ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI

TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Phạm Văn Tiến

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC YẾU TỐ THỦY ĐỘNG LỰC ĐẾN HIỆN TƯỢNG NGẬP LỤT KHU VỰC VEN BIỂN TỈNH THANH HOÁ

LUẬN ÁN TIẾN SĨ HẢI DƯƠNG HỌC

Hà Nội - 2026

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI

TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Phạm Văn Tiến

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC YẾU TỐ THỦY ĐỘNG LỰC ĐẾN HIỆN TƯỢNG NGẬP LỤT KHU VỰC VEN BIỂN TỈNH THANH HOÁ

Chuyên ngành: Hải dương học

Mã số: 9440228.01

LUẬN ÁN TIẾN SĨ HẢI DƯƠNG HỌC

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. PGS. TS. Nguyễn Bá Thủy

2. PGS. TS. Nguyễn Kim Cương

Hà Nội - 2026

Lời cam đoan

Tác giả xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của bản thân tác giả. Các kết quả nghiên cứu và các kết luận trong luận án này là trung thực, không sao chép từ bất kỳ một nguồn nào và dưới bất kỳ hình thức nào.

Tác giả

Phạm Văn Tiến

Lời cảm ơn

Trước tiên, Nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn đến Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho tác giả trong quá trình nghiên cứu và hoàn thành luận án.

Với lòng kính trọng và biết ơn sâu sắc, tác giả xin gửi lời cảm ơn đặc biệt đến hai thầy hướng dẫn là PGS.TS. Nguyễn Bá Thủy và PGS. TS. Nguyễn Kim Cương đã tận tình giúp đỡ tác giả từ những bước đầu tiên xây dựng hướng nghiên cứu, cũng như trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án.

Tác giả xin gửi lời cảm ơn chân thành đến các Thầy, Cô trong Bộ môn Khoa học và Công nghệ Biển đã luôn hỗ trợ và chia sẻ trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án.

Tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, phòng Đào tạo, các phòng ban chức năng và Khoa Khí tượng Thủy văn Hải dương học đã tạo điều kiện thuận lợi cho tác giả trong quá trình học tập và hoàn thành luận án.

Tác giả xin gửi lời cảm ơn đến lãnh đạo và các đồng nghiệp tại Trung tâm Nghiên cứu Thủy văn và Hải văn - Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu đã tạo điều kiện thuận lợi cho NCS trong công tác để tác giả có thời gian học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án này.

Tác giả xin gửi lời cảm ơn đến các nhà khoa học, các cơ quan, các cá nhân đã có những góp ý về khoa học cũng như hỗ trợ nguồn tài liệu, số liệu cho tác giả trong suốt quá trình làm luận án.

Tác giả xin gửi lời cảm ơn đề tài Độc lập cấp quốc gia mã số ĐTĐL.CN-46/22 và đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ Nông nghiệp và Môi trường mã số TNMT.2024.06.03 đã hỗ trợ tác giả trong quá trình làm luận án.

Cuối cùng, tác giả xin gửi lời cảm ơn đến những người thân yêu trong gia đình đã luôn chia sẻ và động viên tác giả hoàn thành tốt luận án này.

Phạm Văn Tiến

Mục lục

Lời cam đoan 1
Lời cảm ơn 2
Mục lục i
Danh mục chữ viết tắt iv
Các thuật ngữ sử dụng trong luận án vii
Danh mục bảng viii
Danh mục hình vẽ, đồ thị ix
MỞ ĐẦU 1
1. Tính cấp thiết của nghiên cứu 1
2. Mục tiêu của luận án: 2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu 2
4. Câu hỏi nghiên cứu 3
5. Đóng góp mới của luận án 3
6. Luận điểm bảo vệ của luận án 4
7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn 4
8. Cấu trúc luận án 5
CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU NƯỚC DÂNG DO BÃO VÀ NGẬP LỤT KHU VỰC VEN BIỂN 7
1.1. Tổng quan tình hình nghiên cứu trên thế giới 7
1.2. Tổng quan tình hình nghiên cứu ở Việt Nam 16
1.3. Tiểu kết Chương 1 22

CHƯƠNG 2: PHẠM VI, SỐ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU .. 24
2.1. Phạm vi nghiên cứu 24
2.2. Số liệu phục vụ nghiên cứu 26
2.3. Phương pháp nghiên cứu 29
2.3.1. Mô hình mô phỏng ngập lụt SuWAT 33
2.3.2. Kết nối mô hình thủy triều nước dâng do bão và mô hình sóng ... 40
2.3.3. Mô hình bão giải tích 42
2.3.4. Mô hình dòng chảy sông 44
2.4. Miền, lưới tính và địa hình cho mô hình 44
2.4.1. Miền tính, lưới tính và địa hình 44
2.4.2. Công trình bảo vệ bờ biển tại Thanh Hóa 47
2.4.3. Lựa chọn ma sát đáy 48
2.5. Phương pháp đánh giá sai số kết quả mô phỏng 52
2.6. Tiểu kết Chương 2 52
CHƯƠNG 3: ẢNH HƯỞNG CỦA TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC YẾU TỐ THUỶ ĐỘNG LỰC ĐẾN ĐỘ LỚN NƯỚC DÂNG, ĐỘ CAO SÓNG TẠI VEN BỜ TÂY VỊNH BẮC BỘ VÀ NGẬP LỤT TẠI VEN BIỂN TỈNH THANH HÓA 54
3.1. Kiểm định mô hình tại khu vực nghiên cứu 54
3.2. Ảnh hưởng của tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão tới độ lớn nước dâng và độ cao sóng ở ven bờ tây vịnh Bắc Bộ 66
3.2.1. Các kịch bản mô phỏng 67
3.2.2. Ảnh hưởng của pha thủy triều đến nước dâng và sóng trong bão 70

3.2.3. Ảnh hưởng của sóng tới nước dâng do bão 77
3.2.4. Ảnh hưởng của nước dâng tới độ cao sóng 82
3.3. Ảnh hưởng của thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông tới ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa 86
3.3.1. Các kịch bản tính toán..... 87
3.3.2. Diễn biến ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa trong bão Doksuri (9/2017) 87
3.3.3. Ảnh hưởng của pha thủy triều tới ngập lụt ven biển Thanh Hóa . 89
3.3.4. Ảnh hưởng của sóng biển tới ngập lụt ven biển Thanh Hóa 92
3.3.5. Ảnh hưởng của dòng chảy sông đến ngập lụt ven biển Thanh Hóa 96
3.4. Tiểu kết Chương 3..... 103
CHƯƠNG 4: NGUY CƠ NGẬP LỤT TẠI VEN BIỂN THANH HÓA DO NƯỚC DÂNG DO BÃO TRONG BỐI CẢNH BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU..... 106
4.1. Xu thế hoạt động của bão trên vịnh Bắc Bộ và nước dâng do bão tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ ở giai đoạn khí hậu hiện tại và tương lai..... 106
4.2. Nguy cơ ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa 109
4.3. Tiểu kết Chương 4..... 122
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ..... 124
1. Kết luận: 124
2. Kiến nghị: 126
DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN 128
TÀI LIỆU THAM KHẢO..... 130

Danh mục chữ viết tắt

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
ADCIRC	ADvanced CIRCulation model	Mô hình hoàn lưu biển ADCIRC
ATNĐ		Áp thấp nhiệt đới
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5	Dự án đối chứng các Mô hình khí hậu lần 5
Coupled		Tích hợp
DCS		Dòng chảy sông
Delft3D	Delft Hydraulics	Bộ mô hình tích hợp 2D/3D cho dòng chảy, vận chuyển trầm tích, hình thái học, sóng, chất lượng nước, và hệ sinh thái do Viện Thủy lực Delft của Hà Lan nghiên cứu phát triển
FVCOM	Finite Volume Community Ocean Model	Mô hình đại dương cộng đồng sử dụng phương pháp thể tích hữu hạn
HT	High tide	Pha thủy triều cao
IFORM	Integrated Formula of Wave Overtopping and Runup Modeling	Mô hình sóng tràn IFORM
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	Ban liên chính phủ về Biến đổi khí hậu

JMA	Japan Meteorological Agency	Cơ quan khí tượng nhật bản
LT	Low tide	Pha thuỷ triều thấp
LULC	Land use/land cover	Mã sử dụng đất LULC
ME	Mean Error	Sai số trung bình
MAE	Mean absolute Error	Sai số trung bình tuyệt đối
MIKE		Bộ phần mềm tiên tiến để mô phỏng và phân tích dòng chảy, sóng và các quá trình trong môi trường biển và ven biển được phát triển bởi Viện Thủy lực Đan Mạch
MRI/AGCM	Meteorology Research Institute/Atmosphere General Circulation Model	Mô hình hoàn lưu chung khí quyển do viện Viện Nghiên cứu Khí tượng Nhật Bản phát triển
MT	Mean tide	Pha thuỷ triều trung bình
NBD	Sea level rise	Nước biển dâng
NDDB		Nước dâng do bão
NDDS		Nước dâng do sóng
PS	Peak surge	Đỉnh nước dâng do bão
PW	Peak wave	Đỉnh sóng (Chiều cao sóng có nghĩa lớn nhất)
RCP 8.5	Representative Concentration Pathway 8.5	Kịch bản nồng độ khí nhà kính cao 8.5

ROMS	Regional Ocean Modeling System	Hệ thống mô hình đại dương khu vực
SCHISM	Semi-implicit Cross-scale Hydroscience Integrated System Model	Hệ thống mô hình thủy văn tích hợp quy mô chéo bán ẩn
SuWAT	Surge, WAve and Tide	Mô hình tích hợp thủy triều, sóng biển và nước dâng do bão
SWAN	Simulating WAves Nearshore	Mô hình mô phỏng sóng ven bờ
TT		Thuỷ triều

Các thuật ngữ sử dụng trong luận án

TT	Thuật ngữ	Ý nghĩa
1	Nước dâng do bão	Sự gia tăng mực nước trên nền thủy triều do tác động của ứng suất gió và độ giảm khí áp trong bão. Trong trường hợp xét đến ảnh hưởng của sóng, nước dâng do bão sẽ bao gồm thêm thành phần nước dâng do sóng.
2	Nước dâng do sóng	Là sự dâng lên của mực nước do ứng suất bức xạ sóng và ứng suất bề mặt do sóng, trong đó nước dâng tạo bởi ứng suất bức xạ sóng là do quá trình chuyển đổi động năng sóng thành thế năng cột nước.
3	Ngập lụt ven biển	Là hiện tượng nước biển tràn vào đất liền gây gập. Nguyên nhân gây ra ngập lụt ven biển bao gồm: thủy triều, nước dâng do bão, sóng, dòng chảy sông, mưa, mực nước biển dâng, sụt lún và sóng thần. Trong nghiên cứu này không xét đến các nguyên nhân như mưa, sụt lún, sóng thần.

