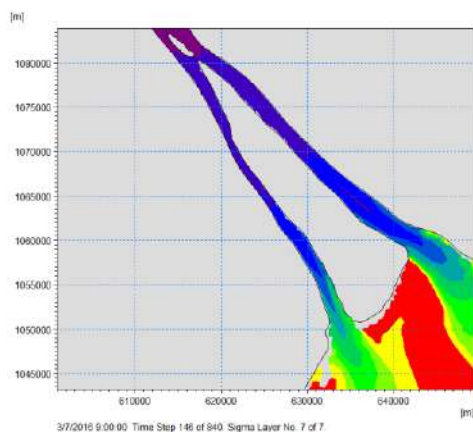
3.3.4. Kết quả phân bố mặn theo mặt bằng theo các lớp chiều sâu

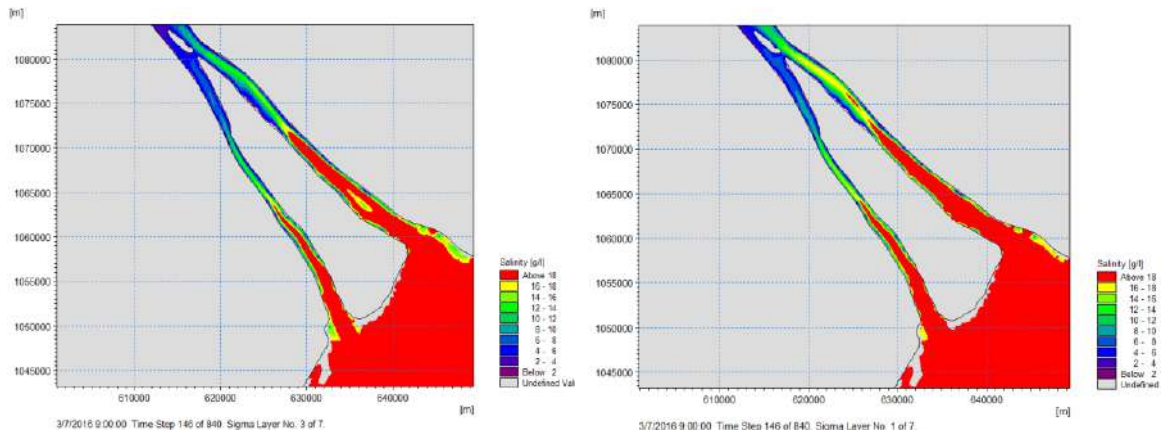
Một số hình ảnh trên mặt bằng sông khu vực thường xảy ra hiện tượng phân tầng mặn tương ứng với các lớp độ sâu (Trong tính toán chia chiều sâu lớp nước tính toán là 7 lớp. Các lớp độ sâu sẽ được đánh số bắt đầu từ đáy sông lớp 1 và lớp trên mặt là lớp 7).

Các hình ảnh phân bố mặn trên mặt bằng theo các lớp chiều sâu có sự khác nhau khá rõ. Một đặc điểm khá nhận thấy sự phân bố mặn trên các lớp độ sâu cũng có sự khác nhau, hai lớp trên mặt và ở đáy độ mặn có sự đồng nhất các lớp ở tầng giữa có sự xuất hiện các vệt loang và đốm loang điều này chứng tỏ có sự xáo trộn rối giữa các lớp dòng chảy.

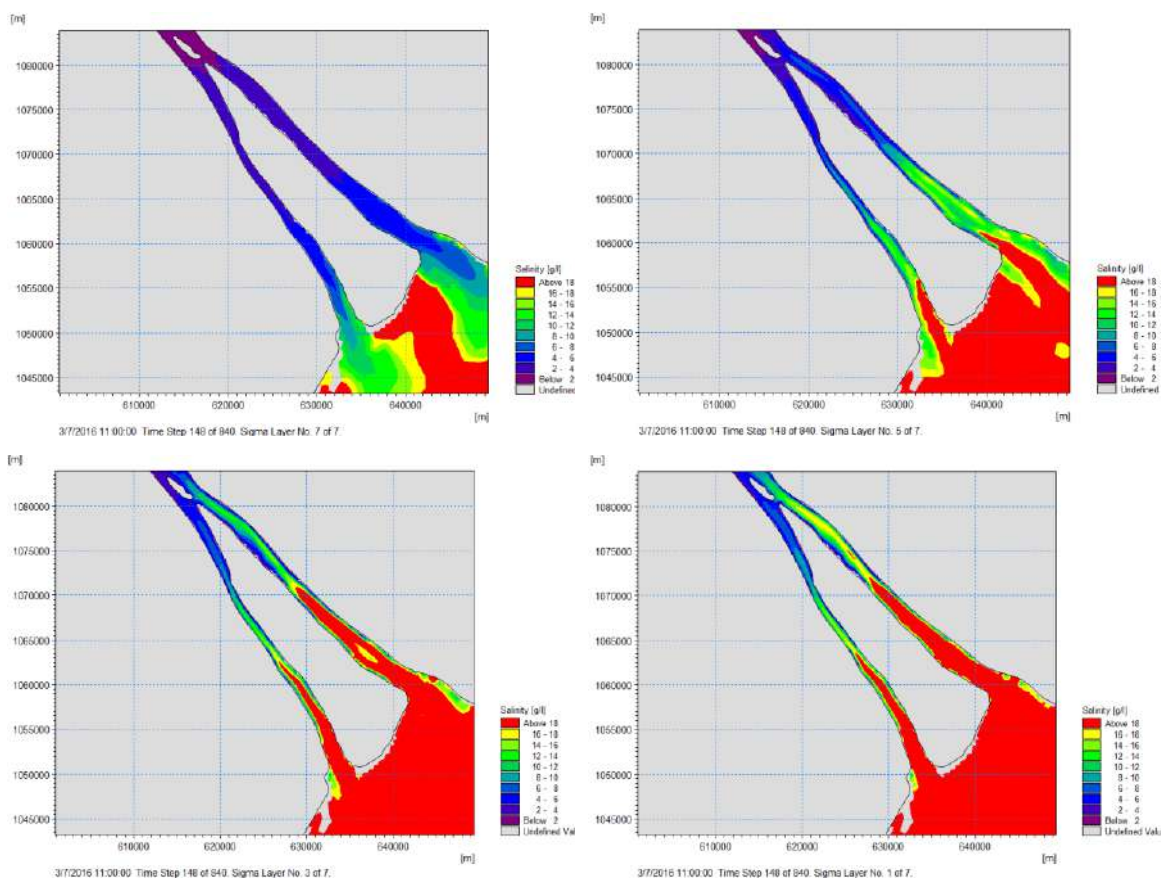
Xu thế phân cách trên các tầng có sự khác nhau rõ rệt tầng trên mặt và dưới đáy và nhiều thời điểm có xu thế ngược nhau trong các thời điểm triều trong ngày. Tại thời điểm chân triều và triều xuống phân bố mặn có xu hướng phân bố mặn ép về hai phía bờ và tạo thành các đường đẳng trị mặn có chiều cong hướng ra phía biển và có hình dáng nhọn hơn phía tầng sâu, các lớp phía đáy có xu thế ngược lại mặn phía hai bờ thấp hơn và chiều con của đường đẳng trị mặn hướng vào phía sông.

Tại thời điểm triều lên và đỉnh triều do có độ trễ của triều phía trong sông và cửa sông nên khi triều cửa sông đang lên hoặc đạt đỉnh thì có một lượng nước từ trong sông tiếp tục đẩy ra và kết quả làm cho đường đẳng trị mặn trên bề mặt tù hơn so với thời điểm triều xuống và chân triều.

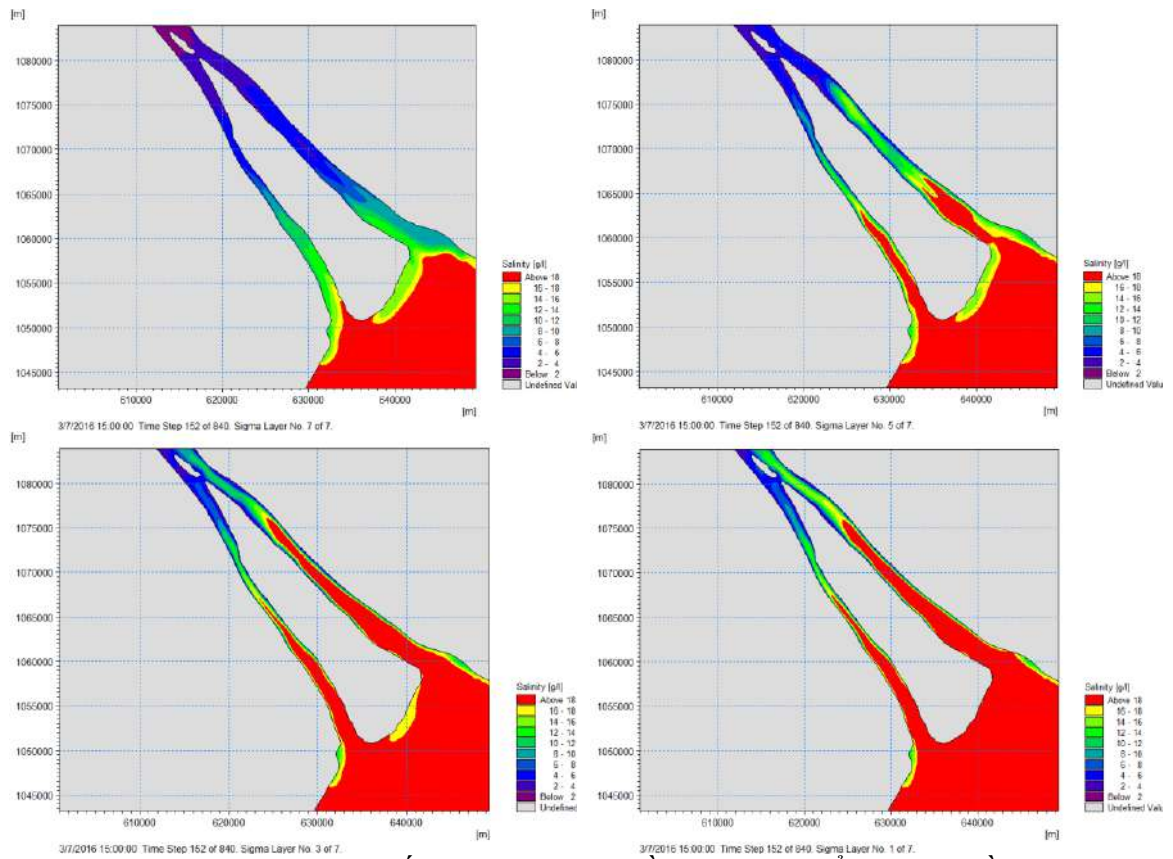




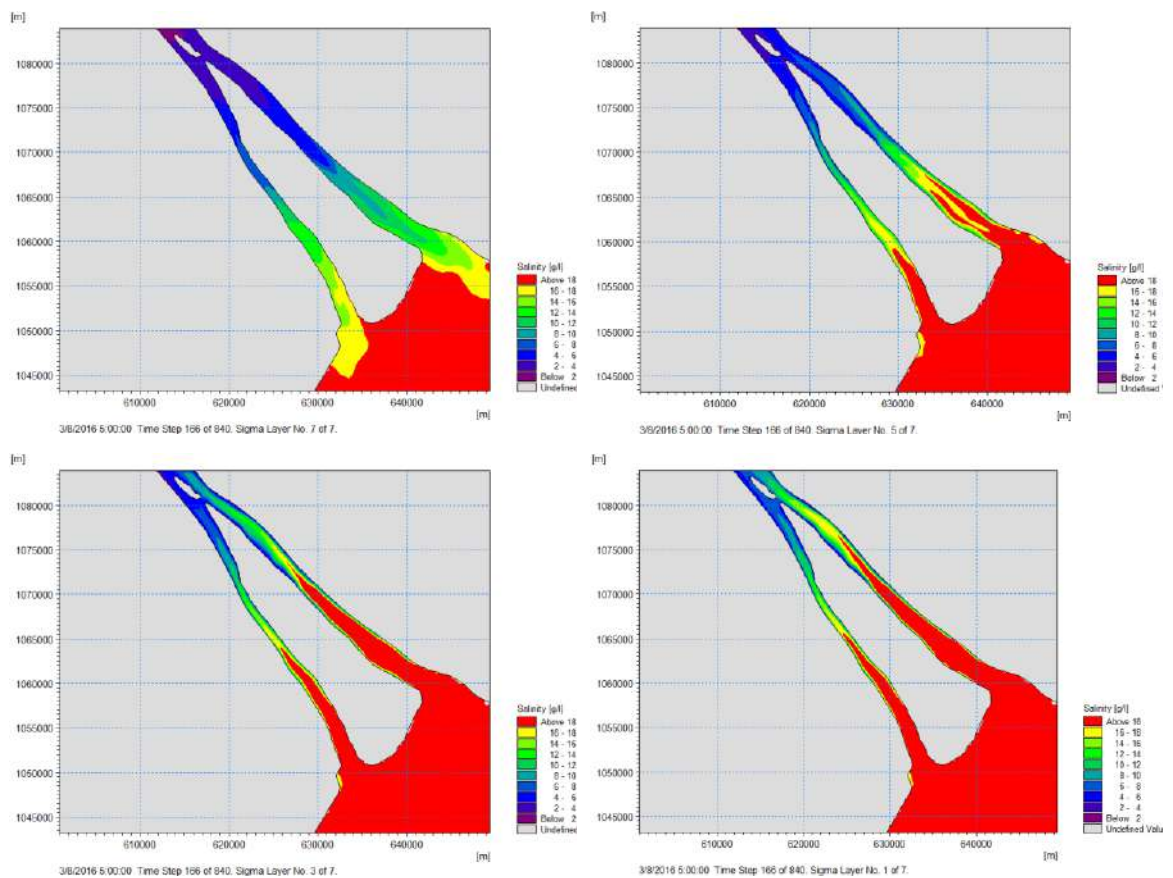
Hình 3-61: Phân bố theo các lớp chiều sâu thời điểm chân triều (thấp)



Hình 3-62: Phân bố theo các lớp chiều sâu thời điểm triều lên (nhánh cao)



Hình 3-63: Phân bố theo các lớp chiều sâu thời điểm đỉnh triều



Hình 3-64: Phân bố theo các lớp chiều sâu thời điểm triều xuống (nhánh cao)

3.3.5. Kết quả tính toán trong trường hợp nước biển dâng mùa kiệt

Với mục tiêu đánh giá tác động của biến đổi khí hậu, nước biển dâng tới đặc tính xâm nhập mặn cửa sông Hậu, trong nghiên cứu đã tính toán cho trường hợp mực nước biển dâng tại biên đầu vào phía biển, mực nước biển dâng trung bình khoảng 50cm. Từ kết quả tính toán sẽ đánh giá được sự thay đổi được cơ chế xâm nhập mặn, cơ chế phân tầng cho trường hợp hiện trạng và có biến đổi khí hậu nước biển tăng lên tại vùng cửa sông. Để có cơ sở đánh giá sẽ so sánh phân tích các kết quả cho hai trường hợp tính toán tại cùng các thời điểm đặc trưng. Kết quả trích xuất cho các thời điểm chân triều thấp, quá trình triều đang lên, đỉnh triều và quá trình triều đang xuống.

3.3.5.1. Kết quả phân tích đánh giá cho nhánh Định An

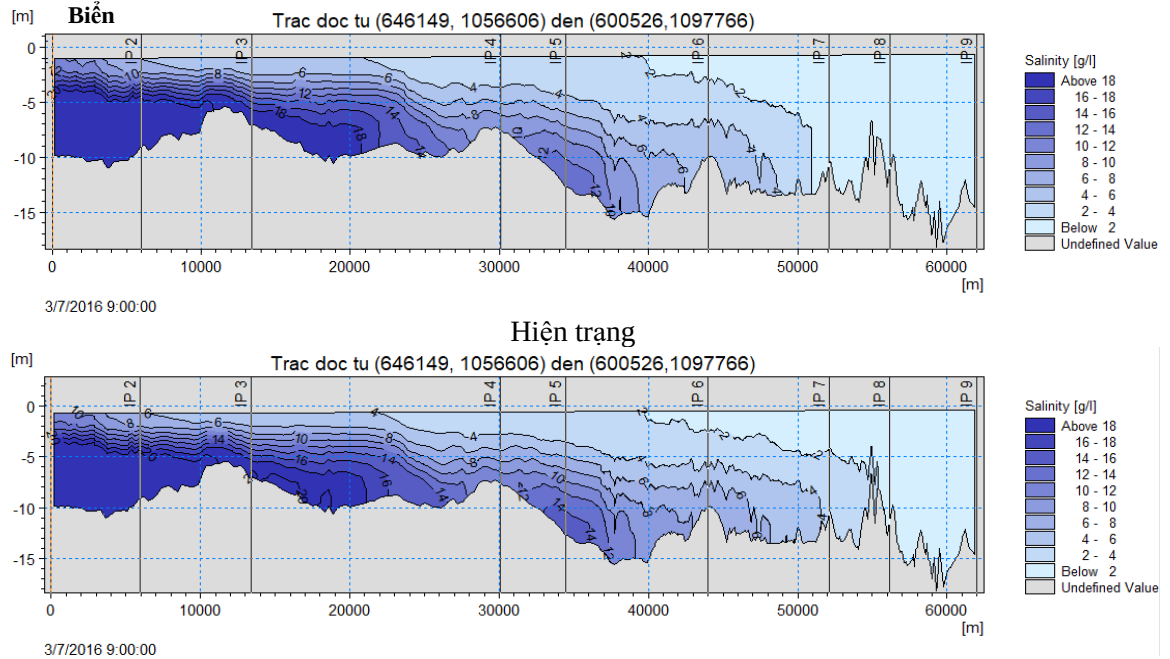
Kết quả tính toán cho thấy nước biển dâng cao tác động mạnh tới xâm nhập mặn. Xâm nhập mặn gia tăng chiều sâu và nồng độ tại các thời điểm của một con triều. Vào thời điểm chân triều thấp tác động của nước biển dâng làm phần nêm mặn (giới hạn 4g/l) phía đáy bị đẩy dịch sâu vào trong sông thêm với chiều dài khoảng 4,5km, lớp trên mặn bị đẩy sâu vào trong khoảng 1,5km. Nêm mặn trong trường hợp nước biển dâng có xu hướng tà hơn nhưng dày hơn khoảng 1,5m so với trường hợp hiện trạng.

Vào thời điểm triều lên (nhánh chân triều thấp) tác động của nước biển dâng làm phần nêm mặn (giới hạn 4g/l) phía đáy bị đẩy dịch sâu vào trong sông thêm với chiều dài khoảng 5,0km, lớp trên mặn bị đẩy sâu vào trong khoảng 1,0km. Nêm mặn trong trường hợp nước biển dâng có xu hướng tà hơn nhưng dày hơn khoảng 1,0m so với trường hợp hiện trạng.

Vào thời điểm đỉnh triều tác động của nước biển dâng làm phần nêm mặn (giới hạn 4g/l) phía đáy bị đẩy dịch sâu vào trong sông thêm với chiều dài khoảng 5,5km, lớp trên mặn bị đẩy sâu vào trong khoảng 2,5km. Nêm mặn trong trường hợp nước biển dâng có xu hướng dốc hơn nhưng dày hơn khoảng 1,5 m so với trường hợp hiện trạng.

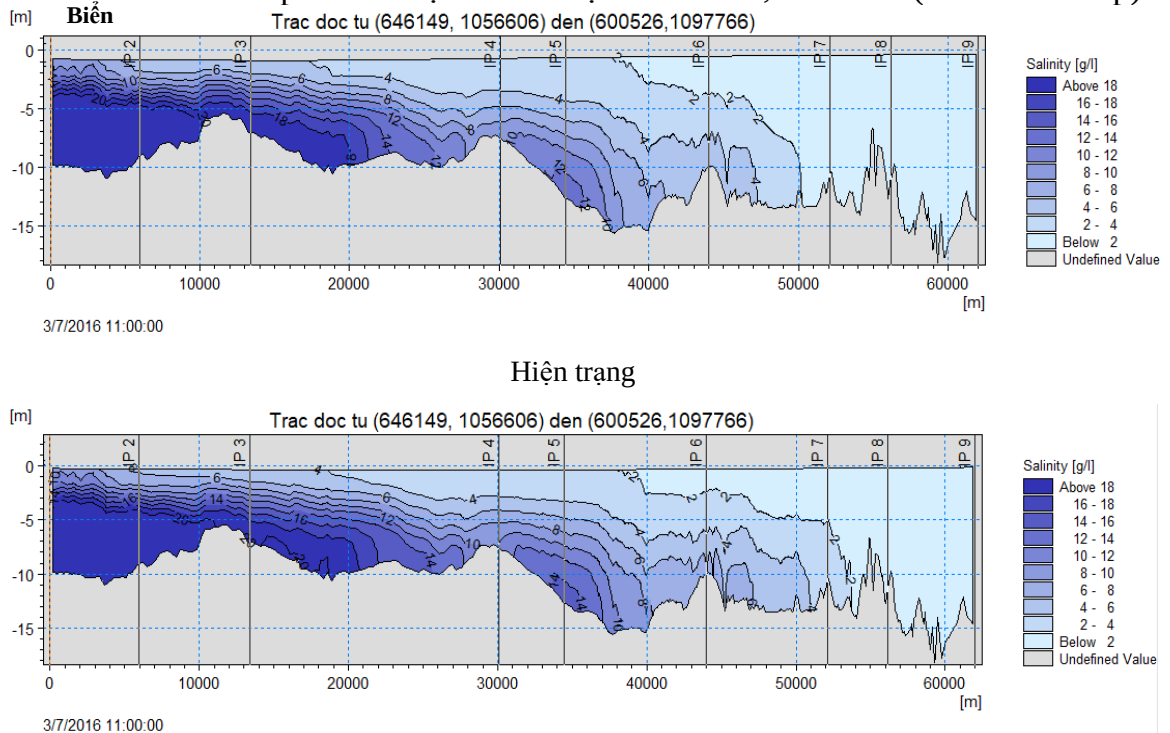
Vào thời điểm triều xuống (nhánh chân triều thấp) tác động của nước biển dâng làm phần nêm mặn (giới hạn 4g/l) phía đáy bị đẩy dịch sâu vào trong sông thêm với chiều dài khoảng 5,0km, lớp trên mặn bị đẩy sâu vào trong khoảng 3,0km. Nêm mặn trong

trường hợp nước biển dâng có xu hướng dốc hơn nhưng dày hơn khoảng 2,0 m so với trường hợp hiện trạng.



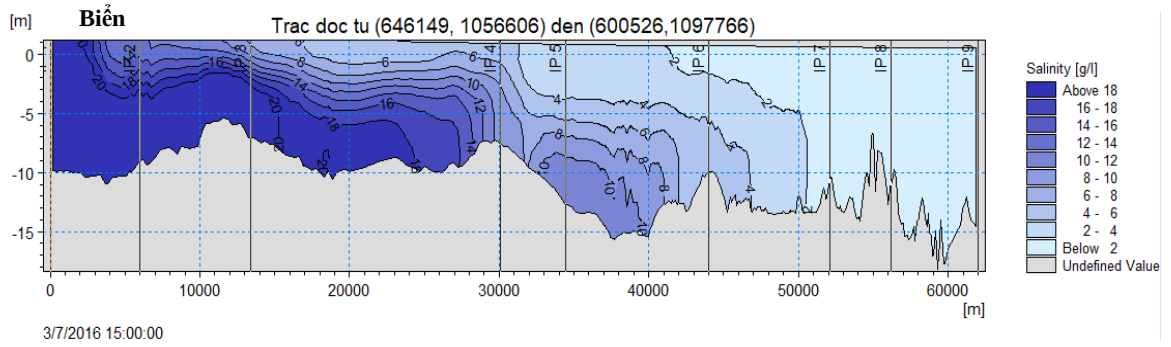
Nước biển dâng +50cm

Hình 3-65: So sánh phân bố mặn nhánh Định An - 09h, 7/3/2016 (chân triều thấp)

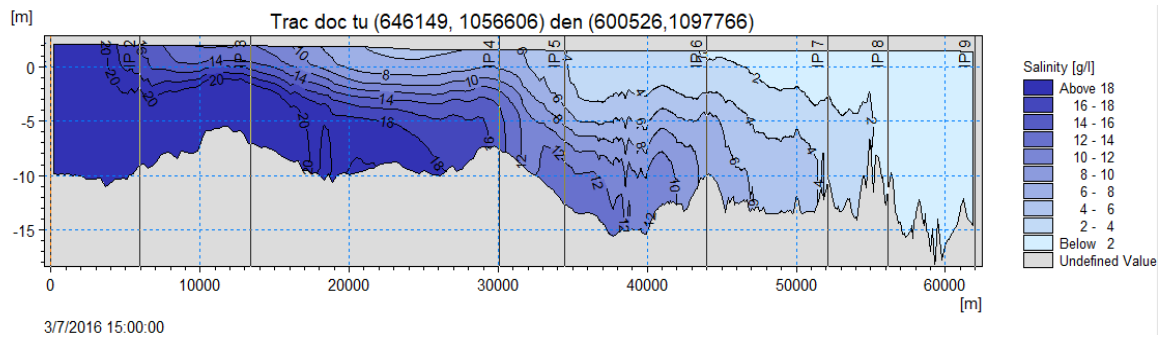


Nước biển dâng +50cm

Hình 3-66: So sánh phân bố mặn nhánh Định An - 11h, 7/3/2016 (triều lên)

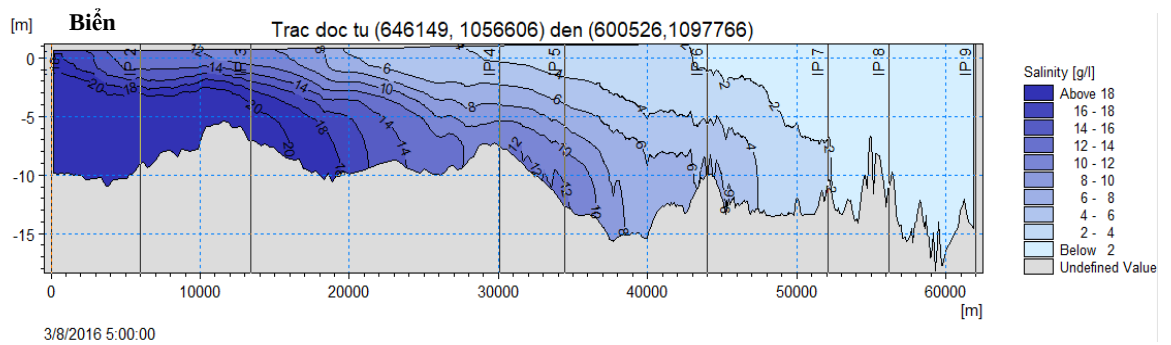


Hiện trạng

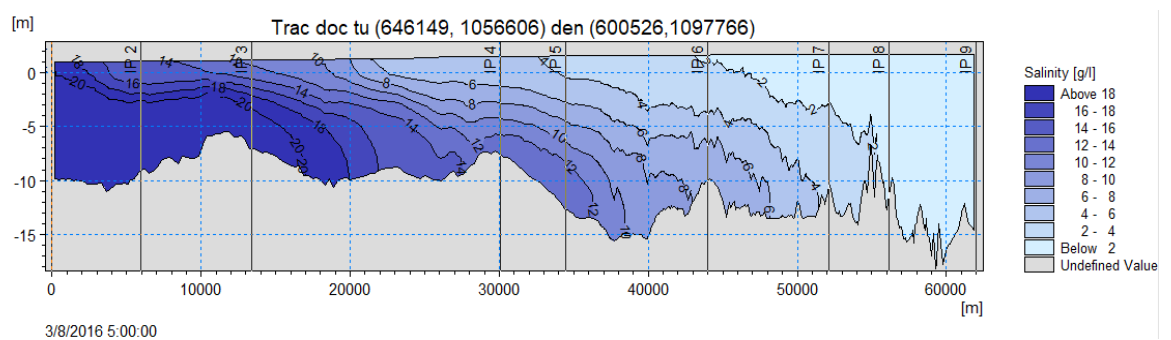


Nước biển dâng +50cm

Hình 3-67: So sánh phân bố mặn nhánh Định An -15h, 7/3/2016 (đỉnh triều)



Hiện trạng

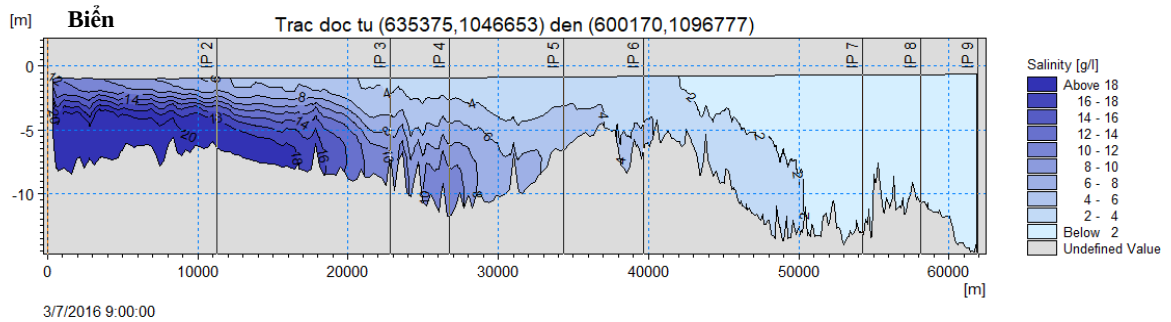


Nước biển dâng +50cm

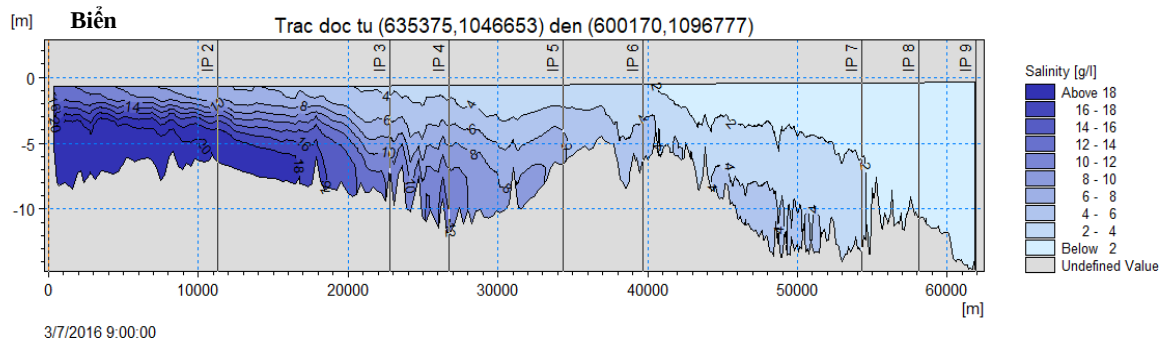
Hình 3-68: So sánh phân bố mặn nhánh Định An - 05h, 8/3/2016 (triều xuống)

3.3.5.2. Kết quả phân tích đánh giá cho nhánh Trần Đề

Vào thời điểm chân triều thấp tác động của nước biển dâng làm phần nêm mặn (giới hạn 4g/l) phía đáy bị đẩy dịch sâu vào trong sông thêm với chiều dài khoảng 2,5km, xuất hiện một khu vực mặn cục bộ 4g/l ở đáy sông với chiều dài khoảng 6,0km (có thể do tác động của địa hình đáy), lớp trên mặn hầu như không thay đổi. Nêm mặn trong trường hợp nước biển dâng có xu hướng tã hơn nhưng dày hơn khoảng 1,0m so với trường hợp hiện trạng.



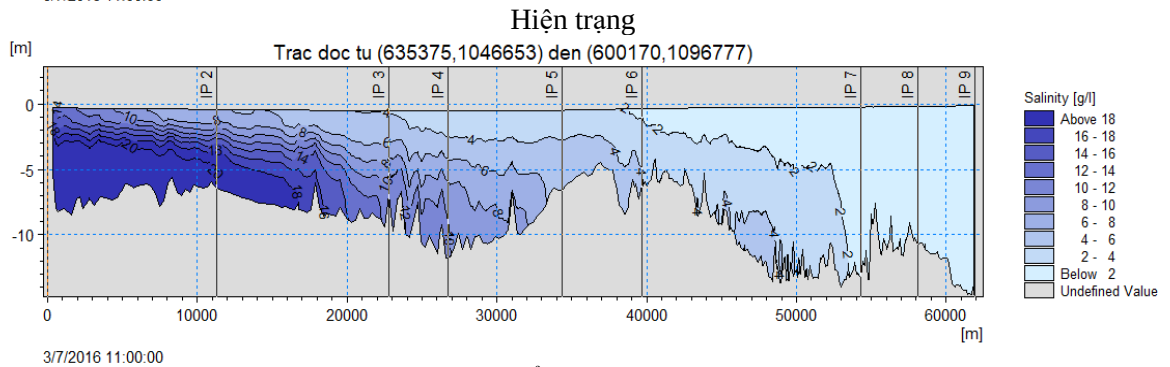
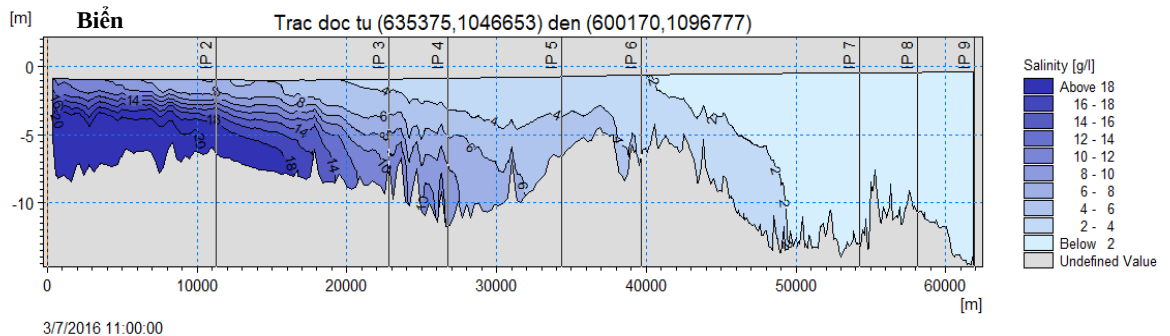
Hiện trạng



Nước biển dâng +50cm

Hình 3-69: So sánh phân bố mặn nhánh Trần Đề - 09h, 7/3/2016 (chân triều thấp)

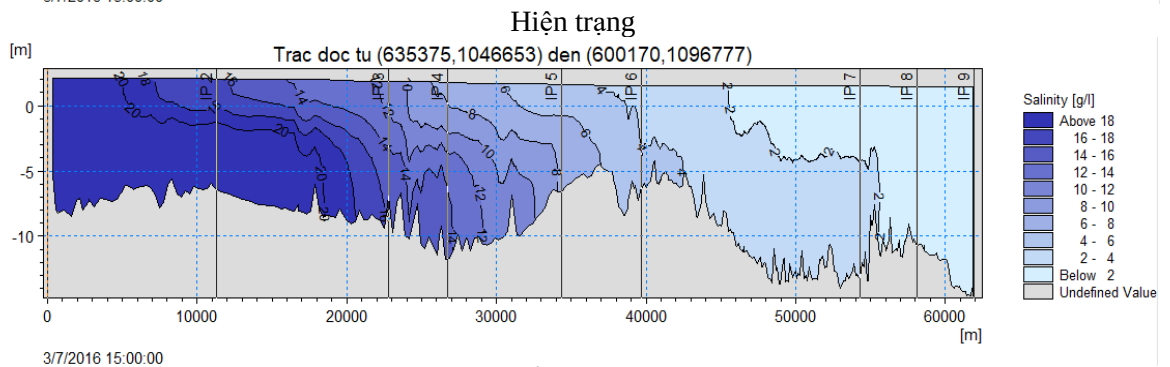
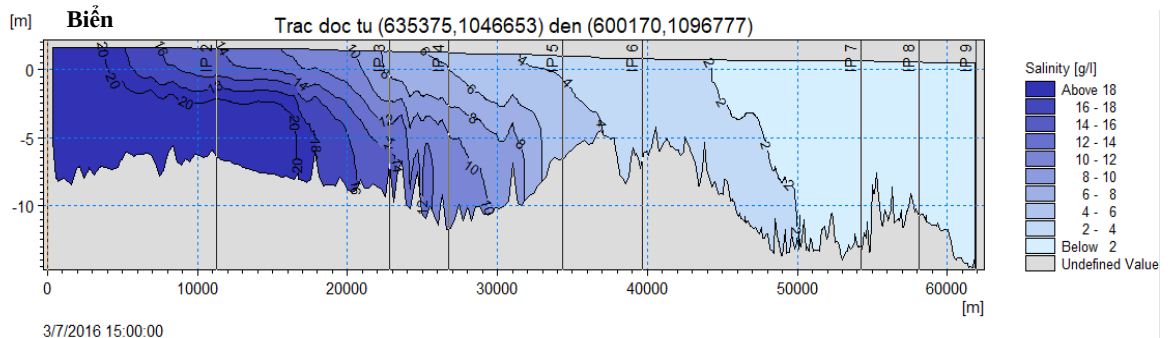
Vào thời điểm triều lên (nhánh chân triều thấp) tác động của nước biển dâng làm phần nêm mặn (giới hạn 4g/l) phía đáy bị đẩy dịch sâu vào trong sông thêm với chiều dài khoảng 2,0km, xuất hiện một khu vực mặn cục bộ 4g/l ở đáy sông với chiều dài khoảng 6,0km (có thể do tác động của địa hình đáy), lớp trên mặn bị đẩy sâu vào trong khoảng 4,0km. Nêm mặn trong trường hợp nước biển dâng có xu hướng tã hơn và dày hơn khoảng 1,0m so với trường hợp hiện trạng.