Danh mục bảng

Bảng 2.1. Thông tin của các miền tính 45
Bảng 2.2. Giá trị n theo phân loại mã LULC 49
Bảng 2.3. Giá trị n áp dụng trong nghiên cứu 50
Bảng 3.1. Các chỉ số đánh giá mô hình 65
Bảng 3.2. Danh sách kịch bản về cấp bão thực hiện mô phỏng 68
Bảng 3.3. Danh sách kịch bản mô phỏng tác động của các yếu tố thủy động lực đến ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa 87
Bảng 3.4. Thống kê diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với trường hợp mô phỏng có và không xét tới ảnh hưởng của sóng biển 95
Bảng 3.5. Thống kê diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với các kịch bản mô phỏng 100
Bảng 4.1. Số lượng bão hoạt động trên vịnh Bắc Bộ theo cấp bão trong giai đoạn khí hậu hiện tại (1951-2010) và tương lai (2051-2100). Số liệu của mô hình MRI–CGCM3. 107
Bảng 4.2. Bảng thông số của các cấp bão áp dụng trong tính toán nguy cơ ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa 111
Bảng 4.3. Diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với các cấp bão (cấp 10-15) đổ bộ ở giai đoạn hiện tại 117
Bảng 4.4. Diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với các cấp bão (cấp 10-15) đổ bộ ở năm 2050 117
Bảng 4.5. Diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với các cấp bão (cấp 10-15) đổ bộ năm 2100 118
Bảng 4.6. Tỉ lệ gia tăng của tổng diện tích ngập theo các cấp bão (cấp 10-15) đổ bộ ở năm 2050 và năm 2100 so với hiện tại 118

Danh mục hình vẽ, đồ thị

Hình 1.1. Hình ảnh bãi biển Madeira, Florida, Mỹ: trước, trong và sau bão Helene (9/2024) [Andrew và cộng sự, 2025]..... 8
Hình 1.2. Ảnh hưởng của sóng lên đỉnh mực nước dâng do bão Katrina 2005 [Dietrich và cs, 2011]..... 11
Hình 1.3. Bản đồ thể hiện sự chi phối về mặt không gian của các yếu tố gây ngập lụt khác nhau trong cơn bão Florence. Các hình (b–e) là hình phóng to từ hình (a) ở các khu vực khác nhau [Ye và cộng sự, 2021]..... 14
Hình 1.4. Đô sâu ngập lụt lớn nhất khi ttriều cao kết hợp với nước biển dâng 0,5 m vào năm 2060 (a) và 1,0 m vào năm 2100 (b) [Li và cộng sự, 2018] .. 16
Hình 1.5. (a) Phân bố nước dâng lớn nhất với phương án có tính tới ứng suất bức xạ sóng và (b) Phần trăm đóng góp của nước dâng do ứng suất bức xạ sóng trong bão Xangsane tháng 9 năm 2006 [Thuy và cộng sự, 2017] 19
Hình 2.1. Phạm vi nghiên cứu của luận án: (a) Ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và vị trí các trạm/điểm phân tích dữ liệu, (b) Phạm vi từ Hậu Lộc - Sầm Sơn, tỉnh Thanh Hóa. 25
Hình 2.2. Các thành phần mực nước ven bờ (a) và Dao động theo thời gian của các thành phần mực nước trong bão (b) [Đỗ Đình Chiến, 2015] 30
Hình 2.3. Sơ đồ khung nghiên cứu của luận án 33
Hình 2.4. Hệ số C_D (a) và ứng suất bề mặt tại vận tốc gió U_{10}=18.45m/s cho trường hợp mô hình có và không xét ảnh hưởng của sóng [Jannsen, 1992] .. 39
Hình 2.5. Thuật toán mô tả biên di động trong mô hình SuWAT [Kim và cộng sự, 2008]. 40
Hình 2.6. Sơ đồ tính toán các thành phần trong SuWAT [Kim và cộng sự, 2008] 41
Hình 2.7. Sơ đồ tích hợp của mô hình SuWAT cho lưới lồng 6 lớp (n=6) [Kim và cộng sự, 2015] 42

Hình 2.8. Miền của khu vực nghiên cứu gồm 6 cấp lưới: (a) miền ngoài cùng, (b, c, d, e) các miền trung gian và (f) miền trong cùng tính ngập lụt 46
Hình 2.9. Cao trình đê/đường giao thông khu vực nghiên cứu 48
Hình 2.10. Phân bố mã LULC (a) và số Manning (b) trong miền tính D6..... 51
Hình 3.1. Quỹ đạo của bão Doksuri (9/2017), đổ bộ vào các tỉnh Quảng Bình và Hà Tĩnh [https://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/] 55
Hình 3.2. Ảnh chụp ngập lụt do nước dâng và sóng lớn trong bão Doksuri (9/2017): (a) tại Cát Hải, Hải Phòng, (b) tại Hải Hậu, Nam Định, (c) tại Sầm Sơn, Thanh Hóa và (d) tại Cửa Lò, Nghệ An ((a), (b): https://www.nguoiduatin.vn/anh-huong-cua-bao-so-10-cac-tinh-duyen-hai-bac-bo-ngap-lut-204339095.htm; (c), (d): https://tienphong.vn/bao-so-10-can-quet-mien-trung-it-nhat-4-nguoi-chet-post976535.tpo)..... 55
Hình 3.3. Dao động mực nước quan trắc, thủy triều và nước dâng tại Hòn Dấu (a) và Hòn Ngư (b) trong cơn bão Doksuri (9/2017). 56
Hình 3.4. sơ đồ mạng lưới sông Mã và sông Chu..... 57
Hình 3.5. So sánh mực nước tại các trạm thủy văn Lý Nhân (a) và Xuân Khanh (b) trong thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng..... 58
Hình 3.6. So sánh mực nước thủy triều mô phỏng từ mô hình SuWAT và phân tích điều hòa tại trạm Hòn Dấu (a), Sầm Sơn (b) và Hòn Ngư (c) tháng 9/2017 59
Hình 3.7. So sánh nước dâng do bão tính toán bằng mô hình couple nước dâng và sóng tại Hòn Dấu (a) và Hòn Ngư (b) trong bão Doksuri (9/2017)..... 61
Hình 3.8. So sánh mực nước tổng cộng trong bão Doksuri (9/2017): (a) Hòn Dấu, (b) Hòn Ngư và (c) Quảng Châu 62
Hình 3.9. Vị trí quỹ đạo phao SIO trong thời gian bão Doksuri 2017 (9/2017) 63

Hình 3.10. So sánh độ cao sóng có nghĩa tính từ mô hình với quan trắc trong bão Doksuri 2017 từ phao SIO..... 64
Hình 3.11. So sánh độ cao sóng có nghĩa tính từ mô hình và quan trắc trong bão Doksuri (9/2017) tại trạm Hòn Ngư..... 64
Hình 3.12. Phân bố không gian của nước dâng do bão lớn nhất (a) và độ cao sóng có nghĩa lớn nhất (b) trong cơn bão Doksuri (9/2017), được tính bằng mô hình kết hợp nước dâng và sóng. 66
Hình 3.13. Áp suất tâm bão Doksuri và minh hoạ khoảng thời gian thay đổi khí áp tâm bão (thời gian trước khi bão Doksuri (9/2017) đổ bộ vào các tỉnh Quảng Trị và Hà Tĩnh) [https://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/]. 68
Hình 3.14. Dao động nước dâng do bão trường hợp kịch bản Exp09 (siêu bão) đổ bộ vào pha thủy triều thấp, trung bình và cao: (a) Hòn Dấu, (b) Hòn Ngư và (c) Hòn La 72
Hình 3.15. Phân bố không gian của chênh lệch nước dâng do bão lớn nhất giữa bão kịch bản Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều thấp và triều cao. 73
Hình 3.16. Chênh lệch nước dâng do bão lớn nhất trong các kịch bản mô phỏng 73
Hình 3.17. Độ cao sóng có nghĩa (Hs) theo thời gian tại Hòn La trong kịch bản bão Exp01 (a), Exp05 (b) và Exp09 (c) đổ bộ vào pha thủy triều thấp, trung bình và cao. 75
Hình 3.18. Chênh lệch độ cao sóng có nghĩa lớn nhất với bão kịch bản Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều cao và pha thủy triều thấp 76
Hình 3.19. Chênh lệch độ cao sóng có nghĩa lớn nhất tại Hòn Dấu và Hòn Ngư trong các kịch bản thủy triều cao và thủy triều thấp so với thủy triều trung bình 77