Nước biển dâng +50cm

Hình 3-70: So sánh phân bố mặn nhánh Trần Đề - 11h, 7/3/2016 (triều lên)

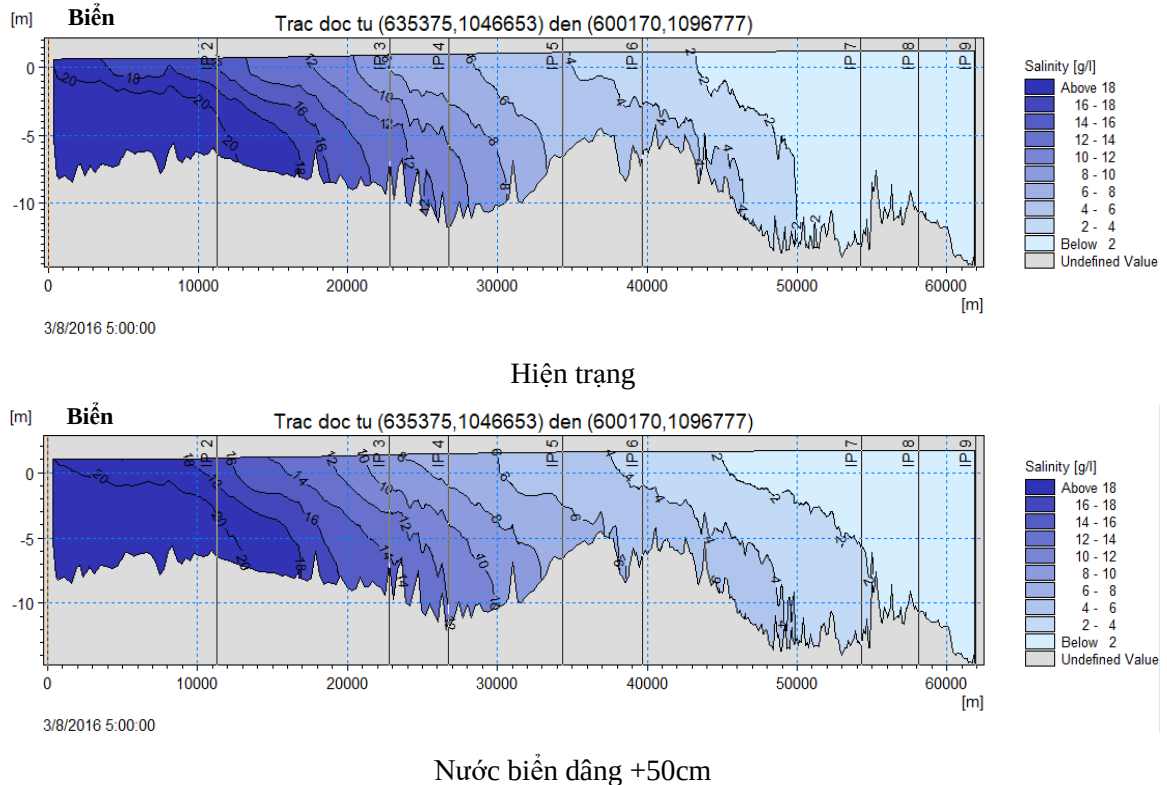
Vào thời điểm đỉnh triều tác động của nước biển dâng làm phân nêm mặn (giới hạn 4g/l) phía đáy bị đẩy dịch sâu vào trong sông thêm với chiều dài khoảng 3,5km, lớp trên mặn hầu như không thay đổi. Nêm mặn trong trường hợp nước biển dâng có xu hướng dốc hơn nhưng dày hơn khoảng 1,5 m so với trường hợp hiện trạng.



Nước biển dâng +50cm

Hình 3-71: So sánh phân bố mặn nhánh Trần Đề - 15h, 7/3/2016 (đỉnh triều)

Vào thời điểm triều xuống (nhánh chân triều thấp) tác động của nước biển dâng làm phân nêo mặn (giới hạn 4g/l) phía đáy bị đẩy dịch sâu vào trong sông thêm với chiều dài khoảng 3,0km, lớp trên mặn bị đẩy sâu vào trong khoảng 2,0km. Nêo mặn trong trường hợp nước biển dâng có xu hướng dốc hơn và dày hơn khoảng 2,0 m so với trường hợp hiện trạng.



Hình 3-72: So sánh phân bố mặn nhánh Trần Đề - 05h, 8/3/2016 (triều xuống)

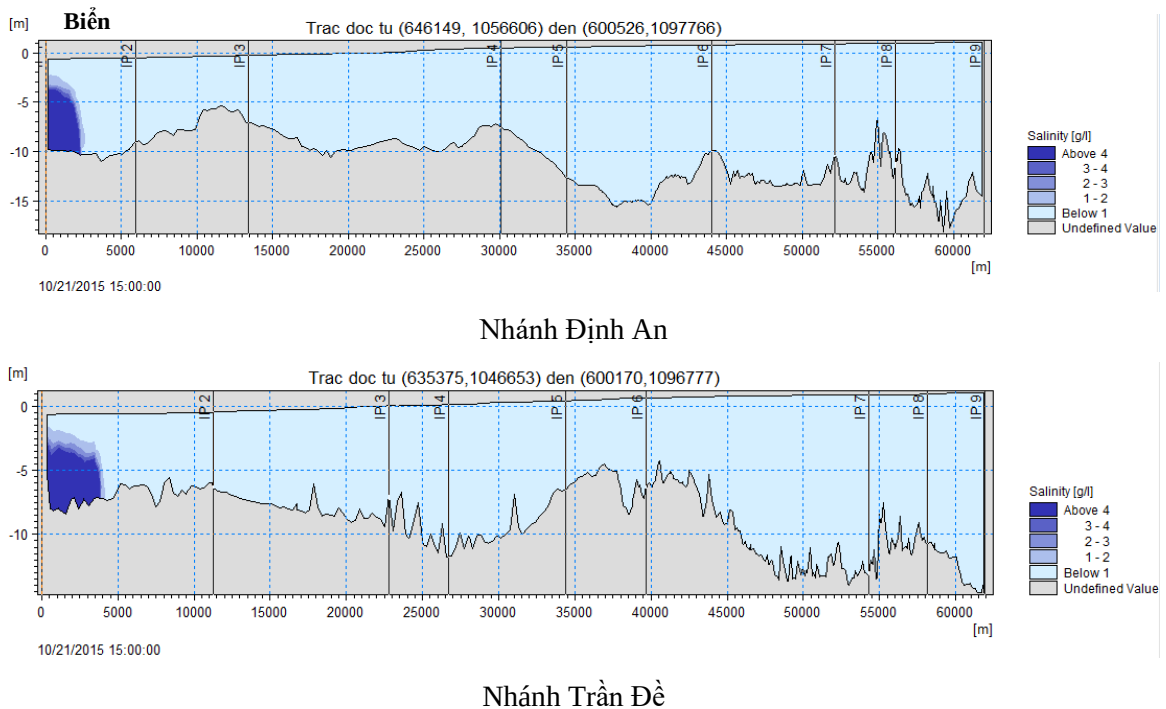
3.3.6. Kết quả tính toán cho mùa lũ

Dòng chảy sông Mê Công về mùa lũ khá lớn nên xâm nhập mặn tại các cửa sông vùng ĐBSCL không đáng kể và hầu như không có những tính toán cụ thể. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này để đánh giá một cách đầy đủ về cơ chế xâm nhập mặn cho vùng cửa sông Hậu theo các mùa trong năm thủy văn đã tính toán và phân tích cho mùa lũ và một số kết quả dưới đây sẽ cho thấy được đặc điểm phân tầng mặn trong mùa lũ tại vùng cửa sông ĐBSCL.

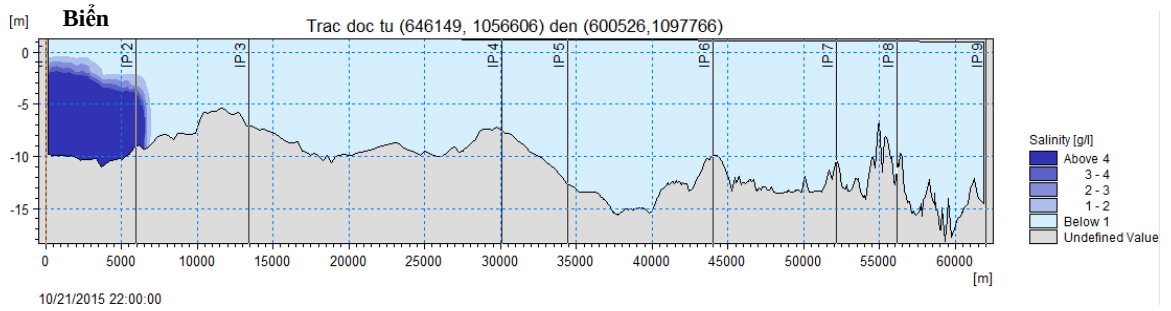
Trong mùa lũ vào các thời kỳ triều xâm nhập mặn và phân tầng mặn tại hai nhánh sông là rất yếu, hầu như không có do tác động của dòng chảy lũ từ thượng nguồn mạnh. Thời điểm chân triều thấp và quá trình triều lên của nhánh chân triều thấp hầu như xâm nhập mặn không đáng kể nồng độ mặn trên toàn nhánh sông đều

nhỏ hơn 1 g/l. Dưới tác động của dòng triều lên nồng độ mặn tăng dần lên tới đỉnh triều lúc này mặn cũng chỉ xâm nhập vào ngay vùng cửa sông nồng độ 1 g/l với chiều sâu khoảng 2,0km với nhánh Định An và khoảng 5km với nhánh Trần Đề tại thời điểm đỉnh triều và chỉ ở tầng sâu cách mặt nước khoảng 3,5m. Trong thời gian giữa hai đỉnh triều và chân triều cao xâm nhập mặn hầu như ít thay đổi phạm vi xâm nhập mặn tối đa chỉ khoảng 4,0km với nhánh Định An và khoảng 6,0km với nhánh Trần Đề và khi triều xuống thì mặn lại bị đẩy hoàn toàn ra khỏi cửa sông nồng độ mặn tại ngay vùng cửa sông lại nhỏ hơn 1 g/l và chuẩn bị cho một chu trình tiếp theo.

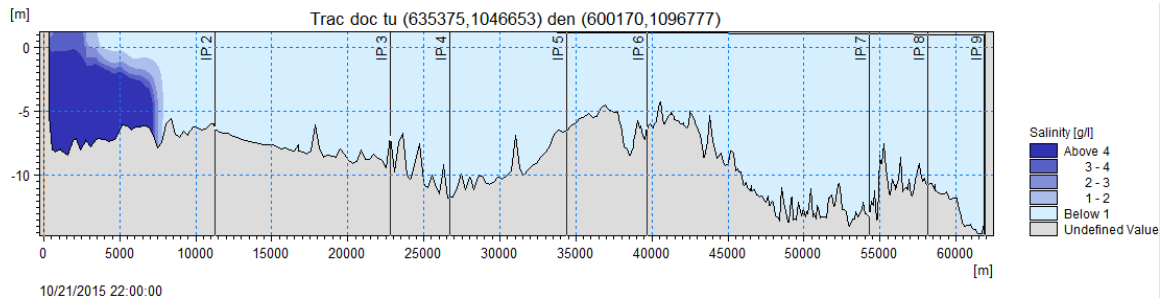
Qua phân tích xâm nhập mặn vào hai nhánh sông Định An và Trần Đề vào mùa lũ là không đáng kể và chỉ xảy ra xâm nhập vào thời điểm triều lên và đỉnh triều và khoảng cách tối đa từ biển vào trong sông là 7,0-8,0km. Kết quả tính toán cũng cho thấy hình thành nêm mặn ngắn và đường đẳng trị nồng độ mặn 1,0g/l cách mặt nước từ 0,5-3,5m và đường đẳng trị mặn khá dốc.



Hình 3-73: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 15h, 21/10/2015 (chân triều thấp)

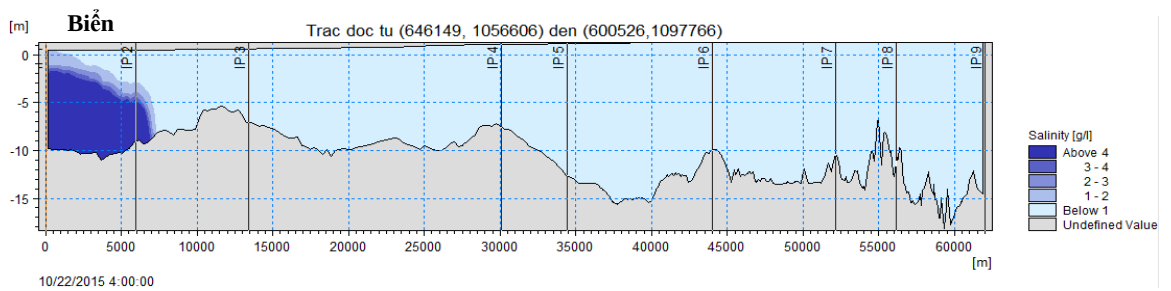


Nhánh Định An

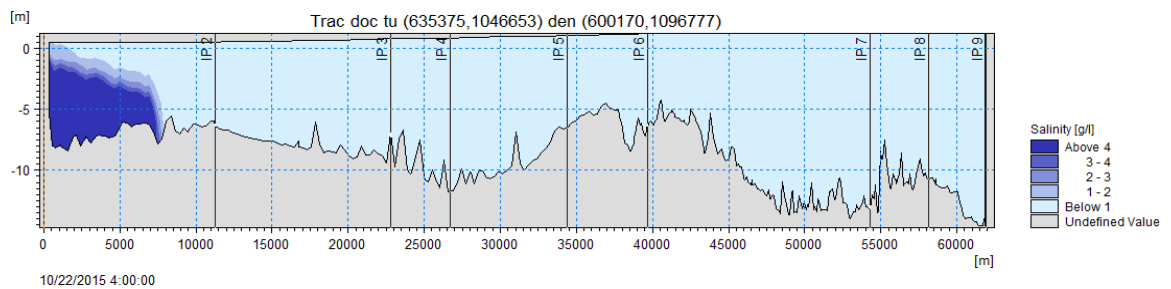


Nhánh Trần Đề

Hình 3-74: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 22h, 21/10/2015 (đỉnh triều)

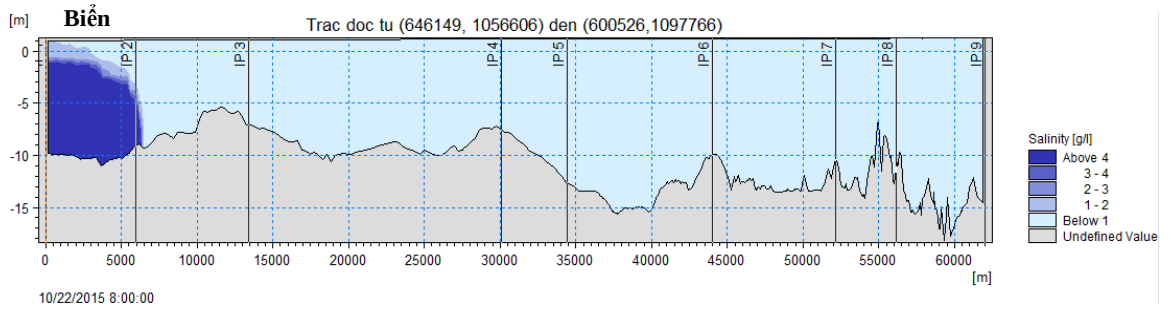


Nhánh Định An

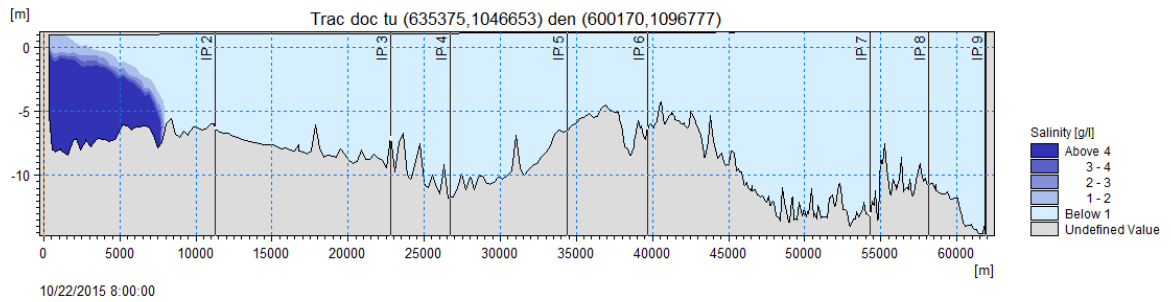


Nhánh Trần Đề

Hình 3-75: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông, 04h - 22/10/2015 (chân triều cao)

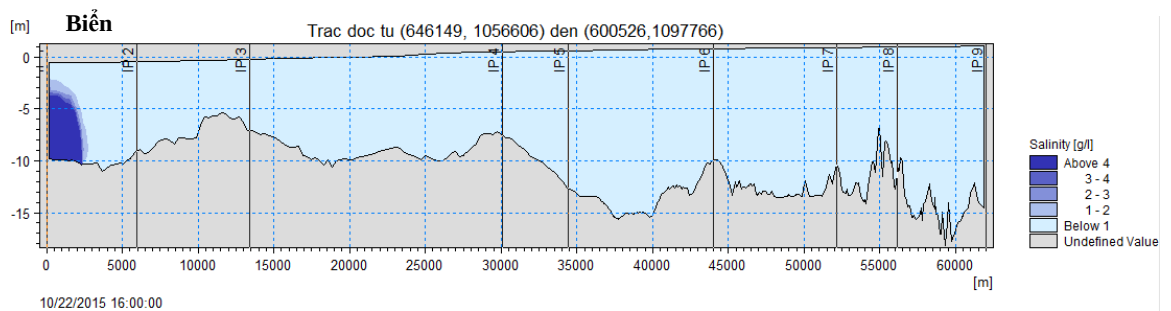


Nhánh Định An

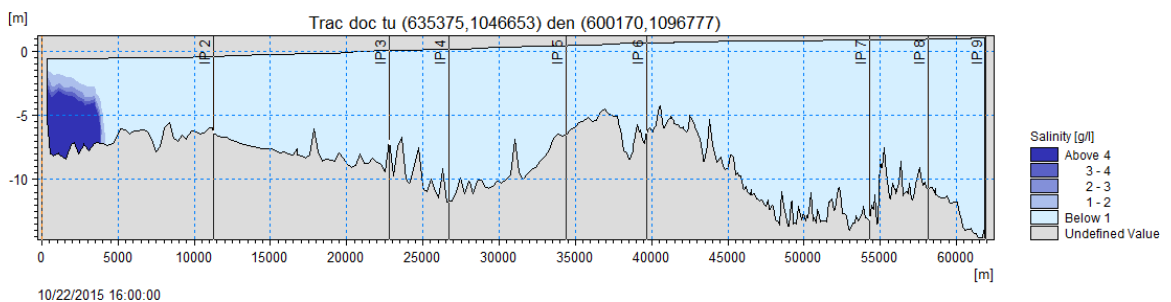


Nhánh Trần Đề

Hình 3-76: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 08h, 22/10/2015 (đỉnh triều)



Nhánh Định An



Nhánh Trần Đề

Hình 3-77: Phân bố mặn dọc hai nhánh sông - 16h, 22/10/2015 (chân triều thấp)

3.3.7. Đánh giá tác động của yếu tố địa hình tới xâm nhập mặn

Địa hình vùng cửa sông và lòng dẫn khu vực nghiên cứu là yếu tố quan trọng ảnh hưởng tới chế độ thủy lực và xâm nhập mặn. Khu vực nghiên cứu cụ thể là vùng cửa sông Hậu với hai nhánh Trần Đề và Định là khu vực sông phân lạch bởi Cù

Lao Dung. Hai nhánh sông Hậu có mặt cắt ướ́t khác nhau, nhánh sông Định An rộng, sâu hơn nhánh sông Trần Đề nên phân lưu dòng chảy trên nhánh Định An luôn lớn hơn nhánh Trần Đề cả dòng chảy sông và dòng triều xâm nhập nên qua phân tích tính toán cho thấy xâm nhập mặn trên hai nhánh sông cũng có sự khác nhau.