Hình 3.20. Dao động theo thời gian của nước dâng do bão tại Hòn Dấu (a), Hòn Ngư (b) và Hòn La (c) trong kịch bản Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều trung bình trong trường hợp mô hình có và không kết hợp với sóng 78
Hình 3.21. Chênh lệch nước dâng lớn nhất giữa phương án mô hình có và không tích hợp với sóng trong kịch bản Exp09 ở pha thủy triều trung bình 79
Hình 3.22. Nước dâng do sóng lớn nhất tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La trong các pha thủy triều thấp (a), trung bình (b) và cao (c)..... 81
Hình 3.23. Nước dâng do sóng lớn nhất với các kịch bản cấp bão tại Hòn La, trong pha thủy triều thấp, trung bình và cao 82
Hình 3.24. Dao động độ cao sóng có nghĩa tại Hòn La trong kịch bản bão Exp01 (a), Exp05 (b), và Exp09 (c) đổ bộ vào pha thủy triều trung bình. Trường hợp mô hình tính sóng có và không kết hợp với nước dâng do bão 83
Hình 3.25. Chênh lệch của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất giữa mô hình có và không tích hợp với nước dâng do bão trong kịch bản bão Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều trung bình. 84
Hình 3.26. Chênh lệch của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La giữa trường hợp mô hình có và không tích hợp với nước dâng do bão. Bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp (a), trung bình (b) và cao (c)..... 85
Hình 3.27. Phân bố mực nước tại thời điểm: (a) Triều trung bình, (b) Mực nước tổng hợp cao nhất, (c) Mực nước đang xuống và (d) Mực nước xuống thấp nhất. 88
Hình 3.28. Minh hoạ thời điểm bão Doksuri (9/2017) đổ bộ vào 3 pha thủy triều trong mô phỏng ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa 89
Hình 3.29. Dao động mực nước tổng hợp trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản mô phỏng tại các vị trí: (a) Ven biển Hậu Lộc (HL01), (b) Ven biển Sầm Sơn (SS01) và (c) Trạm Quảng Châu (QC). 90

Hình 3.30. Phân bố ngập lụt trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản mô phỏng: (a) chỉ do đỉnh triều, (b) bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp, (c) bão đổ bộ vào pha thủy triều trung bình và (c) bão đổ bộ vào pha thủy triều cao. 92
Hình 3.31. Tổng diện tích ngập do bão Doksuri (9/2017) với các phương án mô phỏng 92
Hình 3.32. Phân bố ngập lụt trong bão Doksuri (9/2017), trường hợp mô phỏng (a) không và (b) có xét tới ảnh hưởng của sóng biển..... 94
Hình 3.33. Dao động mực nước tổng hợp trong bão với phương án tính có và không xét tới ảnh hưởng của sóng biển tại các vị trí: (a) HL01, (b) HH01, (c) SS01, (d) MA01 95
Hình 3.34. Biến thiên lưu lượng nước tại SM và SC làm biên sông cho mô hình SuWAT..... 96
Hình 3.35. Dao động mực nước tại các điểm MA01 (a), QC (b), MA02(c) và MA03(d) với 04 kịch bản tính toán trong bão Doksuri (9/2017) 97
Hình 3.36. Dao động nước tại các điểm SS01 (a), và HH01(b) với 04 kịch bản tính toán trong bão Doksuri (9/2017)..... 98
Hình 3.37. Phân bố ngập lụt lớn trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản mô phỏng: Chỉ với thủy triều (a), Thủy triều và nước dâng do bão (b), Thủy triều, nước dâng do bão và nước dâng do sóng (c), Thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông (d)..... 99
Hình 3.38. Tổng diện tích ngập do bão Doksuri (9/2017) với các phương án mô phỏng 100
Hình 3.39. Phân bố ngập lụt lớn trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản mô phỏng về cấp lũ trên khu vực: (a) báo động I, (b) báo động II, (c) báo động III 101
Hình 3.40. Tổng diện tích ngập do bão Doksuri (9/2017) với các phương án mô phỏng về cấp lũ trên khu vực 102

Hình 3.41. Dao động nước tại các MA01 (a), QC (b), MA02(c) và MA03 với kịch bản bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng khi với các cấp lũ trên khu vực. 102
Hình 4.1. Quỹ đạo bão mạnh (từ cấp 12): (a) trong giai đoạn 1951–2010 và (b) giai đoạn 2051–2110. Số liệu của mô hình MRI–CGCM3 108
Hình 4.2. Phân bố nước dâng do bão lớn nhất tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ trong giai đoạn khí hậu hiện tại 1951–2010 (a) và tương lai 2051–2110 (b) 109
Hình 4.3. Phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất tại khu vực nghiên cứu với các cấp bão (cấp 10–15) đổ bộ ở giai đoạn hiện tại 114
Hình 4.4. Phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất tại khu vực nghiên cứu với các cấp bão (cấp 10–15) đổ bộ năm 2050 115
Hình 4.5. Phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất tại khu vực nghiên cứu với các cấp bão (cấp 10–15) đổ bộ năm 2100 116
Hình 4.6. Tổng diện tích ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa với các cấp bão từ 10 đến 15, đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và năm 2100 119
Hình 4.7. Dao động mực nước tại vị trí HL02, HH02 và SS01 với các cấp bão đổ bộ ở giai đoạn hiện tại 119
Hình 4.8. Dao động mực nước tại vị trí HH02 với bão cấp 11 (a) và cấp 12 (b) đổ bộ giai đoạn hiện tại, năm 2050 và 2100 120
Hình 4.9. Dao động mực nước với bão cấp 13 đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và 2100 tại HL02 (a) và SS01 (b) 120
Hình 4.10. Dao động mực nước với bão cấp 14 đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và 2100 tại HL02 (a) SS01 (b) 120
Hình 4.11. Dao động mực nước với bão cấp 15 đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và 2100 tại MA02 (a) HL02 (b) 121
Hình 4.12. Tỉ lệ tổng diện tích ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa so với tổng diện tích đất liền của khu vực nghiên cứu ngập lụt với các cấp bão từ 10 đến 15, đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và năm 2100 122

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của nghiên cứu

Ngập lụt ven biển là một loại thiên tai thường do tác động tổng hợp của nước dâng do bão, thủy triều, sóng và dòng chảy sông gây nên. Hiện tượng này xảy ra hàng năm và gây ra thiệt hại đáng kể về con người, tài sản và môi trường ở vùng ven biển tại nhiều nước trên thế giới, trong đó có Việt Nam. Trên thế giới, lịch sử đã ghi nhận nhiều cơn bão gây ngập lụt và tàn phá các khu vực ven biển, có thể kể đến như bão Katrina (2005), bão Sandy (2012), bão Irma (2017) và bão Helene (9/2024) ở Mỹ; các cơn bão Sidr (2007) và bão Amphan (2020) ở Ấn Độ và Bangladesh. Tại Việt Nam, đã chứng kiến nhiều trận lũ lụt ven biển gây ra bởi nước biển dâng cao do bão, ví dụ như các cơn bão Wukong (2000), Damrey (2005), Xangsane (2006), Ketsana (2009), Doksuri (2017), Vamco (2020), Trami (2024), Kajiki (2025) và Bualoi (2025).

Trước diễn biến phức tạp và tần suất xuất hiện cao của nước dâng do bão, hiện tượng này từ lâu đã trở thành trọng tâm nghiên cứu của giới chuyên gia và các nhà quản lý nhằm nâng cao năng lực dự báo, cảnh báo, cũng như tối ưu hóa công tác ứng phó và quy hoạch hạ tầng cho những khu vực ven biển có nguy cơ ngập lụt cao. Các nghiên cứu thường áp dụng hai phương pháp cơ bản là phân tích thống kê và mô hình hóa. Trong những năm qua, nghiên cứu ngập lụt ven biển đã có nhiều tiến bộ nhờ sự hiểu biết ngày càng rõ về nguyên nhân, cơ chế gây ra ngập lụt cũng như những tiến bộ về lý thuyết và năng lực tính toán. Hiện tại, đã có nhiều mô hình được xây dựng để mô phỏng nước dâng và ngập lụt ven biển do bão. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu về ngập lụt vùng ven biển do nước dâng do bão vẫn còn những hạn chế để ứng dụng trong thực tiễn. Các nguyên nhân cụ thể bao gồm: Hiểu biết chưa đầy đủ về cơ chế và tương tác giữa các yếu tố gây nước dâng và ngập lụt ven biển; nhiều quá trình được giả định đơn giản hóa; năng lực tính toán chưa cho phép thực hiện mô phỏng chi tiết theo không gian. Do vậy, trong nghiên cứu này tập trung làm sáng tỏ thêm về tương tác giữa các yếu tố thủy động lực bao gồm thủy triều, sóng và nước dâng do

bão tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ, nơi có biên độ thủy triều lớn và tần suất bão đổ bộ cao nhất trên dải ven biển Việt Nam. Thanh Hóa thuộc khu vực Bắc Trung Bộ của Việt Nam, phía đông tiếp giáp vịnh Bắc Bộ với đường bờ biển dài khoảng 102 km, là tỉnh có nhiều trung tâm kinh tế - du lịch trọng điểm ven biển như Khu kinh tế Nghi Sơn, các đô thị du lịch như Sầm Sơn, Hải Tiến, các khu vực này đã nhiều lần bị ngập trên diện rộng do tác động tổng hợp của các yếu tố thủy động lực khi bão ảnh hưởng, và có nguy cơ ngập lụt ngày càng cao do biến đổi khí hậu và nước biển dâng trong tương lai. Do đó, cần có các căn cứ khoa học về sự tương tác tổng hợp các yếu tố gây ngập ven biển để hỗ trợ cho công tác quản lý, quy hoạch hạ tầng ven biển. Chính vì vậy, luận án lựa chọn ven biển Thanh Hoá làm khu vực nghiên cứu ảnh hưởng của thuỷ triều, nước dâng do bão, sóng và dòng chảy sông tới ngập lụt tại khu vực và nguy cơ ngập lụt tại đây trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng. Đây là những mục tiêu chính mà đề tài "***Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố thủy động lực tới hiện tượng ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa***" sẽ thực hiện nhằm góp phần giải quyết một số hạn chế đã nêu ở trên.

2. Mục tiêu của luận án:

Mục tiêu của luận án này là đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố thủy động lực (thủy triều, nước dâng do bão, sóng trong bão, dòng chảy sông) tới nước dâng do bão ở ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa.

Để đạt được mục tiêu chung ở trên, các mục tiêu cụ thể được xác định gồm:

(1) Đánh giá tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ.

(2) Đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố thủy động lực tới ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa.

(3) Đánh giá nguy cơ ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu: Ngập lụt ven biển và các yếu tố gây ngập lụt ven biển

như thủy triều, nước dâng do bão, sóng trong bão và dòng chảy sông.

Phạm vi nghiên cứu:

- Tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão được tập trung nghiên cứu trong phạm vi ven bờ tây vịnh Bắc Bộ.

- Ảnh hưởng của các yếu tố thủy động lực tới ngập lụt và nguy cơ ngập lụt ven biển do nước dâng do bão được tập trung nghiên cứu cho khu vực ven biển từ Hậu Lộc đến Sầm Sơn, tỉnh Thanh Hóa.

- Yếu tố nghiên cứu: Thủy triều, nước dâng do bão, sóng trong bão, dòng chảy sông và ngập lụt ven biển.

- Phạm vi thời gian: Ở giai đoạn hiện tại với dữ liệu địa hình và cao trình đê được xác định ở thời điểm năm 2023 và tương lai (năm 2050 và 2100).

4. Câu hỏi nghiên cứu

Luận án tập trung vào giải đáp các câu hỏi sau:

(1) Tương tác tổng hợp giữa thủy triều, nước dâng do bão và sóng biển như thế nào và tương tác đó có ảnh hưởng tới độ lớn nước dâng, độ cao sóng theo các cấp bão khác nhau tại khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ?

(2) Vai trò và mức độ đóng góp của từng thành phần: Thủy triều, sóng biển, nước dâng do bão và dòng chảy sông tới phạm vi và độ sâu ngập lụt khu vực ven biển tỉnh Thanh Hóa như thế nào?

(3) Mức độ ngập lụt tại khu vực ven biển tỉnh Thanh Hóa theo các kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng sẽ ra sao?

5. Đóng góp mới của luận án

(1) Đã xác định quy luật và định lượng quá trình tương tác phi tuyến giữa thủy triều, nước dâng do bão và sóng tại khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ, khi cường độ bão thay đổi đến cấp siêu bão (từ cấp 9 – cấp 17, theo thang Beaufort). Kết quả chỉ ra rằng các tương tác phi tuyến tính tăng theo cấp bão.

(2) Đã thiết lập mô hình tích hợp (SuWAT) với lưới lồng 6 lớp (độ phân giải lưới chi tiết nhất tới 20m) để mô phỏng ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa. Trong đó,

Luận án đã xây dựng được trường hệ số nhám biến đổi theo không gian dựa trên dữ liệu sử dụng đất (LULC) độ phân giải cao, khắc phục được hạn chế của các nghiên cứu trước đây (thường dùng hệ số nhám hằng số), giúp mô phỏng phù hợp hơn hiện tượng ngập lụt ven biển do quá trình tương tác sông - biển gây ra.

(3) Đã đánh giá và định lượng ảnh hưởng tổng hợp của các yếu tố thủy động lực sông biển (thủy triều, nước dâng do bão, sóng trong bão và dòng chảy sông) tới ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa trong trường hợp bão Doksuri (2017) và đánh giá nguy cơ ngập tại khu vực ở hiện tại và tương lai (năm 2050, 2100) có xét tới mực nước biển trung bình dâng do biến đổi khí hậu.

6. Luận điểm bảo vệ của luận án

(1) Tại khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ, nơi có biên độ thủy triều lớn, nước dâng do bão cao hơn khi bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp và thấp hơn khi bão đổ bộ vào pha thủy triều cao, trong khi đó sóng trong bão cao hơn khi bão đổ bộ vào pha thủy triều cao. Tương tác phi tuyến giữa nước dâng và sóng làm gia tăng cả độ lớn nước dâng và độ cao sóng trong bão. Sự khác biệt này tăng theo cấp bão và thể hiện rõ hơn ở những khu vực gần tâm bão.

(2) Tại khu vực ven biển Thanh Hóa, mức độ ngập lụt (phạm vi và độ sâu ngập) vùng ven biển lớn nhất khi bão đổ bộ vào pha thủy triều cao. Nước dâng gây bởi sóng trong bão và lũ trên sông làm gia tăng mức độ ngập lụt tại khu vực ven biển và ven sông trong phạm vi nghiên cứu.

(3) Trong giai đoạn khí hậu tương lai (năm 2050, 2100) theo các kịch bản biến đổi khí hậu, mực nước biển trung bình sẽ dâng cao hơn và cường độ bão tại khu vực ven biển Thanh Hoá sẽ mạnh hơn so với giai đoạn hiện tại, dẫn tới với bão cấp 11 đổ bộ vào pha triều cao có thể gây mực nước biển vượt cao trình đê hiện tại, làm gia tăng nguy cơ ngập tại khu vực. Nhiều khu vực ven biển Thanh Hoá sẽ trở thành vùng ngập thường xuyên khi có bão tác động.

7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

7.1. Ý nghĩa khoa học

Nghiên cứu tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão và hệ quả ngập lụt vùng ven biển có ý nghĩa khoa học trong đánh giá nguyên nhân, cơ chế và định lượng hoá vai trò của từng yếu tố tới độ cao nước dâng, độ cao sóng, phạm vi và độ sâu ngập vùng ven biển. Kết quả nghiên cứu của luận án đã làm sáng tỏ thêm ảnh hưởng của tương tác giữa các yếu tố động lực học biển (thủy triều, sóng và nước dâng do bão) đến độ cao của sóng và độ lớn của nước dâng do bão tại khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ với các cấp bão đổ bộ. Cơ chế ngập lụt và đóng góp của từng thành phần tới ngập lụt tại ven biển Thanh Hoá đã được lượng hoá cho một tình huống bão thực tế và đánh giá được nguy cơ ngập ven biển với các cấp bão mạnh/siêu bão đổ bộ trong bối mực nước biển dâng do biến đổi khi hậu tại khu vực.

7.2. Ý nghĩa thực tiễn

Nghiên cứu giúp hiểu rõ nguyên nhân, cơ chế và lượng hoá vai trò của từng yếu tố thủy động lực đến ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa và cho thấy rằng ngập lụt cực đoạn nhất không chỉ đến từ bão mạnh mà là sự tổ hợp của nước dâng do bão, triều cường, sóng và lũ sông.

Đánh giá nguy cơ ngập ở hiện tại và tương lai (2050, 2100) trong bối cảnh biến đổi khí hậu, mực nước biển dâng rất có ý nghĩa cho công tác quy hoạch và ứng phó với ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa.

8. Cấu trúc luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận và kiến nghị, nội dung của luận án gồm bốn chương:

Chương 1. Tổng quan nghiên cứu nước dâng do bão và ngập lụt khu vực ven biển.

Nội dung chính của chương này tập trung vào đánh giá tổng quan các phương pháp và công trình nghiên cứu về nước dâng do bão và ngập lụt ven biển do nước dâng do bão, vai trò và tương tác giữa các yếu tố thủy động lực tới nước dâng do bão

và ngập lụt khu vực ven biển.

Chương 2. Phạm vi, số liệu và phương pháp nghiên cứu.

Nội dung chính của chương này trình bày phạm vi khu vực nghiên cứu, các nguồn số liệu, các phương pháp được áp dụng trong nghiên cứu và thiết lập mô hình tích hợp SuWAT phục vụ tính toán.

Chương 3. Ảnh hưởng của tương tác giữa các yếu tố thuỷ động lực đến độ lớn nước dâng, độ cao sóng tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa.

Trong chương này trình bày ba nội dung chính: Kiểm định các mô hình nghiên cứu; Ảnh hưởng của tương tác giữa các yếu tố thuỷ động lực đến độ lớn nước dâng, độ cao sóng tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ với các trường hợp cấp bão đổ bộ khác nhau; Ảnh hưởng của thủy triều, nước dâng do bão, sóng và dòng chảy sông tới ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa.

Chương 4. Nguy cơ ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

Trong chương này trình bày hai nội dung chính: Xu thế hoạt động của bão trên vịnh Bắc Bộ và nước dâng do bão ở giai đoạn khí hậu hiện tại (1951-2010) và tương lai (2051-2110); Nguy cơ ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa ở hiện tại và tương lai khi xét đến sự gia tăng của mực nước biển dâng do biến đổi khí hậu.

CHƯƠNG 1: TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU NƯỚC DÂNG DO BÃO VÀ NGẬP LỤT KHU VỰC VEN BIỂN

Bão là loại hình thiên tai nguy hiểm, thường gây ra các hệ quả nghiêm trọng như ngập lụt ven biển, xói lở bờ và xâm nhập mặn. Những tác động này là kết quả của sự tương tác giữa nước dâng do bão, sóng lớn và hiện tượng nước biển dâng làm gia tăng nền mực nước tại các vùng ven bờ. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, sự cộng hưởng giữa mực nước biển dâng cùng với sự xuất hiện ngày càng nhiều các cơn bão mạnh/siêu bão có diễn biến bất thường đang đặt ra thách thức lớn đối với dải ven biển Việt Nam. Chính vì sự tàn khốc đó, các nghiên cứu về nước dâng và sóng trong bão, xét đến kịch bản nước biển dâng, cùng hệ quả ngập lụt ven biển đã được tiến hành từ lâu. Nhiều phương pháp, công nghệ và quy trình đã được xây dựng nhằm phục vụ hiệu quả cho công tác dự báo, ứng phó và quy hoạch. Trong chương này, tập trung phân tích, đánh giá tình hình nghiên cứu về nước dâng do bão và ngập lụt ven biển trên thế giới và tại Việt Nam, từ đó tìm ra những điểm hạn chế, xác định được khoảng trống nghiên cứu làm cơ sở khoa học để thực hiện các nội dung nghiên cứu của luận án.

1.1. Tổng quan tình hình nghiên cứu trên thế giới

Ngập lụt ven biển là một trong những thiên tai nguy hiểm gây ra mối đe dọa lớn đối với con người, cơ sở hạ tầng và môi trường. Thế giới đã chứng kiến nhiều cơn bão gây ra nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn làm ngập nghiêm trọng vùng ven biển. Các ví dụ điển hình có thể kể đến như bão Katrina năm 2005, ba cơn bão Harvey, Maria và Irma năm 2017, bão Helene năm 2024 đổ bộ vào nước Mỹ. Các cơn bão Odisha năm 1999, bão Sidr năm 2007, bão Amphan năm 2020 đổ bộ vào Ấn Độ. Theo nghiên cứu của [Hallegatte và cộng sự, 2013], thiệt hại do lũ lụt toàn cầu ở các thành phố ven biển lớn ước tính sẽ tăng khoảng 10 lần vào năm 2050 và có thể lên tới 1 nghìn tỷ USD hoặc hơn mỗi năm khi tính đến mực nước biển dâng và sụt lún đất. Ví dụ trong hình 1.1 cho thấy nhiều công trình tại bãi biển Madeira, ở Florida, nước Mỹ đã bị phá hủy dưới tác động của bão Helene (9/2024).