Về hình dáng nếm mặn trên hai nhánh sông có những khác nhau nhất định. Chiều dài xâm nhập mặn lớp dưới đáy của nhánh Định An xâm nhập sâu hơn nhánh Trần Đề trong các thời điểm khác nhau của con triều và thời điểm chân triều xâm nhập tại lớp đáy sâu hơn. Tuy nhiên, phía trên mặt lại có xu hướng ngược lại với phía đáy sâu, khoảng cách xâm nhập mặn trên nhánh Định An phía trên mặt lại nhỏ hơn nhánh Trần Đề. Hình dáng nếm mặn của nhánh Định An tà hơn so với nhánh Trần Đề.

Từ các kết quả tính toán cho thấy yếu tố địa hình đáy sông (trắc dọc đáy sông) ảnh hưởng rất nhiều đến hình dạng các đường đẳng trị mặn theo chiều sâu phân tầng. Hình dạng của nếm mặn, độ trơn thuận của các đường đẳng trị mặn có xu thế biến đổi theo địa hình trắc dọc đáy sông. Tốc độ dịch chuyển nếm mặn tại đáy sông cũng bị ảnh hưởng bởi yếu tố địa hình.

3.4. Kết luận Chương 3

Để làm rõ chi tiết cơ chế xâm nhập mặn, phân tầng mặn vùng cửa sông trong nội dung Chương 3, NCS đã xây dựng mô hình 3D (MIKE3) cho 2 nhánh của sông Hậu. Phạm vi nghiên cứu xây dựng mô hình và tính toán từ Cần Thơ ra tới biển. Mô hình được hiệu chỉnh về thủy lực với các số liệu thủy văn trên sông, hiệu chỉnh mặn với số liệu thực đo mặn trong các các thời điểm HWS và LWS. Một số kết quả nghiên cứu chính của Chương 3 gồm:

Xây dựng thành công được mô hình thủy lực và xâm nhập mặn 3D chi tiết cho cửa sông Hậu từ Cần Thơ ra đến biển.

Tính toán và phân tích đánh giá được cơ chế xâm nhập mặn trong mùa kiệt dọc theo các chiều không gian (3 chiều).

Mô tả chi tiết được hình dáng nếm mặn (phạm vi, chiều dài, chiều dày, độ dốc và nồng độ của nếm mặn dọc theo các nhánh sông. Xác định được sự hình thành, tồn tại và phát triển của nếm mặn tại hai nhánh của sông Hậu.

Bước đầu tính toán được khả năng thay đổi của xâm nhập mặn, phân tầng mặn khi có tác động của nước biển dâng.

Từ kết quả tính toán, phân tích đánh giá về cơ chế xâm nhập mặn và phân tầng mặn có một số nhận xét sau:

Có sự phân tầng độ mặn tại cửa sông Hậu, tuy nhiên phân tầng không xảy ra đồng thời tại cửa sông và không xảy ra tại mọi thời điểm, phân tầng mặn rõ nét tại các thời điểm nước đứng hay khi chuyển dòng dòng chảy.

Hiện tượng phân tầng mặn, nêm mặn tại các thời điểm trong ngày của các thời đoạn thủy triều khác nhau (triều kém, triều trung bình, triều cao) theo không gian tính toán. Trong thời đoạn triều kém hiện tượng phân tầng mặn rõ nét hơn thời đoạn triều cao, thời điểm triều xuống, chân triều LWS phân tầng mạnh hơn khi đỉnh triều.

Nước biển dâng sẽ đẩy nêm mặn vào sâu trong sông, khoảng cách tăng thêm phụ thuộc vào các thời điểm triều trong ngày, các thời đoạn triều khác nhau trong chu kỳ triều, xu thế, tốc độ phát triển nêm mặn vào phía trong sông khác nhau giữa lớp trên mặt và dưới sâu và khoảng cách tăng thêm tối đa khoảng 7-8km đối với lớp đáy và lớp mặt khoảng 2-4km.

Yếu tố địa hình đáy sông (trắc dọc đáy sông) ảnh hưởng rất nhiều đến hình dạng các đường đẳng trị mặn theo chiều sâu phân tầng. Hình dạng của nêm mặn, độ trơn thuận của các đường đẳng trị mặn có xu thế biến đổi theo địa hình trắc dọc đáy sông.

CHƯƠNG 4: ĐỊNH HƯỚNG CƠ SỞ ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP KHAI THÁC NƯỚC HỢP LÝ CHO VÙNG CỬA SÔNG VEN BIỂN ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

4.1. Khác biệt của kết quả nghiên cứu so với tính toán xâm nhập mặn hiện nay

Trong những năm gần đây, biến đổi khí hậu và nước biển dâng tiếp tục diễn biến phức tạp, gây ra nhiều hiện tượng thời tiết cực đoan, ảnh hưởng đến sinh kế và đời sống của người dân vùng Đồng bằng sông Cửu Long. Thời gian gần đây từ năm 2016 đến nay tình hình nguồn nước diễn biến phức tạp, xâm nhập mặn vào sâu trong nội đồng làm ảnh hưởng nặng nề tới phát triển sản xuất nông nghiệp, cấp nước sinh hoạt và đời sống nhân dân vùng ĐBSCL. Vào những năm đặc biệt khô hạn thiếu nước ngọt như mùa khô năm 2015-2016, 2019-2020 xâm nhập mặn vào vùng cửa sông ven biển rất khốc liệt dẫn đến thiệt hại lớn về sản xuất nông nghiệp, đặc biệt là thiếu nước sinh hoạt cho một số tỉnh ven biển và nhiều tỉnh ven biển ĐBSCL đã phải ban bố tình huống thiên tai khẩn cấp.

Trước đòi hỏi của yêu cầu phục vụ sản xuất ngày càng cao cùng với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, công nghệ tính toán trong khoảng 10 năm trở lại đây công tác nghiên cứu về mặn phục vụ cho các nghiên cứu, quy hoạch, điều hành sản xuất như: dự báo mặn, dự báo nguồn nước, tác động của nước biển dâng, khai thác thượng nguồn đến xâm nhập vùng cửa sông ven biển ĐBSCL đã được nhiều đơn vị, nhiều nhà khoa học trong và ngoài nước nghiên cứu thực hiện.

Nghiên cứu về xâm nhập mặn hiện nay chủ yếu là dùng mô hình toán, kết hợp với các tài liệu khảo sát, đo đạc hiện trường. Mô hình thường dùng trong nghiên cứu hiện nay là mô hình một chiều (1D) với ưu thế nổi trội trong nghiên cứu là xây dựng sơ đồ tính đơn giản, phạm vi tính toán rộng, thời gian xử lý, tính toán nhanh, yêu cầu thiết bị vừa phải, số liệu đầu vào đơn giản và kết quả tính toán khá tốt.

Trong quá trình nghiên cứu các vấn đề về thủy động lực, xâm nhập mặn cho vùng cửa sông ven biển ĐBSCL, ĐN-SG, nghiên cứu sinh cũng đã nghiên cứu tính toán thủy lực, xâm nhập mặn bằng mô hình một chiều. Tuy nhiên, nghiên cứu sinh nhận thấy để đi sâu về cơ chế xâm nhập mặn đặc biệt là vấn đề phân tầng mặn thì mô hình một chiều chưa đáp ứng được.

Trước đây, do các số liệu đo đạc thực tế tại hiện trường chưa đáp ứng, các mô phỏng tính toán về mặn chủ yếu thực hiện bằng mô hình một chiều... nên nhiều ý kiến cho rằng do yếu tố thủy triều tại vùng cửa sông Mê Công có biên độ cao nên cơ chế dòng chảy tại các vùng cửa sông này chủ yếu là hiện tượng xáo trộn hoàn toàn hoặc phân tầng rất yếu. Tuy nhiên, để làm rõ luận điểm này hầu như chưa có những tính toán chi tiết cho các nhánh sông Cửu Long. Từ các số liệu đo đạc mặn theo phân tầng thời gian gần đây đã bước đầu chỉ ra có sự phân tầng tại một số thời điểm nước đứng hay chuyển chiều dòng chảy. Đồng thời, thực tế hiện nay một số khu vực người dân và một số cơ quan chuyên môn cũng đã đo đạc mặn trên sông để lấy nước phù hợp cho nhu cầu. Tại cống Xuân Hòa, thuộc Tiền Giang cũng đã vận hành cống để lấy nước ngọt tầng mặt trong một số thời điểm.

Để trả lời những câu hỏi về cơ chế xâm nhập mặn, phân tầng mặt tại vùng cửa sông ĐCSCL trong nghiên cứu này đã có những mô phỏng tính toán khá chi tiết. Kết quả tính toán từ mô hình 3D đã phản ánh cơ bản đầy đủ của sự hình thành, phát triển và tồn tại, hình dạng cơ bản của phân bố mặn theo không gian. Với kết quả tính toán chi tiết cho từng lớp chiều sâu khác nhau sẽ cho kết quả thực tế chính xác hơn khi tính bằng mô hình hình một chiều với kết quả tính là trung bình tại một mặt cắt theo thời gian. Kết quả tính nồng độ mặn trung bình theo mặt cắt trong mô hình một chiều thì sẽ thiên về an toàn trong lấy nước tuy nhiên sẽ bỏ mất nhiều cơ hội lấy và sử dụng nguồn nước với các nồng độ mặn khác nhau theo thời gian, không gian dọc sông, độ sâu, tại từng vị trí trên mặt bằng...

4.2. Lựa chọn khả năng lấy nước theo không gian và thời gian

4.2.1. Lựa chọn thời điểm lấy nước

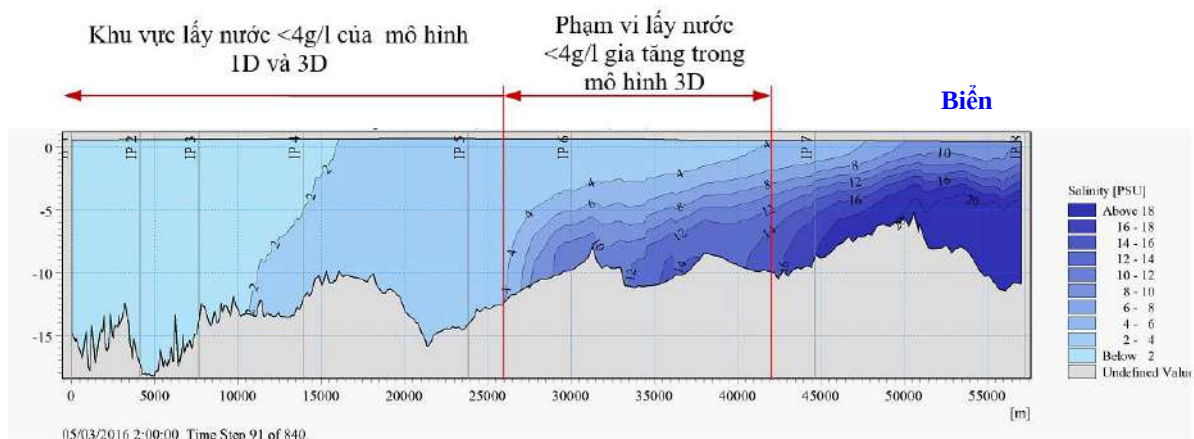
Với thực trạng sản xuất của vùng ven biển ĐBSCL là nông nghiệp, nuôi trồng thủy sản thì mục đích cuối cùng của công tác nghiên cứu tính toán xâm nhập mặn là xác định được khả năng lấy được nguồn nước ngọt hoặc có các độ mặn phù hợp khác nhau cho nuôi trồng thủy sản...tại các thời gian (thời đoạn, thời điểm) khác nhau trong mùa kiệt, trong chu kỳ triều, trong ngày thậm chí là theo từng giờ trong ngày. Kết quả mô phỏng tính toán từ mô hình 3D xác định được nồng độ mặn theo từng thời

điểm trong con triều, từng thời kỳ triều và qua đó lựa chọn được thời điểm lấy được nước có nồng độ mặn phù hợp theo yêu cầu sản xuất.

4.2.2. Khả năng lấy nước theo chiều dọc và chiều sâu

Cũng tương tự như tính toán mặn theo mô hình 1D là xác định được thời điểm và khả năng lấy nước dọc theo sông. Như phân tích ở phần trên nếu dùng mô hình 1D thì sẽ bỏ qua nhiều vị trí dọc theo sông về phía hạ du có thể lấy được nước ngọt và nếu tính bằng mô hình 3D thì sẽ gia tăng được khoảng cách có thể lấy được nước ngọt, đây là một kết quả rất ý nghĩa vào thực tiễn đặc biệt trong những thời điểm xâm nhập mặn ngày càng gia tăng như hiện nay.

Dưới đây là minh họa gia tăng khả năng chiều dài lấy được nước ngọt dọc theo sông (thời kỳ triều xuống) nếu dùng mô hình 3D thì phạm vi gia tăng lấy được nước có nồng độ mặn $<4\text{g/l}$ (hớt ngọt) có chiều dài xuôi về hạ du khoảng 15km với các lớp nước tầng trên có độ sâu từ mặt nước xuống khoảng từ 0-5,0m.



Hình 4-1: Minh họa phạm vi lấy nước nồng độ mặn $<4\text{g/l}$ khi sử dụng mô hình 3D

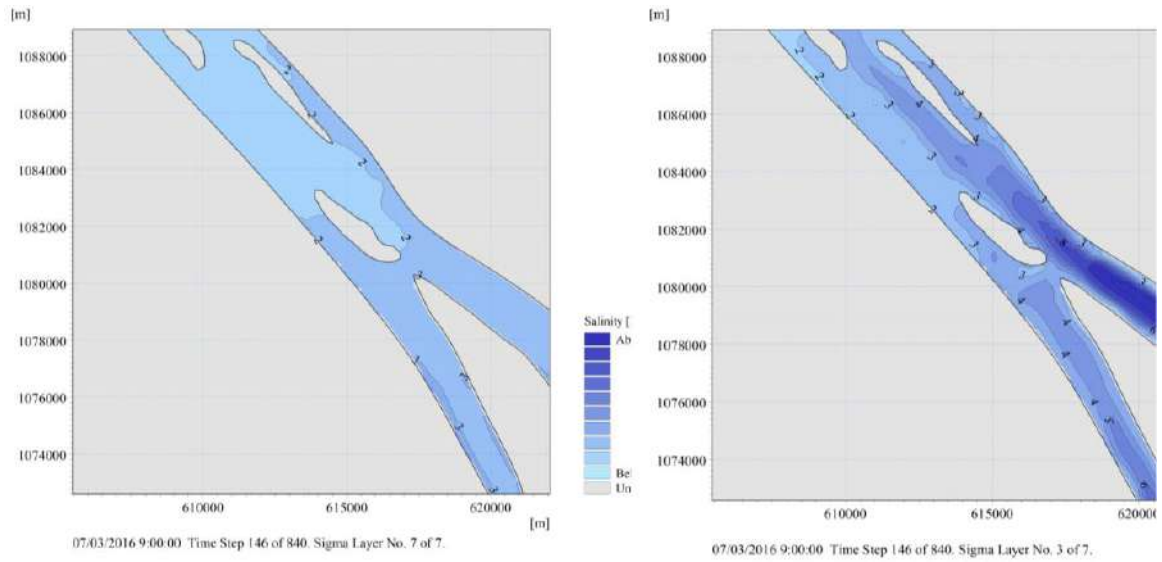
Tại vùng cửa sông ven biển hiện nay sản xuất khá đa dạng ngoài sản xuất nông nghiệp thì nuôi trồng thủy sản nước lợ cũng là một thế mạnh và dễ thích nghi với tình hình hạn mặn hiện nay. Mỗi loài vật nuôi có yêu cầu về độ mặn khác nhau và trong từng thời kỳ sinh trưởng khác nhau thì cũng có yêu cầu về nồng độ mặn khác nhau do đó qua kết quả tính toán theo phân tầng mặn có thể lựa chọn lấy được nước theo như yêu cầu tại các độ sâu thích hợp.

4.2.3. Lựa chọn vị trí lấy nước trên mặt bằng

Việc lấy nước trên mặt bằng hiện nay có một ý nghĩa rất quan trọng đặc biệt đối với một số trường hợp yêu cầu lấy nguồn nước có chất lượng nước tốt cho nuôi trồng

thủy sản. Kết quả tính toán từ mô hình 3D theo mặt bằng phương x,y cho phép tính toán để lấy được nguồn nước có nồng độ mặn khác nhau theo yêu cầu tại các vị trí khác nhau trên mặt bằng theo thời gian.

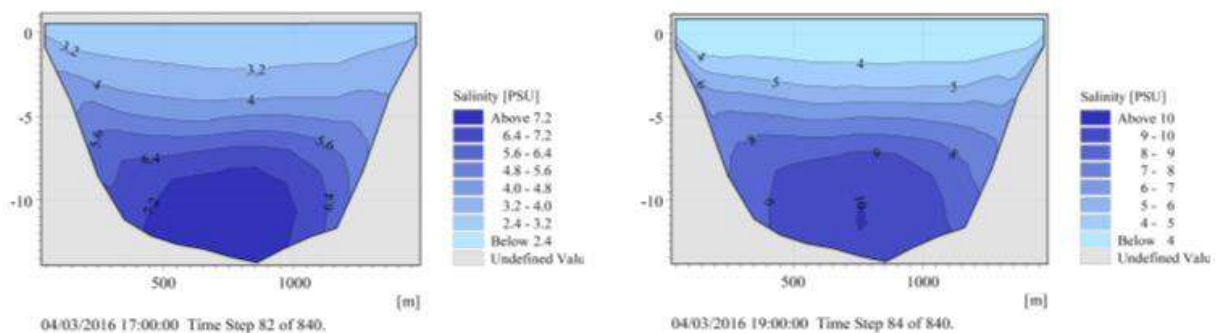
Hình ảnh minh họa dưới đây tại khu vực sông Hậu xung quanh mũi Cù Lao Dung trên mặt bằng của các lớp độ sâu khác nhau có thể lấy được nước có nồng độ mặn dao động với biên độ dao động khá lớn từ 2-8g/l.