Hình 1.1. Hình ảnh bãi biển Madeira, Florida, Mỹ: trước, trong và sau bão Helene (9/2024) [Andrew và cộng sự, 2025]

Ngập lụt ven biển là một hiện tượng phức tạp do nhiều tác nhân gây ra nhưng chủ yếu liên quan đến hoạt động của bão. Ngập lụt xảy ra khi nước dâng do bão kết hợp với thủy triều cao, sóng lớn, có thể bao gồm cả lũ từ thượng nguồn sông và mưa lớn tại chỗ gọi là ngập lụt tổng hợp [Zscheischler và cộng sự, 2018]. Sự tương tác phi tuyến tính giữa các yếu tố này có thể làm tăng đáng kể mức độ và phạm vi ngập lụt so với các yếu tố tác động riêng lẻ. Để mô tả được hiện tượng ngập lụt tổng hợp ven biển đòi hỏi các hệ thống mô hình và dự báo phải có khả năng nắm bắt các tương tác đa chiều này, nhằm đưa ra cảnh báo chính xác và kịp thời. Trên thế giới đã có nhiều công trình nghiên cứu về ngập lụt ven biển do ảnh hưởng của bão. Có thể phân chia các nghiên cứu này thành 2 hướng nghiên cứu chính: (1) Sử dụng phương pháp phân tích thống kê và (2) Sử dụng phương pháp mô hình hóa.

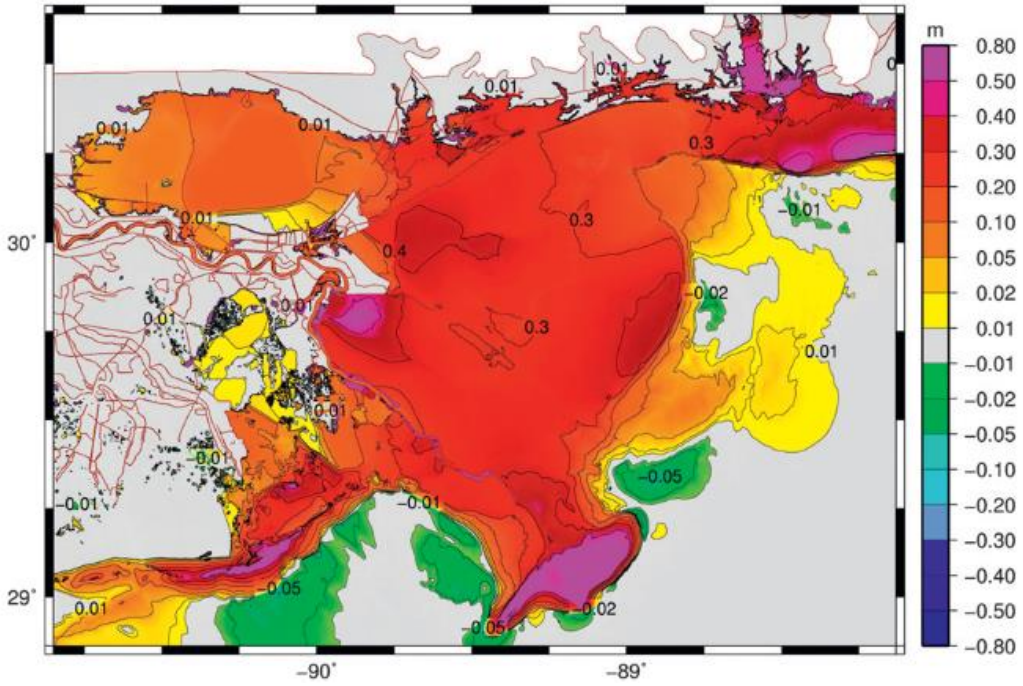
Theo hướng thứ nhất, các nghiên cứu sử dụng các mô hình thống kê để phân tích dữ liệu quan trắc nhằm mục đích xác định khả năng xảy ra ngập lụt và hiểu rõ hơn về mối liên hệ giữa các nguyên nhân gây ra ngập lụt khác nhau và khả năng xảy ra đồng thời của các nguyên nhân này. Một số phương pháp chính được sử dụng phổ biến gồm phân tích không gian và thời gian, phân tích hồi quy, phân tích giá trị cực trị, phân tích thành phần chính, học máy và phân tích phương pháp Copula. Phân tích không gian và thời gian điều tra các mối tương quan, hiệp phương sai, xu hướng, địa điểm và thời gian xảy ra các sự kiện lũ lụt tổng hợp [Camus và cộng sự, 2021], [Camus và cộng sự, 2022], [Santos và cộng sự, 2021a], [Santos và cộng sự, 2021b]. Phân tích hồi quy sử dụng các hàm thống kê để xác định mối quan hệ giữa các biến

lũ độc lập và phụ thuộc bằng các hàm tuyến tính và phi tuyến tính [Lai và cộng sự, 2021a], [Lai và cộng sự, 2021b], [Banfi và cộng sự, 2022]. Phân tích giá trị cực trị kiểm tra sự phân bố hoặc khả năng vượt ngưỡng của các biến lũ cực đoan để hiểu rõ hơn về xác suất chung, mức độ không chắc chắn và mức độ nghiêm trọng của ngập lụt [Kew và cộng sự, 2013], [Vitousek và cộng sự, 2017], [Pasquier và cộng sự, 2019]. Phân tích thành phần chính là phương pháp chọn các biến quan trọng nhất chi phối lũ lụt, phương pháp này có thể được sử dụng để giảm độ phức tạp của dữ liệu lũ lụt nhằm xác định các yếu tố chính góp phần gây ra nguy cơ ngập lụt [Camus và cộng sự, 2022]. Phân bố tích lũy đa biến Copula cũng đã được sử dụng trong phân tích ngập lụt và phân tích đa thiên tai do bão. Copula đo lường sự phụ thuộc, đánh giá các mối quan hệ phi tuyến tính và mức độ không chắc chắn giữa các biến lũ cực đoan. Bằng cách khớp các hàm Copula với dữ liệu lũ đa biến, có thể hiểu được cường độ và sự phụ thuộc giữa các biến này và dự đoán khả năng xảy ra các sự kiện lũ lụt tổng hợp [Salvadori và cộng sự, 2004], [Salvadori và cộng sự, 2007], [Latif và cộng sự, 2020], [Latif và cộng sự, 2022]. Trong những năm gần đây, phương pháp thống kê trong nghiên cứu nước dâng và ngập lụt đã có sự chuyển dịch đáng kể sang các ứng dụng học máy (Machine Learning) và học sâu (Deep Learning). Một số mô hình học máy liên quan đến các cấu trúc mạng thần kinh khác nhau đã được phát triển, đào tạo thông qua bộ dữ liệu ngập lụt lịch sử để dự đoán ngập lụt hiệu quả [Huang và cộng sự, 2022], [Sampurno và cộng sự, 2022].

Theo hướng thứ hai, các sự kiện ngập lụt ven biển thường được mô phỏng bằng các mô hình số, qua đó các tương tác vật lý của các quá trình và cơ chế gây ngập lụt được mô phỏng. Thông qua việc mô phỏng các sự kiện ngập lụt trong quá khứ, các nhà nghiên cứu có thể hiểu rõ hơn về cường độ và phạm vi ngập lụt. Trong những thập kỷ qua, cộng đồng khoa học đã có những nỗ lực đáng kể để mô phỏng các điều kiện lũ lụt bằng nhiều mô hình khác nhau. Những tiến bộ gần đây trong mô hình toán đã cho phép ghép nối hai chiều giữa các mô hình thủy động lực với các mô hình sóng trung bình pha, các mô hình kết hợp này được ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu ngập lụt ven biển. Các mô hình kết hợp được sử dụng phổ biến gồm ADCIRC +

SWAN, Delft3D + SWAN, FVCOM + SWAN, SCHISM, MIKE Coupled, ROMS + SWAN, SuWAT.

Để giải thích sự đóng góp của nước dâng do sóng đối với mực nước tổng cộng dọc theo bờ biển, lý thuyết ứng suất bức xạ được ứng dụng để phân tích cơ chế nước dâng và nước rút do sóng trong môi trường gần bờ [Longuet-Higgins và Stewart, 1962]. Ảnh hưởng quan trọng của tương tác sóng-nước dâng do bão được thể hiện rõ qua nhiều nghiên cứu. Ví dụ nghiên cứu ảnh hưởng của tương tác sóng-dòng chảy đến nước dâng do bão và ngập lụt, trong đó ứng suất gió bề mặt được tăng cường do sóng, ứng suất đáy bị thay đổi do sóng và ứng suất bức xạ do sóng đều đóng vai trò quan trọng [Liu và cộng sự, 2020]. Một mô hình kết hợp chặt chẽ SWAN với ADCIRC đã được phát triển, cho phép trao đổi thông tin hai chiều và các mô hình chạy trên cùng một lưới tính toán phi cấu trúc [Dietrich và cộng sự, 2010], [Dietrich và cộng sự, 2011]. Các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng nước dâng do sóng có thể đóng góp đáng kể vào đỉnh nước dâng do bão, từ 5-15% ở các khu vực trên thềm lục địa rộng lớn và lên tới 25-35% ở các khu vực có độ dốc lớn (hình 1.2). Một nghiên cứu khác cũng chỉ ra rằng nước dâng do sóng có thể chiếm tới 35% tổng mực nước dâng bão quanh nước Úc [Hetzel và cộng sự, 2024]. Ảnh hưởng của ứng suất bức xạ do sóng tới nước dâng do bão và ngập lụt vùng ven biển phía tây Ấn Độ được nghiên cứu bằng mô hình kết hợp ADCIRC + SWAN cho thấy mô hình kết hợp cho độ lớn nước dâng và ngập lụt cao hơn từ 20-30% so với khi không kết hợp [Murty và cộng sự, 2020]. Một nghiên cứu khác cũng chỉ ra rằng vai trò của ứng suất do sóng rất đáng kể tới độ lớn nước dâng và độ sâu ngập lụt, với mức độ tăng tới 16% khi xét đến sóng. Đặc biệt, ảnh hưởng này càng lớn đối với những cơn bão có tốc độ di chuyển chậm và hướng di chuyển song song với đường bờ [Wu và cộng sự, 2018]. Việc sử dụng tham số hóa ứng suất phụ thuộc vào sóng thay vì chỉ phụ thuộc vào gió cũng xác nhận rằng sẽ cho kết quả mô phỏng nước dâng chính xác hơn [Lucia và cộng sự, 2020].



Hình 1.2. Ảnh hưởng của sóng lên đỉnh mực nước dâng do bão Katrina 2005 [Dietrich và cs, 2011]

Mô hình tích hợp SuWAT (Surge, Wave, and Tide) với cấu trúc lưới lồng được phát triển bởi Kim và cộng sự (2008) đã chứng minh ưu thế trong việc tính toán nước dâng bão tại vịnh Tosa (Nhật Bản) so với các mô hình truyền thống không xét đến thành phần sóng. Nghiên cứu này nhấn mạnh rằng nước dâng do ứng suất bức xạ sóng phụ thuộc chặt chẽ vào độ phân giải không gian (đạt 0,25 m ở độ phân giải 1.350 m) và có xu hướng tăng theo độ chi tiết của lưới tính [Kim và cộng sự, 2008]. Đến năm 2018, hệ thống này được nâng cấp thành mô hình SuWAT-IFORM thông qua việc tích hợp thêm thành phần sóng tràn nhằm dự báo ngập lụt ven bờ [Kim và cộng sự, 2018]. Ứng dụng thực tế tại sân bay Osaka trong bão Jebi (2018) cho thấy mô hình đã tái hiện đúng các đợt sóng lớn tràn đê và diễn biến ngập lụt trong khu vực.

Những bằng chứng định lượng nhất quán này cho thấy sóng không phải là một sự điều chỉnh nhỏ mà là một yếu tố đóng góp chính, thường bị đánh giá thấp. Thành phần này thường góp phần gây ra mực nước cực đoan, đặc biệt ở các vùng ven biển nông nơi sóng vỡ xảy ra. Nếu các mô hình bỏ qua tương tác này, chúng sẽ có xu hướng đánh giá thấp rủi ro nước dâng do bão và ngập lụt ven biển, dẫn đến công tác

chuẩn bị không đầy đủ và tiềm ẩn những hậu quả nghiêm trọng. Điều này đã cho thấy sự cần thiết phải sử dụng mô hình thủy động lực kết hợp với mô hình sóng để dự báo nước dâng và ngập lụt ven biển do bão.

Bên cạnh các mô hình kết hợp 2D, một số nghiên cứu đã thử nghiệm tích hợp mô hình 3D và tựa 3D vùng ven bờ với mô hình sóng để mô phỏng ngập lụt chi tiết vùng ven biển. Việc chuyển sang mô hình 3D giúp tinh chỉnh tương tác này bằng cách nắm bắt các cấu hình ba chiều của cột nước [Liu và cộng sự, 2020], [Postacchini và cộng sự, 2019].

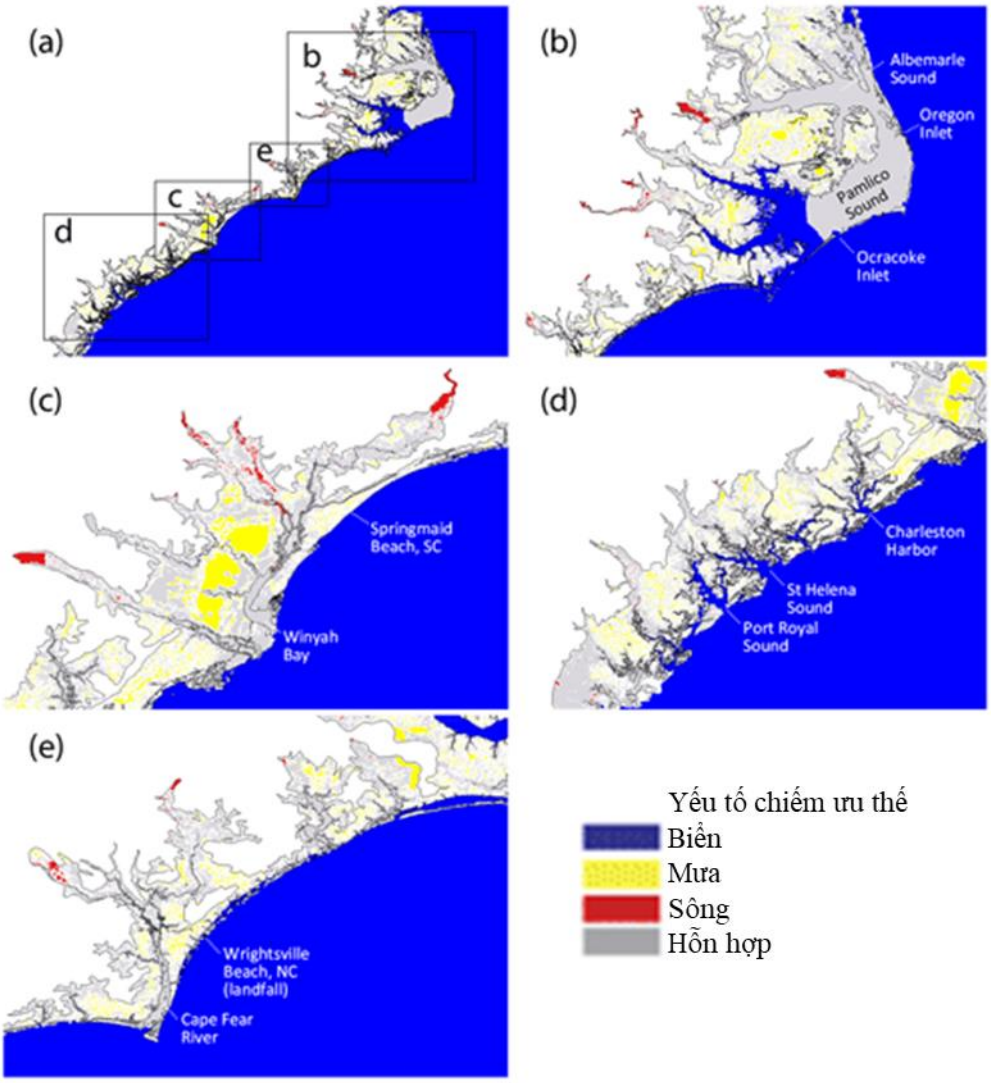
Về ảnh hưởng của thủy triều đến nước dâng do bão, nhiều nghiên cứu đã khẳng định tương tác thủy triều - nước dâng do bão có thể làm biến đổi mực nước ven bờ từ vài chục centimet đến 1 m. [Idier và cộng sự, 2012] đã thực hiện các tính toán nước dâng do bão có và không có thủy triều sử dụng mô hình nước nông. Kết quả cho thấy, tương tác giữa thủy triều và nước dâng do bão là không đáng kể ở nửa phía đông của Eo biển Manche, nhưng đạt 74 cm (khoảng 50% nước dâng do bão cực đại của cùng sự kiện) tại Eo biển Dover. [Krien và cộng sự, 2017] đã thực hiện các thí nghiệm số trong cơn bão Sidr (2007), tập trung vào phần đầu của vịnh. Nghiên cứu đã điều tra sự tương tác giữa thủy triều và tổng nước dâng do bão (bao gồm cả nước dâng do sóng) và chỉ ra rằng các tương tác thủy triều-nước dâng trong khoảng ±0,6 m phát triển ở các vùng nông của vùng châu thổ rộng lớn. Eo biển Đài Loan là một nơi các dòng triều mạnh và dòng chảy do bão gây ra dọc theo hướng kênh làm tăng cường tương tác thủy triều-nước dâng thông qua ma sát đáy phi tuyến [Zhang và cộng sự, 2010]. Eo biển này thường xuyên chịu các đợt nước dâng do bão lớn xảy ra trong mùa bão. Nước dâng dao động từ 0,6 m đến hơn 1 m tại các trạm đo triều được quan sát thấy trong cơn bão Dan (1999). [Xu và cộng sự, 2016] đã chọn một cơn bão, giả định rằng cơn bão này đổ bộ vào 12 thời điểm khác nhau (các điều kiện khác không đổi) và phân tích kết quả tại bốn trạm thủy triều. Độ cao nước dâng do bão được mô hình hóa thể hiện sự biến đổi rộng rãi qua mười hai trường hợp, đạt sự khác biệt lên tới 58 cm (tại trạm thủy triều Dinh Khẩu). Các tương tác thủy triều-nước dâng cũng đã được nghiên cứu trên thềm lục địa Patagonia [Etala, 2009]. Kết quả đã tìm thấy sự

khác biệt hàng chục cm tại đầu vịnh và cửa sông Rio De La Plata (Brazil).