Hình 4-2: Minh họa nồng độ mặn trên mặt bằng theo các tầng sâu

4.2.4. Khả năng lấy nước trên mặt cắt ngang

Từ hai phân tích khả năng lấy nước theo mặt bằng, chiều dọc và độ sâu khác nhau từ kết quả của mô hình 3D đã cho thấy toàn bộ khả năng ứng dụng kết quả nghiên cứu vào thực tế. Kết quả tính toán phân tích cho thấy trên mặt cắt ngang sự thay đổi về nồng độ mặn cũng đồng nhất với cắt dọc và mặt bằng. Lựa chọn vị trí lấy nước có nồng độ mặn theo yêu cầu trên theo chiều ngang và chiều sâu trên mặt cắt ngang sẽ bổ sung đầy đủ hơn cho việc khai thác kết quả nghiên cứu vào thực tế.



Hình 4-3: Minh họa nồng độ mặn trên mặt cắt ngang sông

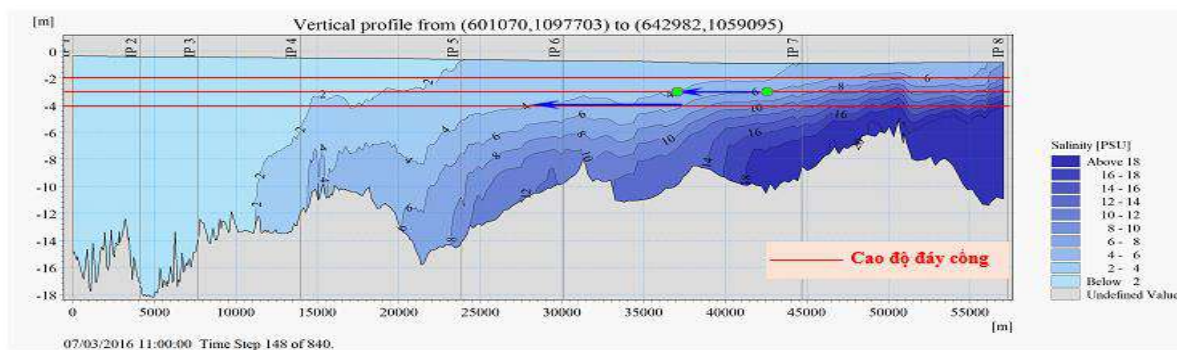
4.3. Ứng dụng vào trong thiết kế, vận hành công trình

4.3.1. Ứng dụng vào thiết kế, nâng cấp vận hành công kiểm soát mặn

Công kiểm soát mặn là một trong những công trình quan trọng trong hệ thống công trình kiểm soát mặn cho vùng ven biển ĐBSCL. Trước đây, theo yêu cầu của chương trình ngọt hóa các cống chủ yếu được xây dựng một chiều để ngăn mặn, giữ ngọt nhưng đến thời điểm gần đây, hiện nay và dự kiến trong tương lai các cống sẽ có chức năng kiểm soát mặn và có thể vận hành để đáp ứng đa mục tiêu của yêu cầu sản xuất.

Với kết quả tính toán phân tầng mặn dọc sông cho thấy việc lấy nước phục vụ sản xuất có nồng độ mặn khác nhau tại một vị trí đặt cống là có thể thực hiện được và yếu tố quyết định nồng độ mặn trong nước lấy vào phụ thuộc vào hai yếu tố là cao trình đáy cống và cửa van cống. Với cao độ đáy cống thông thường hiện nay thường được thiết kế có cao độ đáy từ -2,0m đến -4,0m do đó nếu căn cứ vào yêu cầu thực tế của nguồn nước cấp sản xuất có thể lựa chọn cao trình đáy phù hợp. Hình minh họa dưới đây cho thấy nếu cho cao trình đáy cống -3,0m thì khả năng lấy được nước có nồng độ mặn <4g/l giảm khoảng 7,0km so với cao trình đáy cống là -2,0m và nếu cao trình đáy cống là -4,0m thì chiều dài giảm khoảng 8km so với cao trình đáy cống là -3,0m.

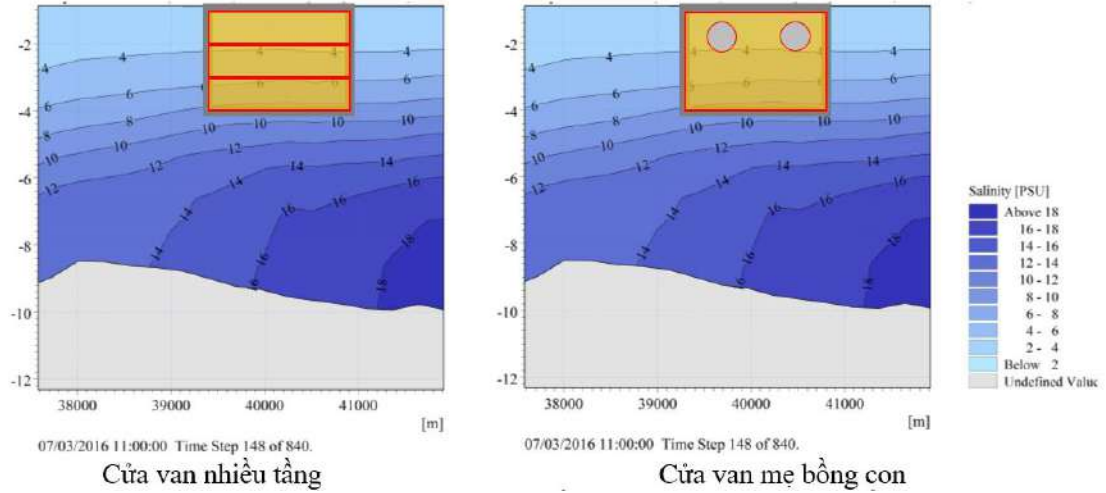
Biển



Hình 4-4: Minh họa về phân tầng mặn và bố trí cao độ đáy lấy nước

Ngoài việc chọn cao trình đáy cống thì cấu tạo cửa van cống và vận hành đóng mở cửa van cũng quyết định tới việc lấy được nguồn nước có nồng độ mặn theo yêu cầu tại từng thời điểm. Để lấy nước theo chiều sâu cửa van có thể thiết kế thành nhiều nấc cửa, cửa van mẹ bông con (cửa van con trong cửa van mẹ) để có thể vận hành cường bức thay đổi cao trình lấy nước hoặc hút nước ngọt. Đối với các cống hiện

trạng, đặc biệt là các cống ngăn mặn xây dựng trước đây với hệ thống cửa van tự động một chiều thì giải pháp nâng cấp, thay thế cửa van là một giải pháp khả thi và hiệu quả.



Hình 4-5: Minh họa cửa van nhiều lớp và cửa van mẹ bông con

4.3.2. Ứng dụng vào thiết kế trạm bơm lấy nước phục vụ sản xuất

Các kết quả khảo sát thực tế hiện trường và nghiên cứu về mặn từ mô phỏng mô hình một chiều và đặc biệt các kết quả mô hình 3D cho thấy xâm nhập mặn trên sông phụ thuộc vào quá trình thủy triều và với các thời điểm thủy triều khác nhau thì nồng độ mặn sẽ biến thiên theo mặt bằng, dọc sông, và chiều sâu và ngay tại một khu vực mặn cũng có những biến động đáng kể.

Để lấy được nước có nồng độ mặn theo yêu cầu phù hợp thì giải pháp trạm bơm nổi di động là một lựa chọn thông minh, khả thi và phù hợp đặc biệt cho vùng có hệ thống sông rạch thuận lợi tại ĐBSCL. Trên cơ sở kết quả đo đạc mặn thực tế tại hiện trường, kết hợp với kết quả tính toán từ mô hình 3D sẽ xác định được nồng độ mặn tại từng thời điểm, từng vị trí theo không gian với các kịch bản khác nhau trên cơ sở đó sẽ xây dựng được kế hoạch hoạt động, di chuyển của trạm bơm để lấy được nguồn nước có độ mặn phù hợp. Trạm bơm có thể di chuyển theo mặt bằng trên cùng một khu vực lấy nước và có thể di chuyển theo dọc sông đặc biệt vào các thời điểm triều xuống để có thể lấy được nước phù hợp. Với kết quả tính toán từ mô hình 3D thì ngoài việc trạm bơm di động trên mặt bằng thì có thể thiết kế hệ thống ống hút di động theo chiều sâu dòng chảy để cũng có thể lấy được nước theo yêu cầu.



Hình 4-6: Trạm bơm nổi, di động Xuân Hòa, tỉnh Tiền Giang

4.4. Kết luận Chương 4

Từ các kết quả tính toán và nghiên cứu về cơ chế xâm nhập mặn theo không gian và thời gian trong nghiên cứu này cho thấy khả năng ứng dụng kết quả nghiên cứu vào thực tế là rất tốt. Các kết quả nghiên cứu tính toán có thể xác định được không gian và thời gian có thể lấy nước với các nồng độ mặn khác nhau tại các cửa sông. Đây là kết quả rất cần và phù hợp với tình hình sản xuất nông nghiệp, thủy sản hiện nay tại vùng cửa sông ven biển ĐBSCL, đặc biệt hiện nay và trong thời gian tới đang và sẽ có những điều chỉnh về sản xuất phù hợp theo xu thế thuận thiên.

Kết quả trong nghiên cứu cũng chỉ ra được sự khác biệt theo hướng nâng cao độ chính xác so với các tính toán xâm nhập mặn đã thực hiện trước đây bằng mô hình 1D. Trên cơ sở tính toán xâm nhập mặn 3D đã chỉ ra được khả năng và cơ hội lấy nước ngọt, hay nước có nồng độ phù hợp tăng hơn so với các nghiên cứu đã có.

Từ các kết quả nghiên cứu tính toán kết hợp với kinh nghiệm tích lũy trong thực tế của nghiên cứu sinh đối với vùng ĐBSCL và thực tiễn công trình hiện có, trong nội dung Chương 4 đã định hướng cơ sở đề xuất giải pháp khai thác nước hợp lý cho vùng cửa sông ven biển ĐBSCL (ý tưởng thiết kế, nâng cấp, hướng điều chỉnh cách thức vận hành công trình theo yêu cầu nồng độ mặn phù hợp với yêu cầu sản xuất khác nhau tại vùng cửa sông ĐBSCL). Các ý tưởng này chắc chắn sẽ áp dụng được vào thực tế dựa trên các nghiên cứu, tính toán chi tiết sâu hơn cho từng vùng, từng cửa sông và yêu cầu phục vụ sản xuất.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Xâm nhập mặn là một hiện tượng tự nhiên lặp lại hàng năm tại vùng cửa sông ven biển ĐBSCL. Tác động của xâm nhập mặn rất lớn đến sản xuất nông nghiệp, thủy sản, cấp nước sinh hoạt cho người dân vùng ven biển. Xâm nhập mặn vào trong sông phụ thuộc vào thủy triều ngoài biển, mực nước thượng nguồn về và sử dụng nước trong nội vùng. Trong những năm gần đây, mặn đã và đang ngày càng trở thành thách thức lớn đối với vùng ven biển, nhiều năm xâm nhập mặn sâu vào trong nội đồng, điển hình là năm 2016 và gần đây nhất là mùa khô 2020. Để đối phó, ứng phó với xâm nhập mặn hiện nay có rất nhiều giải pháp như công trình kiểm soát mặn, điều chỉnh sản xuất, lấy và trữ nước ngọt trong hệ thống vào những thời điểm thích hợp ... Công tác nghiên cứu mặn vùng cửa sông nói chung và vùng ven biển ĐBSCL nói riêng đã được thực hiện từ lâu và gần đây đã đạt được các kết quả khá tốt. Hiện nay, công tác tính toán nghiên cứu về mặn chủ yếu được thực hiện bằng phương pháp mô hình toán kết hợp với tài liệu đo đạc tại hiện trường. Mô hình toán dùng trong tính toán hiện nay chủ yếu là mô hình toán 1D với ưu thế không gian tính toán rộng, thời gian tính toán nhanh và yêu cầu về đầu vào cho tính toán đơn giản. Tuy nhiên để hiểu rõ hơn về xâm nhập mặn vùng cửa sông ĐBSCL và đáp ứng các yêu cầu ngày càng cao về sử dụng nước thích hợp phục vụ sản xuất thì cần nghiên cứu sâu hơn về bản chất của xâm nhập mặn. Trong nghiên cứu này NCS đã đi sâu hơn về bản chất, cấu trúc của xâm nhập mặn cửa sông bằng mô hình 3D. Nghiên cứu đã bước đầu chỉ ra được cơ chế và hiện tượng phân tầng mặn tại vùng cửa sông. Các kết quả nghiên cứu tính toán này hy vọng sẽ làm phong phú hơn các nghiên cứu về xâm nhập mặn, tạo tiền đề cho các vấn đề khoa học có liên quan như bồi lắng, sinh thái... và sẽ rất hữu ích khi áp dụng vào thực tế sản xuất nông nghiệp ở yêu cầu cao hơn trong điều kiện thay đổi bất thường của thời tiết và khai thác thượng nguồn ĐBSCL.

Luận án này là kết quả nỗ lực trong suốt quá trình nghiên cứu của nghiên cứu sinh, bản thân hiểu rằng các kết quả nghiên cứu này chưa thật hoàn thiện, bước đầu giải đáp được một số vấn đề liên quan đến cơ chế xâm nhập mặn, phân tầng mặn,

nêm mặn tại vùng cửa sông. Những kết quả chính và đóng góp mới của nghiên cứu sinh trong luận án được tóm tắt như sau:

1. Sử dụng được một số tham số kinh nghiệm để sơ bộ đánh giá hiện tượng phân tầng cho 7 nhánh sông Cửu Long theo không gian (dọc sông) và theo thời gian.
2. Thiết lập mô hình toán số 3 chiều (MIKE 3) và mô phỏng được đặc điểm xâm nhập mặn, phân bố mặn, cấu trúc (hình dáng, kích thước, độ dốc), sự hình thành, tồn tại và phát triển của nêm mặn tại hai nhánh của sông Hậu.
3. Dựa trên cơ sở kết quả tính toán mô phỏng xâm nhập mặn, phân tầng mặn đã định hướng cơ sở đề xuất giải pháp khai thác nước hợp lý cho vùng cửa sông ven biển ĐBSCL (ý tưởng thiết kế, nâng cấp, hướng điều chỉnh cách thức vận hành công trình theo yêu cầu nồng độ mặn phù hợp với yêu cầu sản xuất khác nhau tại vùng cửa sông ĐBSCL).

2. Kiến nghị

Mặc dù luận án đã giải quyết được mục tiêu là xác định được cơ chế xâm nhập mặn, phân tầng mặn, nêm mặn cho trong điều kiện hiện tại và nước biển dâng cho các nhánh sông Cửu Long và trên cơ sở đó xem xét kiến nghị áp dụng kết quả vào thực tiễn sản xuất. Tuy nhiên, vấn đề nghiên cứu của NCS trong luận án khá chuyên sâu và chưa được quan tâm nhiều tại Việt Nam nói chung và vùng ĐBSCL nói riêng nên nguồn tài liệu, kinh nghiệm trong nghiên cứu còn hạn chế vì vậy còn một số vấn đề chưa giải quyết được. Một số hạn chế còn tồn tại cần tiếp tục nghiên cứu là:

- Tiếp tục nghiên cứu thêm tính toán được đầy đủ các yếu tố tác động đến cơ chế phân tầng, nêm mặn như thay đổi địa hình đáy sông, hạ thấp lòng dẫn, thay đổi dòng chảy thượng nguồn, thay đổi sản xuất trên thượng nguồn và nội vùng ĐBSCL đặc biệt là vấn đề NBD trong tương lai tác động lên vùng nghiên cứu.
- Các vấn đề về xây dựng các công trình kiểm soát mặn vùng cửa sông chính như: giải pháp cống đập ngăn các cửa sông, đập ngầm hay các đảo nhân tạo tại vùng cửa sông cũng cần được xem xét nghiên cứu trên mô hình 3D đã được xây dựng trong nghiên cứu này để có các giải pháp và bước đi thích

hợp cho việc kiểm soát và thích ứng với xâm nhập mặn tại vùng cửa sông ĐBSCL.

- Mong muốn của nghiên cứu sinh là sẽ xây dựng được mối quan hệ, tương quan của xâm nhập mặn, chiều dài nêm mặn vùng cửa sông với các yếu tố tác động như lưu lượng thượng nguồn, thủy triều...nhưng chưa làm được, mặc dù đã thử làm nhưng không thành công có thể do một số nguyên nhân sau: kết quả tính toán chưa đủ nhiều, xâm nhập mặn phụ thuộc vào nhiều yếu tố hàm nhiều biến...
- Do điều kiện tài liệu, thời gian nghiên cứu còn hạn chế nên chưa xây dựng được mô hình 3D cho toàn bộ các cửa sông Cửa Long để tính toán đánh giá một cách chi tiết phân tầng mặn cho các cửa sông Tiền.
- Trong nghiên cứu của luận án sử dụng mô hình MIKE3 là phần mềm thương mại mã nguồn đóng nên hạn chế trong việc can thiệp vào mã nguồn của phần mềm.