Ảnh hưởng của lũ trên sông đến ngập lụt ven biển cũng đã được nghiên cứu bằng cách kết nối các mô hình biển-sông [Massey và cộng sự, 2007]. Tuy nhiên, sự phức tạp của ngập lụt tổng hợp không chỉ dừng lại ở việc kết nối hai thành phần. Ngập lụt tổng hợp xảy ra khi sự kết hợp hoặc liên tiếp của hai hoặc nhiều yếu tố gây lũ dẫn đến tác động lớn hơn, đặc biệt ở các khu vực cửa sông ven biển. Các yếu tố chính bao gồm dòng chảy sông, dòng chảy bề mặt do mưa, và các quá trình ven biển như nước dâng do bão, thủy triều thiên văn, và hoạt động của sóng. Nghiên cứu về nước dâng do bão và ngập lụt tổng hợp ở Vịnh Delaware trong cơn bão Florence (2018) đã chỉ ra rằng các yếu tố tác động chính gồm tác động của đại dương và khí quyển, tác động của sông và tác động của lượng mưa có vai trò, ưu thế khác nhau tùy thuộc vào khu vực (hình 1.3) [Ye và cộng sự, 2021]. Nghiên cứu về nước dâng và ngập lụt tổng hợp ở vịnh Galveston trong bão Harvey (2017) đã khẳng định rằng độ chính xác của dự báo phụ thuộc rất nhiều vào dòng chảy của sông, mô hình số độ cao (DEM) và tác động từ khí quyển. Nghiên cứu này cũng nhấn mạnh rằng các hiệu ứng tổng hợp có tính phi tuyến tính cao [Huang và cộng sự, 2021]. Nghiên cứu ngập lụt ở Vịnh Delaware trong cơn bão Irene (2011) bằng cách hợp nhất các mô hình thủy văn và thủy động lực học trong một mô hình duy nhất, với một lưới tính duy nhất. Kết quả nghiên cứu đã chứng minh sự cần thiết phải kết hợp chặt chẽ các quá trình sông-biển và hiệu ứng lượng mưa để mô phỏng chính xác mực nước và ngập lụt vùng cửa sông ven biển. Ảnh hưởng của nước dâng được chứng minh là có khả năng lan truyền sâu vào các sông ở thượng nguồn, với hiệu ứng nước ngược đôi khi đạt đến ranh giới trên của lưới tính [Zhang và cộng sự, 2020].

Như vậy, việc mô phỏng tác động của từng nguồn (đại dương, sông và lượng mưa) một cách riêng biệt và sau đó cộng chúng lại có thể dẫn đến sai số lớn. Cách khắc phục tốt nhất cho sai số này là thực hiện các nghiên cứu về nước dâng và ngập lụt bằng cách sử dụng một mô hình duy nhất tích hợp tất cả các yếu tố tác động. Điều này cho thấy sự cần thiết của một mô hình hệ thống tích hợp toàn diện. Phương pháp cộng gộp các thành phần riêng lẻ là không phù hợp cho các hệ thống phi tuyến tính.

Một mô hình thống nhất là cần thiết để đại diện chính xác cho các phản hồi và tương tác phức tạp xảy ra giữa các quá trình sông-biển.

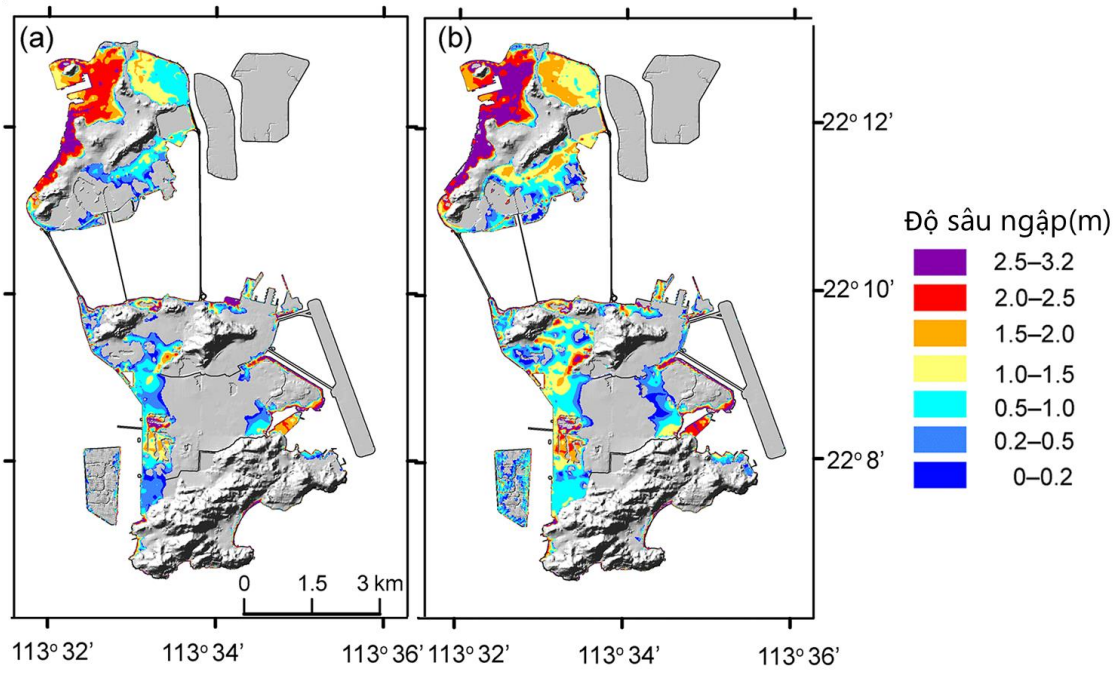


Hình 1.3. Bản đồ thể hiện sự chi phối về mặt không gian của các yếu tố gây ngập lụt khác nhau trong cơn bão Florence. Các hình (b–e) là hình phóng to từ hình (a) ở các khu vực khác nhau [Ye và cộng sự, 2021]

Biến đổi khí hậu với xu thế mực nước biển trung bình dâng cao, thiên tai bão, lũ diễn biến phức tạp đang làm tăng nguy cơ ngập ở các khu vực ven biển. Nhiều quốc gia trên thế giới đang phải đối mặt với tình trạng này. Để đánh giá nguy cơ lũ lụt ven biển hiện tại và trong tương lai, các nhà khoa học Indonesia đã thiết lập hệ thống GIS kết hợp với sản phẩm mô hình để tạo bản đồ ngập lụt cho các sự kiện lũ

lụt ven biển [Imam Buchori và cộng sự, 2018]. Trong đó, sản phẩm mô hình là kết quả từ hệ thống tích hợp mô hình dự báo cho vùng ven biển như mô hình Delft3D dự báo triều cường và nước dâng do gió, mô hình WAVEWATCH III dự báo sóng. Bangladesh cũng là một trong các nước dễ bị tổn thương và thường hay trải qua các thiên tai như xoáy thuận nhiệt đới, lốc xoáy, lũ lụt ven biển, triều cường, nước dâng do bão. Tại đây, [Dasgupta và cộng sự, 2010] đã sử dụng công nghệ tích hợp thông tin về biến đổi khí hậu, mô hình thủy động lực học và lớp phủ địa lý, để đánh giá mức độ dễ bị tổn thương do các đợt bão lớn và mực nước biển dâng vào năm 2050. Ở khu vực Caribê, hiện tượng nước dâng do bão và ngập lụt ven biển xảy ra khá thường xuyên do ảnh hưởng của các xoáy thuận nhiệt đới (bão) đi kèm sự xuất hiện của mưa lớn, lũ lụt từ sông đổ ra. Để đưa ra các dự báo và cảnh báo, mô hình SLOSH đã được sử dụng để tính toán tất cả các kịch bản có thể có với đường đi, tốc độ và cường độ của cơn bão khác nhau có thể đổ bộ vào khu vực này trên một siêu máy tính [Val và cộng sự, 2019]. Thêm vào đó, họ sử dụng các sản phẩm vệ tinh tốt nhất với việc áp dụng mô hình German Satellite (TanDEM-X) cung cấp trên lưới tính với độ phân giải 12 m để cho ra kết quả dự báo chi tiết nhất. Ở khu vực phía nam bán cầu, Fiji cũng là nước đang phải đối mặt với tình trạng ngập lụt ven biển. Đặc điểm của ngập lụt ở đây chủ yếu do ảnh hưởng của xoáy thuận nhiệt đới gây ra nước biển dâng cao kết hợp với sóng lớn lan truyền từ các vùng biển của Úc và New Zealand đến [Ron và cộng sự, 2013]. Để đưa ra kết quả dự báo ngập lụt, thay vì chạy một mô hình phức tạp, có độ phân giải cao trong thời gian thực, hệ thống dự báo truy cập vào kết quả của hàng trăm kịch bản có thể xảy ra của các cơn xoáy thuận nhiệt đới và sóng biển (độ cao, chu kỳ và hướng). Điều này cho phép chạy ra kết quả nhanh chóng và có thể chạy trên máy tính thông thường. Cảnh báo được phát đi trước 48 giờ và dự báo cho ra trước 24 giờ. Mỹ cũng là một đất nước có nguy cơ ngập lụt vùng ven biển xảy ra nhiều trong những năm tới do ảnh hưởng của biến đổi khí hậu. Để cảnh báo cho ngập lụt ven biển, các nhà khoa học đã sử dụng nhiều cách thức, trong đó mô hình số trị luôn được ưu tiên bằng việc kết hợp tính toán đến ảnh hưởng của tất cả các yếu tố gây ra nước dâng do bão, ảnh hưởng của nước biển dâng toàn cầu [Yang và cộng sự,

2020]. Nghiên cứu của [Li và cộng sự, 2018] đối với bão Hato (2017) đã chỉ ra rằng, nếu mực nước biển trung bình tăng lên 0,5 m vào năm 2060 và 1,0 m vào năm 2100 thì hậu quả của một cơn bão tương tự Hato sẽ thảm khốc hơn rất nhiều do sự gia tăng đáng kể của cả diện tích và độ sâu ngập (hình 1.4).



Hình 1.4. Đô sâu ngập lụt lớn nhất khi ttriều cao kết hợp với nước biển dâng 0,5 m vào năm 2060 (a) và 1,0 m vào năm 2100 (b) [Li và cộng sự, 2018]

1.2. Tổng quan tình hình nghiên cứu ở Việt Nam

Tại Việt Nam, lịch sử đã ghi nhận nhiều cơn bão gây ra nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn, dẫn đến tràn, vỡ đê và ngập lụt trên diện rộng các khu vực ven biển. Giai đoạn từ năm 2005 đến nay đặc biệt chứng kiến một loạt cơn bão đổ bộ vào thời điểm triều cường với nước dâng do bão cao từ 1-2 m, gây vỡ đê và ngập úng nghiêm trọng. Các ví dụ điển hình bao gồm bão Washi (2005) tại Hải Phòng, bão Damrey (2005) tại Nam Định, bão Xangsane (2006) và Ketsana (2009) tại Huế và Đà Nẵng, bão Kalmaegi (2014) tại Quảng Ninh, bão Doksuri (2017) tại Nghệ An - Hà Tĩnh, và bão Vamco (2020) tại Quảng Bình - Quảng Trị. Bão Doksuri (9/2017) đổ bộ vào ven biển Hà Tĩnh - Quảng Bình đúng thời điểm ven bờ tây vịnh Bắc Bộ đang ở thời kỳ triều cao đã gây nước dâng tràn nhiều tuyến đê biển từ Hải Phòng tới Hà Tĩnh,

làm ngập úng nhiều khu vực ven biển. Ngay cả những cơn bão có cường độ không mạnh nhưng đổ bộ vào kỳ triều cường cũng gây ngập úng ven biển, như bão Sinlaku (7/2020) đổ bộ vào Nghệ An với cường độ cấp 8.