NCS nhận thấy nghiên cứu về xâm nhập mặn, cơ chế phân tầng, nêm mặn...để phục vụ các nghiên cứu chuyên sâu và áp dụng vào thực tiễn sản xuất cho vùng cửa sông ven biển ĐBSCL là thực sự cần thiết. Do đó trong thời gian tới NCS sẽ tiếp tục nghiên cứu tính toán đầy đủ cho các yếu tố tác động như hạ thấp lòng dẫn, thay đổi thượng nguồn, thay đổi sản xuất trong và ngoài vùng ĐBSCL, biến đổi khí hậu, nước biển dâng tới cơ chế xâm nhập mặn, phân tầng mặn vùng cửa sông để áp dụng hiệu quả vào thực tiễn sản xuất cho vùng cửa sông...Nghiên cứu mối tương quan giữa phân tầng mặn với vấn đề môi trường, sinh thái, bồi lắng của vùng cửa sông.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. **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*, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam (ISSN:1859-4255), Số 59 (04-2020), trang 34-45.
2. **Đỗ Đắc Hải** (2020), “Sử dụng mô hình toán 3 chiều mô phỏng lan truyền mặn vùng cửa sông Hậu”, *Tạp chí Khoa học công nghệ Thủy lợi*, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam (ISSN:1859-4255), Số 61 (08-2020), trang 66-79.
3. Nguyễn Ân Niên, Nguyễn Công Anh, **Đỗ Đắc Hải** (2021), “Đề xuất cung cấp nước ngọt cho vùng ven biển Đồng bằng sông Cửu Long mùa khô hạn một cách bền vững”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam (ISSN:1859-4255), Số 64 (02-2021), trang 2-7.
4. **Đỗ Đắc Hải** (2018), “Đánh giá tác động của đô thị hoá, xây dựng công trình chống ngập đến xâm nhập mặn vùng hạ du sông Đồng Nai - Sài Gòn”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam (ISSN:1859-4255), Số 49 (11-2018), trang 27-35.
5. Phạm Thế Vinh, **Đỗ Đắc Hải**, Nguyễn Ân Niên (2016), “Thử tìm tốc độ truyền triều trong hệ thống sông ngòi”, *Tuyển tập công trình, Hội Cơ học thủy khí Việt Nam*, lần thứ 19 (28-30 tháng 7 năm 2016), trang 445-452.
6. Trần Đình Sơ, Nguyễn Phú Quỳnh, **Đỗ Đắc Hải** (2011), “Giải pháp cải tạo, nâng cấp cửa van và thiết bị các công trình kiểm soát mặn vùng ĐBSCL thích ứng với biến đổi khí hậu”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam (ISSN:1859-4255), Số 04 (10-2011), trang 41-45.
7. **Đỗ Đắc Hải**, Huỳnh Thanh Sơn (2005), “Tính toán xâm nhập mặn trên sông Sài Gòn dưới tác động của hồ Dầu Tiếng”, *Tuyển tập kết quả Khoa học và Công nghệ 2005*, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam (ISSN:0866-7292), trang 193-198.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] Nguyễn Tất Đắc (2005), *Mô hình toán cho dòng chảy và chất lượng nước trên hệ thống kênh sông*, NXB Nông nghiệp.
- [2] Trần Quốc Đạt, Nguyễn Hiếu Trung và Kanchit Likitdecharote (2010), “Mô phỏng xâm nhập mặn ĐBSCL dưới tác động mực nước biển dâng và sự suy giảm lưu lượng từ thượng nguồn”, *Tạp chí Khoa học 2012:21b*, Trường Đại học Cần Thơ, Tr 141-150.
- [3] Thái Quốc Hiền (2019), *Nghiên cứu giải pháp, thiết kế và chế tạo thiết bị đóng mở cưỡng bức các cửa van tự động đảm bảo chủ động lấy nước trong điều kiện xâm nhập mặn cùng ĐBSCL*, Đề tài nghiên cứu cấp Bộ Nông nghiệp và PTNT, Viện thủy công, Hà Nội.
- [4] Nguyễn Nghĩa Hùng (2013-2015), *Nghiên cứu các giải pháp khoa học - công nghệ để điều chỉnh và ổn định các đoạn sông có cù lao đang diễn ra biến động lớn về hình thái trên sông Tiền*, Đề tài cấp Quốc gia KC 08.21/11-15, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, Tp. Hồ Chí Minh.
- [5] Nguyễn Nghĩa Hùng (2017-2020), *Nghiên cứu tác động bất lợi của biến đổi hình thái hình thái lòng dẫn và hạ thấp mực nước hệ thống sông Cửu Long, đề xuất giải pháp giảm thiểu*, Đề tài độc lập cấp Quốc gia, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, Tp. Hồ Chí Minh.
- [6] Trần Đình Hợi và nnk (2005), “Kết quả nghiên cứu ứng dụng cửa van lấy sa”, Một số kết quả Khoa học Công nghệ giai đoạn 1999-2004, Viện Khoa học Thủy lợi, Tr 62-67.
- [7] Nguyễn Quang Kim (2011-2014), *Nghiên cứu giải pháp tổng thể kiểm soát ngập lụt vùng hạ lưu sông Đồng Nai - Sài Gòn và vùng phụ cận*, Đề tài cấp Quốc gia ĐTĐL.2011-G/38, Trường Đại học Thủy lợi, Hà Nội.
- [8] Nguyễn Ân Niên (2004), *Nghiên cứu giải pháp quản lý hệ thống công trình kiểm soát lũ vùng Tứ giác Long Xuyên nhằm nâng cao hiệu quả thoát lũ và chủ động phân phối nước ngọt, kiểm soát xâm nhập mặn*, Đề tài NCKH cấp Bộ Nông nghiệp & PTNT, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, Tp. Hồ Chí Minh.
- [9] Nguyễn Tùng Phong (2016-2018), *Nghiên cứu dự báo, cảnh báo xâm nhập mặn phục vụ điều hành cấp nước và quản lý vận hành hệ thống thủy lợi lấy nước*

- vùng hạ lưu đồng bằng Sông Hồng, Đề tài NCKH cấp Bộ Nông nghiệp và PTNT, Viện Nước tưới tiêu và Môi trường, Hà Nội.
- [10] Nguyễn Phú Quỳnh (2011), *Nghiên cứu giải pháp xây dựng mới và nâng cấp các công trình kiểm soát mặn ở ĐBSCL nhằm thích ứng với biến đổi khí hậu*, Đề tài nghiên cứu cấp Bộ Nông nghiệp và PTNT, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, Tp. Hồ Chí Minh.
- [11] Lê Sâm (2004), *Nghiên cứu xâm nhập mặn phục vụ phát triển kinh tế - xã hội ven biển ĐBSCL*, Đề tài NCKH cấp nhà nước, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, Tp. Hồ Chí Minh.
- [12] Trần Đức Thanh, Nguyễn Cẩn, Đặng Đức Nga (2000), “Bản chất cấu trúc estuary của vùng cửa sông Bạch Đằng”, *Tuyển tập Tài nguyên và Môi trường biển, tập VII*, Tr.35-50, NXB. Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [13] Tô Quang Toàn, (2013), *Nghiên cứu đánh giá tác động của các bậc thang thủy điện trên dòng chính hạ lưu sông Mê Công đến dòng chảy, môi trường kinh tế xã hội vùng ĐBSCL và đề xuất giải pháp giảm thiểu bất lợi*, Đề tài NCKH cấp nhà nước, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, Tp. Hồ Chí Minh.
- [14] Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam (2020), *Dự án điều tra dự báo giám sát xâm nhập mặn vùng Đồng bằng sông Cửu Long phục vụ chỉ đạo điều hành sản xuất nông nghiệp*, Tp. Hồ Chí Minh.
- [15] Viện Quy hoạch Thủy lợi miền Nam (2013), *Dự án thích ứng với biến đổi khí hậu cho phát triển bền vững nông nghiệp và nông thôn vùng ven biển ĐBSCL*, Tp. Hồ Chí Minh
- [16] Lương Quang Xô (2007), *Nghiên cứu tính toán triều mặn vùng cửa sông Cửu Long có xét đến tương tác động lực sông biển*, Luận án Tiến sỹ kỹ thuật, Tp. Hồ Chí Minh.

Tiếng Anh

- [17] Arita, M. and Jirka, G.H., (1987), “Two-layer model of saline wedge. II. Prediction of mean properties”, *Journal of Hydraulic Engineering. ASCE*, Vol 113, No 10, pp 1249-1263.
- [18] Geyer, W.R. and Farmer, D.M. (1989), “Tide-induced variation of the dynamics of salt wedge estuary”, *Physical Oceanog.* Vol 19, No 8, pp. 1060-1072.

- [19] Harleman, D.R.F., (1961), *Stratified flow*. In: *Streeter, V.L. (ed.)*. Handbook of Fluid Dynamics, McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y.
- [20] Harleman, D.R.F., (1990), "Keulegan Legacy: Saline Wedges", *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 17, No 12, pp 1616-1625.
- [21] Hugo B. Fischer (1979), *Mixing in Inland and Coastal Waters*, ACADEMIC PRESS INC.
- [22] James L Martin, Steven C. McCutcheon (1998), *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*, Taylor & Francis Group.
- [23] Keulegan, G.H., (1966), "The mechanism of an arrested saline wedge. In: Ippen, A.T. (ed.)", *Estuary and coastline hydrodynamics*, McGraw Hill Book Co., New York, N. Y., pp. 546-574.
- [24] Largier, J.L. (1993), "Estuarine fronts: How important are they?", *Estuaries* Vol 16, No. 1, pp.1-11.
- [25] Lewis, R.E. (1996), *Relative contributions of interfacial and bed generated mixing to the estuarine energy balance*, In: Pattiaratchi, C. (ed.). *Mixing in Estuaries and Coastal Seas*.
- [26] M. V. Mikhailova (2013), "Processes of Seawater Intrusion into River Mouths", ISSN 0097-8078, *Water Resources*, Vol. 40, No. 5, pp. 483-498.
- [27] Malcolm J. Bowman, Richard L. Iverson (1978), "Estuarine and plume fronts", *Oceanic Fronts in Coastal Processes*, Springer-Verlag, Berlin, pp 87-104.
- [28] Nguyen Anh Duc (2008), *Salt intrusion, tides and mixing in multi-channel estuaries*, PhD: UNESCO-IHE Institute, Delft.
- [29] Pritchard, D.W., (1955), "Estuarine circulation patterns", *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 1955, vol. 81, no. 717, pp. 1-11.
- [30] Pritchard, D.W., (1967), "What is an estuary: a physical view point", *Estuaries*, Washington: Am. Ass. Adv. Sci., 1967, Publ. 83, pp. 3-5.
- [31] Pritchard, D.W. (1967), "What is an Estuary", *Estuaries Pub.* No. 83. AAAS. Washington D. C, pp. 149-157.
- [32] Roy Lewis (1997), *Dispersion in Estuaries and Coastal Waters*, In: John Wiley and Sons, 328p
- [33] Roy, P. S. (1984), "New South Wales Estuaries: their origin and evolution", *In Coastal Geomorphology in Australia (ed. B. G. Thom)* Academic Press, Sydney, pp. 99-121.

- [34] Schijf, J.B. and Schönfeld, J.C., (1953), *Theoretical Considerations on the Motion of Salt and Fresh Water*, In: Proceedings of the Minnesota International Hydraulics Convention, (Minneapolis, Minnesota), 321p.
- [35] Sepehr Eslami, Piet Hoekstra, Herman W.J. Kernkamp, Nam Nguyen Trung, Dung Do Duc, Hung Nguyen Nghia, Tho Tran Quang, Arthur van Dam, Stephen E. Darby, Daniel R. Parsons, Grigorios Vasilopoulos, Lisanne Braat, Maarten van der Vegt (2021), “Dynamics of salt intrusion in the Mekong Delta; results of field observations and integrated coastal-inland modelling”, *Earth Surface Dynamics*, doi: 10.5194/esurf-2020-109.
- [36] Simpson, J.E. (1987) *Gravity Currents: In the Environment and the Laboratory*. Second Edition, Cambridge University Press.
- [37] Simpson, J.H. and Nunes, R.A. (1981), “The tidal intrusion front: an estuarine convergence zone”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 13, pp 257-266.
- [38] Simpson, J.H., Brown, J., Matthews, J. and Alien, G. (1990), “Tidal straining, density currents and stirring control of estuarine stratification”, *Estuaries* Vol 13, No. 2, pp 125- 132.
- [39] Steven Kyle Ayres (2015), *A Simulation of the Mississippi River Salt Wedge Estuary Using a Three-Dimensional Cartesian Z Coordinate Model*, PhD: University of New Orleans, New Orleans.
- [40] Thorpe, S.A. (1987), “Transitional phenomena and the development of turbulence in stratified fluids: a review”, *Journal of Geophysical Research Oceans*. Vol 92, Iss C5, pp 5231-5248.
- [41] US Army Corps of Engineers (2012), *An Overview of the Mississippi River's Saltwater Wedge*, <https://www.mvn.usace.army.mil/...>
- [42] West, J.R. and Margat, J.S. (1986), “The determination and prediction of longitudinal; dispersion coefficients in a narrow shallow estuary”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 22, pp 161-181.
- [43] West, J.R. and Shiono, K. (1988), “Vertical turbulent mixing processes on ebb tides in partially mixed estuaries”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 26, pp 51-66.
- [44] West, J.R., Uncles, R.J., Stephens, J.A. and Shiono, K. (1990), “Longitudinal dispersion processes in the Upper Tamar estuary”, *Estuaries*, Vol 13, No.2, pp 118-124.

- [45] W. Rockwell Geyer¹ and Parker MacCready (2014), *The Estuarine Circulation*
- *The Annual Review of Fluid Mechanics*, <https://www.fluid.annualreviews.org>.

PHẦN PHỤ LỤC

CƠ SỞ LÝ THUYẾT MÔ HÌNH MIKE3

1. Tóm tắt cơ sở lý thuyết của mô hình MIKE3

1.1. Khái quát chung

Trong khuôn khổ một mô hình toán học, để mô phỏng một quá trình thủy lực trên hệ thống kênh sông sử dụng và giải các phương trình bảo toàn khối lượng và bảo toàn động lượng. Việc giải các phương trình này đòi hỏi các thông số về địa hình, khí tượng thủy văn và điều kiện tại các biên. Các thông tin đưa ra của mô hình là các đặc trưng thủy lực cần cho các mục tiêu tính toán (chẳng hạn mực nước, lưu lượng, vận tốc, phân bố dòng chảy các đặc trưng trung bình,...).

Để mô phỏng quá trình lan truyền chất (độ mặn, chất lượng nước,...) sẽ giải phương trình tải - khuếch tán (bao gồm các thành phần đối lưu, khuếch tán hoặc phân tán, nguồn bổ sung, nguồn tiêu tán,...) để tìm sự phân bố nồng độ trong dòng chảy.

Một số mô hình xem quá trình thủy lực và quá trình lan truyền chất là một thể thống nhất, do đó, trong trường hợp một chiều, phải giải đồng thời ba phương trình đạo hàm riêng (hai phương trình bảo toàn khối lượng và một phương trình bảo toàn động lượng ở dạng véc tơ). Nhưng phần lớn các mô hình xem quá trình lan truyền chất là hệ quả và bỏ qua tác động của nó đến quá trình thủy lực, từ đó dẫn tới xử lý hai quá trình riêng biệt: (1) Quá trình thủy lực: xử lý phương trình bảo toàn khối lượng và phương trình bảo toàn động lượng của chất lỏng. (2) Quá trình lan truyền chất: xử lý phương trình bảo toàn vật chất lan truyền khi đã biết các đặc trưng thủy lực của dòng chảy.

1.2. Các phương trình cơ bản trong hệ tọa độ Descartes

Phương trình toán học cơ bản của mô hình 3D trong tính toán xâm nhập mặn là phương trình liên tục, phương trình bảo toàn động lượng và phương trình tải - khuếch tán với chất lỏng không nén được.

Hệ quy chiếu trong mô hình thủy động lực và truyền chất của 3D đều có thể chọn một trong 3 kiểu hệ tọa độ: Descartes (Cartesian Coordinates), hệ tọa độ sigma (Sigma Coordinates) và hệ tọa độ cầu (Spherical Coordinates).

Trong mô hình MIKE3 các phương trình 3 chiều nước nông với phương pháp xấp xỉ Boussinesq trong môi trường thủy tĩnh.

1.2.1. Phương trình thủy động lực

- Phương trình liên tục

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (\text{PL-24})$$

- Phương trình động lượng (phương trình Navier-Stokes trung bình theo Reynolds):

Hai phương trình động lượng cho các thành phần vận tốc u và v lần lượt theo phương ngang x và y.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} &= fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ &\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (\text{PL-25})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} &= -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ &\frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (\text{PL-26})$$

Trong đó:

t: thời gian;

x, y và z: tọa độ trong hệ tọa độ Descartes;

η : cao độ mặt nước;

d: cao độ đáy;

$h = \eta + d$: chiều sâu nước;

u, v, w: các thành phần vận tốc lần lượt theo các phương x, y và z;

f: hệ số Coriolis; $f = 2 \Omega \sin \phi$ (Ω : tần số quay của trái đất, ϕ : vĩ độ tại vị trí đang xét)

g: gia tốc trọng trường;

ρ : khối lượng riêng của nước;

S_{xx} S_{xy} S_{yx} S_{yy} : là các thành phần tán xạ của ten sơ ứng suất;

v_t : hệ số nhớt rối;

p_a : áp suất khí quyển;

ρ_o : khối lượng riêng qui chiếu của nước;

S : độ lớn của lưu lượng tại các điểm nguồn (nhập lưu);

u_s, v_s : vận tốc ở đó nước chảy ra khu xung quanh;

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (\text{PL-27})$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (\text{PL-28})$$

Trong đó: A : hệ số nhớt rối theo phương ngang

- Điều kiện biên của mặt thoáng và đáy cho các giá trị u , v và w là :

Tại $z = \eta$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (\text{PL-29})$$

Tại $z = -d$

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (\text{PL-30})$$

Trong đó:

τ_{sx}, τ_{sy} : thành phần ứng suất bề mặt của gió theo phương x và y ;

τ_{bx}, τ_{by} : thành phần ứng suất tại đáy theo phương x và y ;

Chiều sâu nước h có thể tính được từ điều kiện biên động học (kinematic) ở bề mặt, khi trường vận tốc được tính từ phương trình liên tục và phương trình động lượng.

Tuy nhiên, một phương trình phổ dụng hơn có thể tìm được bằng cách tích phân theo chiều sâu của phương trình liên tục:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}}{\partial y} = hS + \hat{P} - \hat{E} \quad (\text{PL-31})$$

Trong đó:

$\hat{P}$, $\hat{E}$: lần lượt là lượng mưa và bốc hơi.

$\bar{u}, \bar{v}$: vận tốc trung bình theo chiều sâu:

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz, \quad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (\text{PL-32})$$

Chất lỏng được giả định là không nén được. Do đó, khối lượng riêng ρ không phụ thuộc vào áp suất mà chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ T và độ mặn s thông qua phương trình trạng thái:

$$\rho = \rho(T, s) \quad (\text{PL-33})$$

1.2.2. Phương trình tải và khuếch tán

Nồng độ mặn s được vận chuyển theo phương trình tải và khuếch tán chung:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (\text{PL-34})$$

Trong đó:

D_v : hệ số khuếch tán rối theo phương đứng;

s_s : độ mặn của nguồn;

F_s : thành phần khuếch tán theo phương ngang được xác định bởi:

$$(F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (s) \quad (\text{PL-35})$$

Trong đó

D_h : hệ số khuếch tán ngang, có liên quan đến hệ số nhớt rối:

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T} \quad \text{and} \quad D_v = \frac{v_t}{\sigma_T} \quad (\text{PL-36})$$

Với σ_T : số Schmidt, trong nhiều ứng dụng, số Schmidt có thể được lấy bằng hằng số = 1 (Rodi 1984).

Các điều kiện biên tại bề mặt và tại đáy cho độ mặn là:

Tại $z = \eta$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (\text{PL-37})$$

Tại $z = -d$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (\text{PL-38})$$

1.2.3. Mô hình rối

Dòng chảy rối được mô hình hóa bằng cách sử dụng một khái niệm hệ số nhớt rối. Hệ số nhớt rối thường được mô tả riêng cho vận chuyển theo phương đứng và theo phương ngang. Ở đây một số mô hình rối có thể được áp dụng: mô hình hệ số nhớt rối không đổi, mô hình hệ số nhớt rối có dạng parabolic theo chiều đứng và mô hình rối k-ε tiêu chuẩn (Rodi, 1984). Trong nhiều mô phỏng số, dòng rối quy mô nhỏ không thể được giải quyết với độ phân giải không gian đã chọn. Loại chảy rối này có thể được xấp xỉ bằng các mô hình tỷ lệ lưới phụ.

❖ Hệ số nhớt rối theo phương đứng

Hệ số nhớt rối bắt nguồn từ quy tắc log (log-law) được tính như sau:

$$\nu_t = U_\tau h \left(c_1 \frac{z+d}{h} + c_2 \left(\frac{z+d}{h} \right)^2 \right) \quad (\text{PL -39})$$

Trong đó:

$$U_\tau = \max (U_{\tau s}, U_{\tau b})$$

c_1 và c_2 : hai hằng số; $c_1 = 0,41$ và $c_2 = -0,41$ cho dạng parabolic chuẩn.

$U_{\tau s}$ và $U_{\tau b}$: vận tốc ma sát tương ứng với các ứng suất tại bề mặt và đáy

Trong các ứng dụng với sự phân tầng, tác động của sự nổi có thể được kể đến trong tính toán, thông qua số Richardson (Ri):

$$Ri = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right)^{-1} \quad (\text{PL-40})$$

Khi đó hệ số nhớt rối ν_t sẽ được xác định theo công thức Munk- Anderson (Munk và Anderson, 1948):

$$\nu_t = \nu_t^* (1 + a Ri)^{-b} \quad (\text{PL-41})$$

với $a = 10$ và $b = 0,5$ là các hằng số thực nghiệm.

Trong mô hình rối k-ε, hệ số nhớt rối được xác định từ k và ε như sau:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{PL -42})$$

Trong đó:

k: động năng rối (TKE)

ε : tiêu tán TKE

c_μ : hằng số thực nghiệm

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial vk}{\partial y} + \frac{\partial wk}{\partial z} = F_k + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + P + B - \varepsilon \quad (\text{PL -43})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} + \frac{\partial w\varepsilon}{\partial z} = F_\varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (\text{PL -44})$$

Trong đó:

P: Sản sinh dòng chảy cắt (shear production)

B: Sản sinh sự đẩy nổi (buoyancy production)

P và B được tính như sau:

$$P = \frac{\tau_{xz}}{\rho_0} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\tau_{yz}}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial z} \approx \nu_t \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (\text{PL -45})$$

$$B = -\frac{v_t}{\sigma_t} N^2 \quad (\text{PL -46})$$

Tần số Brunt-Väisälä (N) được xác định như sau

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (\text{PL -47})$$

Trong đó:

σ_t : hệ số Schmidt;

σ_k , σ_ε , $c_{1\varepsilon}$, $c_{2\varepsilon}$ và $c_{3\varepsilon}$: các hằng số thực nghiệm

F là các thành phần khuếch tán ngang được xác định bởi

$$(F_k, F_\varepsilon) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (k, \varepsilon) \quad (\text{PL -48})$$

Hệ số khuếch tán ngang được xác định bởi $D_h = A/\sigma_k$ và $D_h = A/\sigma_\varepsilon$.

Các hằng số thực nghiệm được liệt kê trong bảng 1 theo Rodi (1984).

Bảng PL1: Các hằng số thực nghiệm của mô hình k - ε

c_μ	$c_{1\varepsilon}$	$c_{2\varepsilon}$	$c_{3\varepsilon}$	σ_t	σ_k	σ_ε
0.09	1.44	1.92	0	0.9	1.0	1.3

- Điều kiện biên

Ở bề mặt các điều kiện biên cho động năng rối và tốc độ tiêu tán rối phụ thuộc vào lực gió $U_{\tau s}$

Tại $z = \eta$:

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} U_{\tau s}^2 \quad (\text{PL -49})$$

$$\varepsilon = \frac{U_{\tau s}^3}{\kappa \Delta z_b} \quad \text{for } U_{\tau s} > 0$$

$$\frac{\partial k}{\partial z} = 0 \quad \varepsilon = \frac{(k \sqrt{c_\mu})^{3/2}}{a \kappa h} \quad \text{for } U_{\tau s} = 0 \quad (\text{PL -50})$$

Trong đó

$K = 0,4$: hằng số von Kármán; $a = 0,07$ là hằng số thực nghiệm

Δz_s : là khoảng cách từ bề mặt nơi điều kiện biên được áp đặt.

Ở đáy các điều kiện biên như sau:

Tại $z = -d$:

$$k = \frac{1}{\sqrt{c_\mu}} U_{\tau b}^2 \quad \varepsilon = \frac{U_{\tau b}^3}{\kappa \Delta z_b} \quad (\text{PL-51})$$

Trong đó: Δz_b : là khoảng cách từ đáy nơi điều kiện biên được áp đặt.

❖ Hệ số nhớt rối ngang

Trong nhiều ứng dụng, hệ số nhớt rối không đối có thể được sử dụng cho độ nhớt rối ngang. Ngoài ra, Smagorinsky (1963) đề xuất một biểu thức xác định hệ số nhớt rối ngang A phụ thuộc vào qui mô kích thước ô lưới tính toán:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (\text{PL-52})$$

Trong đó:

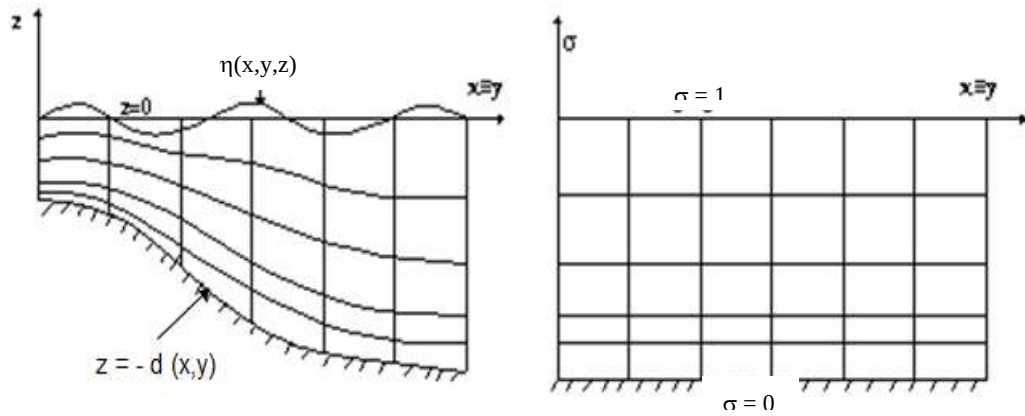
c_s : hằng số

l : chiều dài đặc trưng và tỷ lệ biến dạng được cho bởi:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (i, j = 1, 2) \quad (\text{PL-53})$$

1.3. Các phương trình điều chỉnh trong hệ tọa độ Sigma

Mục đích của phép biến đổi tọa độ sigma là biến một vùng tính toán phức tạp trong thực tế thành một vùng tính toán hình chữ nhật đơn giản. Tuy nhiên điều này dẫn đến hậu quả là hệ phương trình ban đầu trong hệ tọa độ Descartes (x, y, z) sẽ biến thành một hệ phương trình phức tạp hơn trong hệ tọa độ (x, y, σ).



Hình PL1: Sơ đồ biến đổi miền tính toán (x,y,z) thành miền tính toán (x,y, σ)

Các phương trình được xử lý bằng cách sử dụng một hàm σ , chuyển đổi theo phương đứng:

$$\sigma = \frac{z - z_b}{h}, \quad x' = x, \quad y' = y \quad (\text{PL-54})$$

Trong đó σ thay đổi giữa 0 ở dưới đáy và 1 ở bề mặt. Sự biến đổi tọa độ thành các mối quan hệ như sau:

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \quad (\text{PL-55})$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) = \left(\frac{\partial}{\partial x'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial x} + \sigma \frac{\partial h}{\partial x} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma}, \frac{\partial}{\partial y'} - \frac{1}{h} \left(-\frac{\partial d}{\partial y} + \sigma \frac{\partial h}{\partial y} \right) \frac{\partial}{\partial \sigma} \right) \quad (\text{PL-56})$$

Hệ phương trình trong hệ tọa độ mới như sau:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x'} + \frac{\partial hv}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega}{\partial \sigma} = hS \quad (\text{PL-57})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x'} + \frac{\partial hvu}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega u}{\partial \sigma} &= fvh - gh \frac{\partial \eta}{\partial x'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x'} - \\ &\frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hF_u + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + hu_s S \end{aligned} \quad (\text{PL-58})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x'} + \frac{\partial hv^2}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega v}{\partial \sigma} &= -fuh - gh \frac{\partial \eta}{\partial y'} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y'} - \\ &\frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + hF_v + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_v}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + hv_s S \end{aligned} \quad (\text{PL-59})$$

$$\frac{\partial hs}{\partial t} + \frac{\partial hus}{\partial x'} + \frac{\partial hvs}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega s}{\partial \sigma} = hF_s + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial s}{\partial \sigma} \right) + hs_s S \quad (\text{PL-60})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hk}{\partial t} + \frac{\partial huk}{\partial x'} + \frac{\partial hvk}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega k}{\partial \sigma} &= \\ &hF_k + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \sigma} \right) + h(P + B - \varepsilon) \end{aligned} \quad (\text{PL-61})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial hu\varepsilon}{\partial x'} + \frac{\partial hv\varepsilon}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega\varepsilon}{\partial \sigma} &= \\ &hF_\varepsilon + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} \right) + h \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} P + c_{3\varepsilon} B - c_{2\varepsilon} \varepsilon) \end{aligned} \quad (\text{PL-62})$$

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial huC}{\partial x'} + \frac{\partial hvC}{\partial y'} + \frac{\partial h\omega C}{\partial \sigma} = hF_c + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{D_v}{h} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) - hk_p C + hC_s S \quad (\text{PL-63})$$

Vận tốc thẳng đứng sửa đổi được xác định bởi:

$$\omega = \frac{1}{h} \left[w + u \frac{\partial d}{\partial x'} + v \frac{\partial d}{\partial y'} - \sigma \left(\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x'} + v \frac{\partial h}{\partial y'} \right) \right] \quad (\text{PL-64})$$

Vận tốc thẳng đứng đã sửa đổi là vận tốc trên một mức σ nào đó.

Các thuật ngữ khuếch tán ngang được định nghĩa là:

$$hF_u \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(2hA \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (\text{PL-65})$$

$$hF_v \approx \frac{\partial}{\partial x} \left(hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2hA \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (\text{PL-66})$$

$$h(F_s, F_k, F_\varepsilon, F_c) \approx \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(h D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (s, k, \varepsilon, C) \quad (\text{PL-67})$$

Điều kiện biên tại mặt thoáng và đáy như sau:

Tại $\sigma = 1$:

$$\omega = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (\text{PL-68})$$

Tại $\sigma = 0$:

$$\omega = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial \sigma}, \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) = \frac{h}{\rho_0 v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (\text{PL-69})$$

1.4. Ứng suất đáy

Ứng suất đáy $\vec{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ được xác định bởi quy luật ma sát bậc hai:

$$\frac{\vec{\tau}_b}{\rho_0} = c_f \vec{u}_b |\vec{u}_b| \quad (\text{PL-70})$$

Trong đó:

c_f là hệ số ma sát;

$\vec{u}_b = (u_b, v_b)$: vận tốc dòng chảy phía trên đáy

Vận tốc ma sát kết hợp với ứng suất đáy được cho bởi

$$U_{\tau b} = \sqrt{c_f |u_b|^2} \quad (\text{PL-71})$$

Đối với tính toán không gian ba chiều, u_b là vận tốc ở khoảng cách Δ_{zb} phía trên đáy và hệ số ma sát được xác định bằng cách giả định một hàm lôgarit giữa đáy và điểm Δ_{zb} phía trên đáy:

$$c_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{\Delta_{zb}}{z_0} \right) \right)^2} \quad (\text{PL-72})$$

Trong đó:

$\kappa = 0,4$ là hằng số von Karman

z_0 là thang đo độ nhám của đáy. Khi bề mặt biên là nhám, z_0 phụ thuộc vào chiều cao gờ ghè k_s (độ nhám Nikuradse):

$$z_o = mk_s \quad (\text{PL-73})$$

trong đó: $m \cong 1/30$;

Lưu ý: số Manning có thể được ước tính từ k_s bằng cách sử dụng công thức:

$$M = \frac{25.4}{k_s^{1/6}} \quad (\text{PL-74})$$

1.5. Ứng suất gió (bề mặt)

Trong các khu vực không có băng bao phủ, ứng suất bề mặt, $\vec{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$ được xác định bởi gió trên bề mặt. Ứng suất bề mặt được xác định theo quan hệ thực nghiệm sau đây:

$$\vec{\tau}_s = \rho_a c_d |\vec{u}_w| \vec{u}_w \quad (\text{PL-75})$$

Trong đó:

ρ_a là khối lượng riêng qui chuẩn của không khí

c_d là hệ số giãn nở của không khí

$\vec{u}_w = (u_w, v_w)$ là tốc độ gió cao hơn mặt biển 10 m.

Vận tốc ma sát kết hợp với ứng suất bề mặt được xác định như sau:

$$U_{\pi} = \sqrt{\frac{\rho_a c_f |\vec{u}_w|^2}{\rho_0}} \quad (\text{PL-76})$$

Hệ số ma sát bề mặt có thể là hằng số hoặc phụ thuộc vào tốc độ gió. Công thức thực nghiệm được đề xuất bởi Wu (1980, 1994) được sử dụng cho các tham số của hệ số ma sát:

$$c_f = \begin{cases} c_a & w_{10} < w_a \\ c_a + \frac{c_b - c_a}{w_b - w_a} (w_{10} - w_a) & w_a \leq w_{10} < w_b \\ c_b & w_{10} \geq w_b \end{cases} \quad (\text{PL-77})$$

Trong đó:

c_a , c_b , w_a và w_b là các hệ số thực nghiệm và w_{10} là vận tốc gió cao hơn mặt thoáng 10 m. Giá trị mặc định cho các hệ số thực nghiệm là $c_a = 1,255 \times 10^{-3}$, $c_b = 2,425 \times 10^{-3}$, $w_a = 7$ m/s và $w_b = 25$ m/s. Những kết quả này cho kết quả tốt cho các vùng

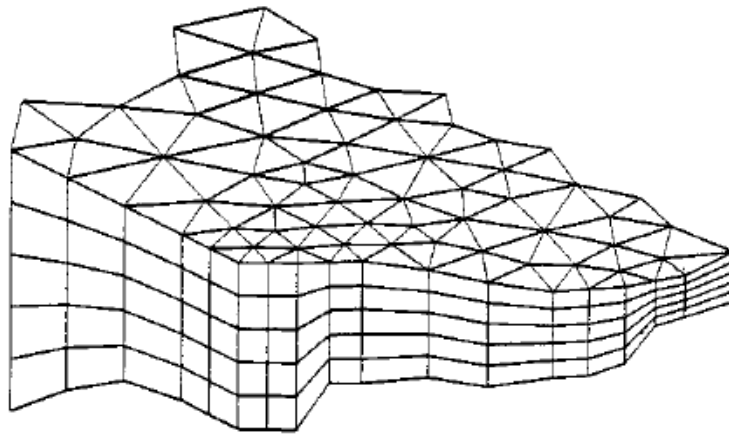
biển hở. Đo đạc thực địa của hệ số ma sát được thu thập trên các hồ kín cho thấy hệ số ma sát lớn hơn dữ liệu đại dương (Geemaert và Plant (1990)).

2. Phương pháp giải số

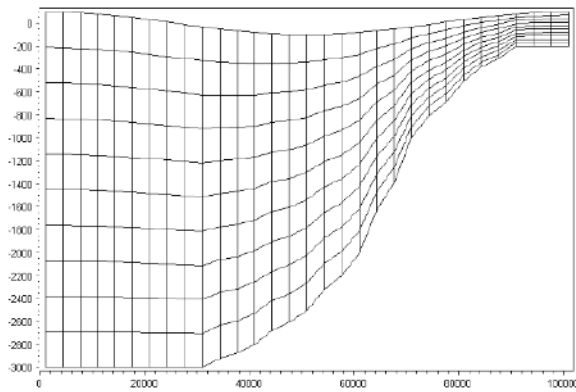
2.1. Sự rời rạc hóa theo không gian

Miền tính toán được rời rạc hóa nhờ phương pháp thể tích hữu hạn (Finite Volume Method), bằng cách phân chia liên tục miền không gian thành các ô/phần tử không chồng chéo.

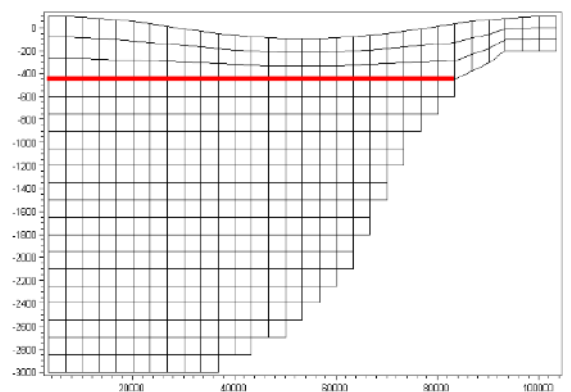
Trong trường hợp ba chiều, một lớp lưới được sử dụng: trong miền ngang một lưới phi cấu trúc được sử dụng, trong khi trong miền thẳng đứng một lưới có cấu trúc được sử dụng (Hình PL2). Lưới dọc được dựa trên tọa độ sigma hoặc tọa độ sigma/z kết hợp. Đối với các tọa độ lưới sigma/z phẳng, lưới sigma được sử dụng từ bề mặt tự do đến một độ sâu và tọa độ z được chỉ định được sử dụng bên dưới. Các loại lưới dọc khác nhau được minh họa trong (Hình PL3). Các phần tử trong miền sigma và miền cấp độ z có thể là lăng kính với cơ sở đa giác 3 mặt hoặc 4 mặt. Do đó, các mặt nằm ngang là hình tam giác hoặc phần tử tứ giác. Các phần tử là hoàn toàn thẳng đứng và tất cả các lớp có cấu trúc liên kết giống hệt nhau.



Hình PL2: Lăng thể mắt lưới sử dụng hệ tọa độ Sigma



Lưới sigma



Lưới sigma / z kết hợp với điều chỉnh độ sâu đơn giản: Đường màu đỏ hiển thị giao diện giữa miền cấp z và miền cấp sigma

Hình PL3: Minh họa các lưới dọc khác nhau

Lợi thế quan trọng nhất khi sử dụng tọa độ sigma là khả năng biểu diễn chính xác độ sâu và cung cấp độ phân giải phù hợp gần đáy. Tuy nhiên, các tọa độ sigma có thể gặp phải các sai số đáng kể trong gradient áp suất ngang, các số hạng đối lưu và xáo trộn trong các khu vực có các thay đổi địa hình đột ngột. Những lỗi này có thể làm phát sinh các dòng chảy không thực tế.

Việc sử dụng các tọa độ z-level cho phép tính toán đơn giản các gradient áp suất ngang, các điều kiện đối lưu và xáo trộn, nhưng nhược điểm là tính không chính xác của chúng đại diện cho độ sâu và biểu diễn các nấc của độ sâu có thể dẫn đến vận tốc dòng chảy không thực tế gần đáy.

Cấu trúc lưới theo phương đứng bao gồm một lưới sigma tiêu chuẩn và một lưới sigma/z kết hợp. Đối với các tọa độ sigma, lưới sigma/z được sử dụng từ bề mặt tự do đến một độ sâu nào đó z_σ , còn z-phẳng được chỉ định sử dụng ở phía dưới. Cần có ít nhất một lớp sigma để cho phép thay đổi độ cao bề mặt.

- Lưới Sigma

Trong miền sigma, các lớp là hằng số N_σ được sử dụng và mỗi lớp sigma là một phần cố định của tổng chiều sâu của lớp sigma h_σ trong đó $h_\sigma = \eta - \max(z_b, z_\sigma)$. Việc cấu trúc trong miền sigma được đưa ra bởi một số cấp độ rời rạc của các lớp σ - phẳng $\{\sigma_i, i = 1, (N_\sigma + 1)\}$. Trong đó σ biến đổi từ $\sigma_1 = 0$ tại lớp đáy của lớp sigma thấp nhất tới $\sigma_{N_\sigma+1} = 1$ tại mặt thoáng.

Biến đổi hệ tọa độ sigma theo hướng rời rạc hóa sẽ thu được một hệ tọa độ theo phương đứng được thực hiện bởi Song và Haidvogel (1994).

Đầu tiên một cấu trúc đều (equidistant) trong hệ tọa độ s ($-1 < s < 0$) được định nghĩa như sau:

$$s_i = -\frac{N_\sigma + 1 - i}{N_\sigma} \quad i = 1, (N_\sigma + 1) \quad (\text{PL-78})$$

Các tọa độ sigma rời rạc có thể được xác định bởi

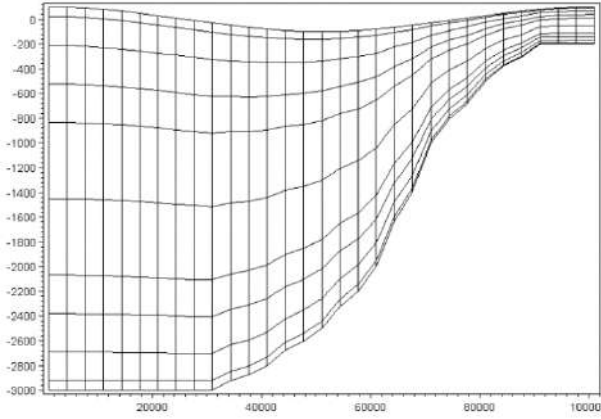
$$\sigma_i = 1 + \sigma_c s_i + (1 - \sigma_c) c(s_i) \quad i = 1, (N_\sigma + 1) \quad (\text{PL-79})$$

Trong đó:

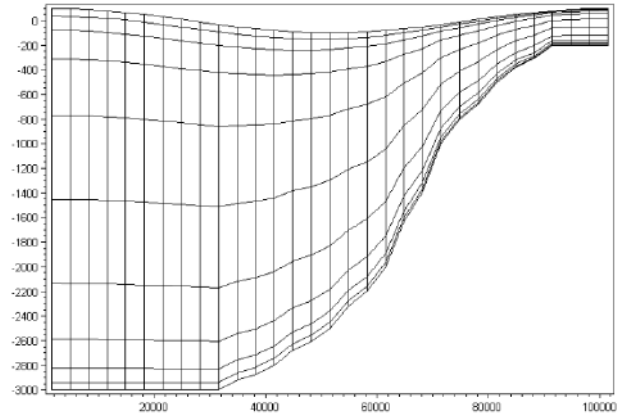
$$c(s) = (1 - b) \frac{\sinh(\theta s)}{\sinh(\theta)} + b \frac{\tanh\left(\theta\left(s + \frac{1}{2}\right)\right) - \tanh\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2 \tanh\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (\text{PL-80})$$

Ở đây σ_c là trọng số giữa phân phối đều nhau và phân phối kéo dài, θ là tham số điều khiển bề mặt và b là tham số điều khiển đáy. Phạm vi cho trọng số là $0 < \sigma_c < 1$ trong đó giá trị 1 tương ứng với phân phối đều nhau và 0 tương ứng với phân bố kéo dài. Một giá trị nhỏ của σ_c có thể dẫn đến sự mất ổn định tuyến tính. Phạm vi của tham số điều khiển bề mặt là $0 < \theta \leq 20$ và phạm vi của thông số điều khiển đáy là $0 \leq b \leq 1$. Nếu $0 \ll 1$ và $b = 0$ thì thu được độ phân giải theo phương đứng đều nhau. Bằng cách tăng giá trị của θ , độ phân giải cao nhất đạt được gần bề mặt. Nếu $\theta > 0$ và $b = 1$, độ phân giải cao thu được ở gần bề mặt và gần đáy.

Ví dụ về một lưới bằng cách sử dụng sự biến đổi theo chiều đứng biến được thể hiện trong Hình PL4 a, b



a. Ví dụ về phân phối dọc sử dụng phân bố độ dày lớp
Số lớp: 10, chiều dày lớp từ 1 tới 10: 0.025, 0.075, 0.1, 0.01, 0.02, 0.02, 0.1, 0.1, 0.075, 0.025.



b. Ví dụ về phân phối dọc sử dụng phân phối biến đổi.
Số lớp: 10, $\sigma_c = 0.1$, $\theta = 5$, $b = 1$

Hình PL4: Ví dụ về chia lưới tính dọc

- Kết hợp lưới Sigma/z - phẳng

Trong miền z - phẳng, sự rời rạc được đưa ra bởi một số rời rạc theo z - phẳng $\{z_i, i = 1, (N_z + 1)\}$, trong đó N_z là số lượng các lớp trong miền z - phẳng z_1 là nhỏ nhất và $z_{N_z + 1}$ là lớn nhất, bằng với độ sâu sigma z_σ . Độ dày lớp tương ứng được cho bởi.

$$\Delta z_i = z_{i+1} - z_i \quad i = 1, N_z \quad (\text{PL-81})$$

Việc rời rạc hóa được minh họa trong Hình PL5 **Error! Reference source not found.** a, b sử dụng tiêu chuẩn hóa cấp độ z, độ sâu đáy được làm tròn đến mức z gần nhất. Do đó, đối với một ô trong lưới ngang với độ sâu trung bình của ô, z_b , các ô trong cột tương ứng trong miền z được bao gồm nếu các tiêu chí sau được thỏa mãn:

$$(z_{i+1} - z_i)/2 \geq z_b \quad i = 1, N_z \quad (\text{PL-82})$$

Độ sâu trung bình của ô, z_b , được tính là giá trị trung bình của độ sâu tại trung tâm của mỗi ô. Đối với một rời rạc tiêu chuẩn, độ sâu tối thiểu được cho bởi z_1 . Cũng tính đến độ sâu chính xác cho trường hợp độ sâu đáy dưới mức tối thiểu z ($z_1 > z_b$) được sử dụng. Ở đây, một hệ số hiệu chỉnh, f_1 , cho độ dày lớp trong ô dưới cùng được giới thiệu. Các yếu tố hiệu chỉnh được sử dụng trong việc tính toán khối lượng và tích phân mặt. Hệ số hiệu chỉnh cho ô dưới cùng được tính bằng:

$$f_1 = \frac{(z_2 - z_b)}{\Delta z_1} \quad (\text{PL-83})$$

Độ dày lớp được hiệu chỉnh được cho bởi $\Delta z_1^* = f_1 \Delta z_1$. Cách tiếp cận điều chỉnh độ sâu đơn giản được minh họa trong Hình PL5a.

Để thể hiện chính xác hơn về độ sâu đáy, một phương pháp điều chỉnh độ sâu tiên tiến có thể được sử dụng. Đối với một ô trong lưới ngang với độ sâu trung bình của ô, z_b các ô trong cột tương ứng trong miền z được bao gồm nếu các tiêu chí sau được thỏa mãn:

$$z_{i+1} > z_b \quad i = 1, N_z \quad (\text{PL-84})$$

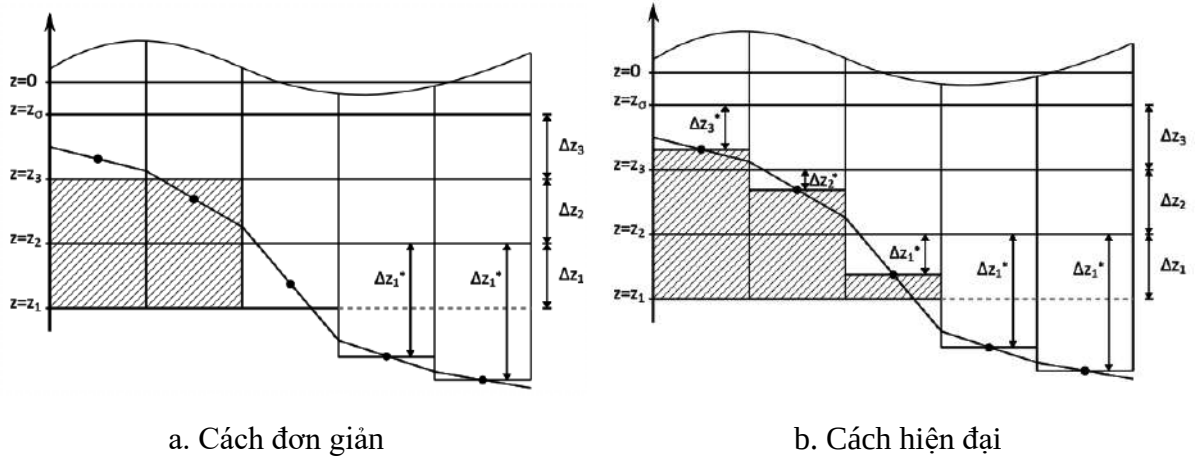
Một hệ số hiệu chỉnh f được dùng cho độ dày lớp

$$f_i = \max\left(\frac{(z_{i+1} - z_b)}{\Delta z_i}, \frac{z_{\min}}{\Delta z_i}\right) \quad z_i < z_b < z_{i+1} \text{ or } z_1 > z_b \quad (\text{PL-85})$$

$$f_i = 1 \quad z_1 \geq z_b$$

Độ dày lớp tối thiểu $\Delta z_{\min}$ được dùng để tránh các giá trị rất nhỏ của hệ số hiệu chỉnh. Độ dày của lớp hiệu chỉnh được cho bởi $\{\Delta z_i^* = f_i \Delta z_i, i = 1, N_z\}$.

Cách tiếp cận điều chỉnh độ sâu hiện đại được minh họa trong Hình PL5b.



Hình PL5: Cách điều chỉnh độ sâu

2.2. Chuyển đổi các phương trình

Cách thức tích phân của hệ phương trình nước nông có thể được viết chung như sau:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = S(U) \quad (\text{PL-86})$$

Trong đó:

U: vector của các biến được bảo tồn.

F: hàm vector biến đổi

S: vector của các giá trị nguồn

Trong hệ tọa độ Descartes, hệ thống các phương trình nước nông có thể viết như sau:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_x^I}{\partial x'} + \frac{\partial \mathbf{F}_y^I}{\partial y'} + \frac{\partial \mathbf{F}_\sigma^I}{\partial \sigma} + \frac{\partial \mathbf{F}_x^V}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_y^V}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{F}_\sigma^V}{\partial \sigma} = \mathbf{S} \quad (\text{PL-87})$$

Trong đó các chữ viết tắt I và V biểu thị các dòng không nhớt (inviscid) và nhớt (viscous) tương ứng:

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix}, \\ \mathbf{F}_x^I &= \begin{bmatrix} h\bar{u} \\ hu^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2) \\ huv \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_x^V = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \\ \mathbf{F}_y^I &= \begin{bmatrix} h\bar{v} \\ hvu \\ hv^2 + \frac{1}{2}g(h^2 - d^2) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_y^V = \begin{bmatrix} 0 \\ hA \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ hA \left(2 \frac{\partial v}{\partial x} \right) \end{bmatrix} \\ \mathbf{F}_\sigma^I &= \begin{bmatrix} h\omega \\ h\omega u \\ h\omega v \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_\sigma^V = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{v_t}{h} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \\ \frac{v_t}{h} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \end{bmatrix} \\ \mathbf{S} &= \begin{bmatrix} 0 \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial x} + fvh - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + hu_s \\ g\eta \frac{\partial d}{\partial y} - fuh - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y'} - \frac{hg}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + hv_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{PL-88})$$

Tích phân phương trình (PL-86) và định lý Gauss để viết lại tích phân biến đổi như sau:

$$\int_{A_i} \frac{\partial U}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma_i} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) ds = \int_{A_i} \mathbf{S}(U) d\Omega \quad (\text{PL-89})$$

Trong đó:

A_i : diện tích/thể tích của ô tính toán

Ω : biến tích phân được định nghĩa trên A_i , Γ_i là ranh giới của ô thứ i

ds : biến tích phân dọc theo ranh giới.

$\mathbf{n}$: là đơn vị vector pháp tuyến hướng ra ngoài dọc theo ranh giới.

Đánh giá tích phân diện tích/khối lượng theo quy tắc cầu phương một điểm, điểm vuông góc là tâm của ô, phương trình (PL-89) có thể được viết như sau:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{A_i} \sum_j^{NS} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} \Delta \Gamma_j = S_i \quad (\text{PL-90})$$

Ở đây U_i và S_i lần lượt là giá trị trung bình của U và S trên ô tính toán thứ i và được xác định tại trung tâm ô lưới, NS là số cạnh của ô lưới, $\mathbf{n}_j$ là đơn vị vector thông thường bên ngoài ở phía bên cạnh thứ tự j và $\Delta \Gamma_j$ chiều dài/diện tích của giao diện thứ j .

Cả lược đồ thứ nhất và thứ hai đều có thể được áp dụng cho việc rời rạc không gian.

Đối với trường hợp 3D, một cách giải gần đúng Riemann (Roe, 1981) được sử dụng để tính toán các dòng đối lưu tại giao diện thẳng đứng của các ô (mặt phẳng $x'y'$). Sử dụng lược đồ của Roe, các biến phụ thuộc ở bên trái và bên phải của mặt phẳng phải được ước tính. Độ chính xác không gian bậc hai đạt được bằng cách sử dụng một kỹ thuật hồi phục gradient tuyến tính. Các gradient trung bình được ước tính bằng cách sử dụng cách tiếp cận của Jawahar và Kamath (2000).

2.3. Tích phân theo thời gian

Xem xét hình thức chung của các phương trình

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \mathbf{G}(U) \quad (\text{PL-91})$$

Đối với mô phỏng 3D, lược đồ sai phân là bán ẩn. Các thành phần nằm ngang (trục x) là sơ đồ ẩn, còn phương y một phần là sơ đồ ẩn và một phần là sơ đồ hiện.

Xem xét các phương trình dạng bán ẩn:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = G_h(U) + G_v(BU) = G_h(U) + G_v^I(U) + G_v^V(U) \quad (\text{PL-92})$$

Trong đó các chỉ số dưới h và v đề cập lần lượt đến các thành phần ngang và đứng, còn các chữ viết tắt đề cập lần lượt đến các thành phần độ nhám và nhót.

Phương pháp bậc thấp được sử dụng cho các phương trình nước nông 3D có thể được viết dưới dạng:

$$U_{n+1} - \frac{1}{2} \Delta t (G_v(U_{n+1}) + G_v(U_n)) = U_n + \Delta t G_h(U_n) \quad (\text{PL-93})$$

Các thành phần nằm ngang đầu tiên được sai phân bằng cách sử dụng biểu thức Euler hiện và các thành phần thứ hai theo chiều đứng sử dụng quy tắc hình thang ẩn.

Một phương pháp lựa chọn cao hơn có thể viết như sau:

$$\begin{aligned} U_{n+1/2} - \frac{1}{4} \Delta t (G_v(U_{n+1/2}) + G_v(U_n)) &= U_n + \frac{1}{2} \Delta t G_h(U_n) \\ U_{n+1} - \frac{1}{2} \Delta t (G_v(U_{n+1}) + G_v(U_n)) &= U_n + \Delta t G_h(U_{n+1/2}) \end{aligned} \quad (\text{PL-94})$$

Các thành phần ngang thứ hai được tích phân bằng phương pháp Runge-Kutta và các thành phần theo chiều đứng được lựa chọn sử dụng quy tắc hình thang ẩn.

Phương pháp lựa chọn thấp trong phương trình truyền chất 3D được viết như sau:

$$U_{n+1} - \frac{1}{2} \Delta t (G_v^V(U_{n+1}) + G_v^V(U_n)) = U_n + \Delta t G_h(U_n) + \Delta t G_v^I(U_n) \quad (\text{PL-95})$$

Các thành phần ngang và các thành phần đối lưu theo chiều dọc được tích phân bằng cách sử dụng phương thức Euler ẩn đầu tiên và các thành phần nhót dọc được tích phân bằng cách sử dụng quy tắc hình thang ẩn thứ hai. Giải pháp lựa chọn cao hơn có thể viết như sau:

$$\begin{aligned} U_{n+1/2} - \frac{1}{4} \Delta t (G_v^V(U_{n+1/2}) + G_v^V(U_n)) &= \\ U_n + \frac{1}{2} \Delta t G_h(U_n) + \frac{1}{2} \Delta t G_v^I(U_n) & \\ U_{n+1} - \frac{1}{2} \Delta t (G_v^V(U_{n+1}) + G_v^V(U_n)) &= \\ U_n + \Delta t G_h(U_{n+1/2}) + \Delta t G_v^I(U_{n+1/2}) & \end{aligned} \quad (\text{PL-96})$$

Thành phần nằm ngang và các thành phần đối lưu theo chiều dọc được tích phân bằng phương pháp Runge-Kutta thứ hai và các thành phần theo chiều dọc được tích phân bằng cách sử dụng quy tắc hình thang ẩn thứ hai cho các thành phần theo chiều dọc.

2.4. Điều kiện biên

2.4.1. Biên kín

Dọc các biên khép kín (ranh giới đất liền), tất cả các dòng thông thường bị buộc phải có giá trị bằng không cho tất cả các biên. Đối với các phương trình động lượng, điều này dẫn đến trượt hoàn toàn dọc theo biên khép kín. Đối với phương trình nước nông, điều kiện không trượt cũng có thể được áp dụng ở nơi mà cả hai thành phần vận tốc pháp tuyến và tiếp tuyến đều bằng không.

2.4.2. Biên hở

Đối với phương trình nước nông, có thể áp dụng một số điều kiện biên khác nhau.

Các điều kiện biên thông lượng (flux), vận tốc, lưu lượng đều được áp dụng bằng cách sử dụng phương pháp tiếp cận yếu (weak approach). Một kỹ thuật ô ảo (ghost cell) được áp dụng trong đó các biến nguyên thủy trong ô ảo được chỉ định. Mực nước được giả thiết dựa trên giá trị của ô bên trong liền kề và vận tốc được giả thiết dựa trên thông tin biên. Đối với một biên độ lưu lượng, vận tốc ngang được mặc định là 0 cho dòng chảy vào và giá trị âm cho dòng chảy ra. Biên thông lượng (flux) sau đó được tính toán bằng cách sử dụng một cách giải Riemann gần đúng. Lưu ý rằng bằng cách sử dụng công thức yếu cho một biên lưu lượng, hiệu quả trên biên có thể đi chệch khỏi lưu lượng xác định.

Điều kiện Flather (1976) là một trong những điều kiện biên mở hữu hiệu nhất. Nó rất có ích trong việc kết nối từ mô hình rộng lớn xuống các mô hình cục bộ (Oddo và Pinardi (2007)). Sự mất ổn định thường được quan sát thấy khi cường độ mật độ phân tầng ở ranh giới mực nước, có thể tránh được bằng cách sử dụng điều kiện Flather.