Theo hướng nghiên cứu thống kê, nước dâng do bão ở Việt Nam đã được thực hiện từ khá sớm. Đầu tiên, nước dâng do bão được tính toán theo phương pháp thống kê và biểu đồ [Vũ Như Hoán, 1988]. Các đợt nước dâng, nước rút và xu thế dâng, rút của mực nước tại các trạm hải văn và thủy văn ven biển đã được thống kê và mô tả chi tiết [Hoàng Trung Thành, 2011], [Phạm Trí Thức và cộng sự, 2020].

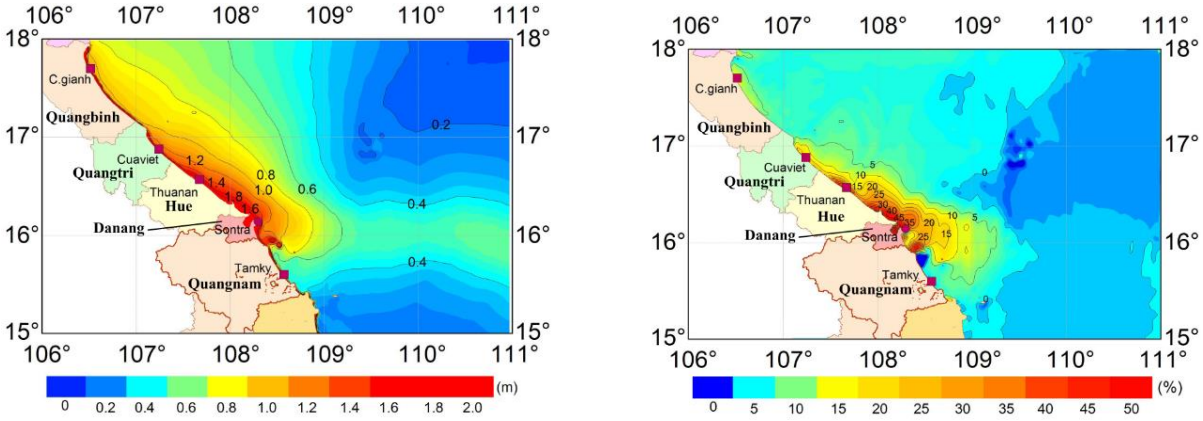
Tuy nhiên, phương pháp thống kê và biểu đồ, mặc dù đơn giản và dễ sử dụng, nhưng lại đòi hỏi số liệu dài, tần suất quan trắc lớn và chỉ phù hợp cho những khu vực có số liệu quan trắc dài hạn, do đó có nhiều hạn chế khi áp dụng tại Việt Nam do sự thiếu hụt dữ liệu này.

Theo hướng nghiên cứu sử dụng mô hình số trị, mô hình Delft3D đã được nghiên cứu và thiết lập để mô phỏng, dự báo nước dâng do bão cho khu vực Biển Đông và ven biển Việt Nam, phục vụ xây dựng hệ thống dự báo tác nghiệp khí tượng thủy văn biển [Lê Trọng Đào và cộng sự, 2009]. Năm 2010, đề tài KC.08.05/06-10 [Trần Tân Tiến và cộng sự, 2010] đã xây dựng công nghệ dự báo liên hoàn bão, nước dâng và sóng ở Việt Nam bằng mô hình số với thời gian dự báo trước 3 ngày và triển khai mô hình ROMS. Mặc dù mô hình được thiết lập với lưới tính vuông và độ phân giải còn thô, các kết quả tính toán đã đáp ứng được yêu cầu của đề tài. Trong đề tài KC.09-16/06-10 [Nguyễn Minh Huấn và cộng sự, 2011] đã sử dụng mô hình ROMS kết nối liên hoàn với mô hình khí tượng RAMS và WRF với lưới tính cong, trực giao. Tuy nhiên, việc kết nối liên hoàn với mô hình khí tượng vẫn chỉ là kết nối một chiều. Một nghiên cứu khác của [Vũ Thanh Ca và cộng sự, 2008] đã sử dụng và phát triển mô hình POM của Hoa Kỳ để ứng dụng tính toán nước dâng do bão có tính tới ảnh hưởng của thủy triều. Ảnh hưởng của nước dâng do sóng đến mực nước tổng cộng ven biển đã được tính toán bằng công thức thực nghiệm dựa theo mối liên hệ với độ cao và chu kỳ sóng có nghĩa ngoài khơi của Longuet-Higgins và Stewart [Nguyễn Xuân Hiển, 2013]. Kết quả nghiên cứu cho thấy nước dâng do ứng suất bức xạ sóng

tính theo công thức bán kinh nghiệm là đáng kể tại ven biển Hải Phòng.

Các nghiên cứu về nước dâng do bão có xét tới ảnh hưởng của thủy triều đã được thực hiện bởi một số tác giả, các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào việc đánh giá nước dâng do bão đổ bộ vào các pha thủy triều khác nhau bằng cách sử dụng mô hình nước dâng và thủy triều kết hợp [Vũ Thanh Ca và cộng sự, 2008], [Nguyễn Xuân Hiển, 2013], [Đinh Văn Mạnh và cộng sự, 2014], [Đỗ Đình Chiến, 2015], [Nguyễn Bá Thủy và cộng sự, 2016], [Thuy và cộng sự, 2017]. Kết quả nghiên cứu của [Nguyễn Bá Thủy và cộng sự, 2016] đã chỉ ra rằng, sự khác nhau của đỉnh nước dâng giữa kết quả mô hình kết hợp và không kết hợp với thủy triều là trong vòng 2% tại trạm Sơn Trà trong cơn bão Xangsane (2006), nơi biên độ thủy triều thấp. Tuy nhiên, ở bờ biển phía bắc Việt Nam, nơi biên độ thủy triều cao (3-4 m), tương tác giữa thủy triều và nước dâng là không đáng kể đối với bão Frankie (1996) đổ bộ vào pha thủy triều thấp, nhưng lại đáng kể trong bão Washi (2005) đổ bộ vào pha thủy triều cao, với sự khác nhau 13% giữa đỉnh nước dâng của mô hình kết hợp và không kết hợp. Điều này cho thấy sự phức tạp của tương tác thủy triều-nước dâng và cần được xem xét cẩn trọng tùy theo đặc điểm thủy triều của từng khu vực.

Ảnh hưởng của sóng biển tới nước dâng do bão cũng đã được nghiên cứu, trong đó hai yếu tố về lực cản phụ thuộc vào sóng và ứng suất bức xạ do sóng gây ra được tập trung xem xét trong mô phỏng nước dâng. Một số nghiên cứu nước dâng do bão có xét tới ảnh hưởng sóng bằng mô hình số trị tích hợp thủy triều, sóng và nước dâng do bão (SuWAT) đã được thực hiện [Nguyễn Bá Thủy và cộng sự, 2016], [Thuy và cộng sự, 2017], [Thuy và cộng sự, 2020], [Đỗ Đình Chiến, 2015], [Vũ Hải Đăng và cộng sự, 2016]. Mặc dù sử dụng lưới không gian có độ phân giải còn thô, các nghiên cứu trên đều chỉ ra rằng sóng biển đóng góp một phần đáng kể tới độ lớn nước dâng và ngập lụt ven bờ do bão. Trong nghiên cứu nước dâng do bão Frankie (1996) và Washi (2005) [Thuy và cộng sự, 2017], nước dâng do ứng suất bức xạ sóng gây ra là một phần đáng kể của nước dâng do bão tại trạm Hòn Dấu. Tác động của lực cản phụ thuộc vào sóng và ứng suất bức xạ đóng góp lần lượt 14% và 7% vào tổng nước dâng do bão tại trạm Sơn Trà trong cơn bão Xangsane (2006) (hình 1.5).



(a) (b)

Hình 1.5. (a) Phân bố nước dâng lớn nhất với phương án có tính tới ứng suất bức xạ sóng và (b) Phần trăm đóng góp của nước dâng do ứng suất bức xạ sóng trong bão Xangsane tháng 9 năm 2006 [Thuy và cộng sự, 2017]

SuWAT là mô hình tích hợp (coupled model) mã nguồn mở, cho phép giải đồng thời hệ phương trình thủy động lực và phương trình cân bằng năng lượng sóng. Nhờ đó, mô hình có khả năng mô phỏng đầy đủ các cơ chế tương tác phi tuyến phức tạp, đặc biệt là ứng suất bức xạ sóng và tương tác sóng - dòng chảy. SuWAT cho phép lưới lồng đa cấp, giúp tăng độ phân giải lưới tại khu vực trọng điểm nghiên cứu (xuống tới 20 m – 50 m) để có thể thể hiện được các đặc trưng địa hình cục bộ ở các khu vực trong sông, cửa sông và ven biển. SuWAT tích hợp thuật toán biên di động xử lý biên ướt/khô và mô phỏng ngập lụt, cho phép mô phỏng quá trình nước biển tràn vào đất liền và rút đi theo diễn biến thời gian thực của bão. Cũng như các mô hình mã nguồn mở khác, SuWAT cho phép can thiệp sâu vào việc thiết lập tham số vật lý và kiểm soát quy trình tính toán tương tác một cách minh bạch, đáp ứng mục đích nghiên cứu chuyên sâu. Độ tin cậy của mô hình SuWAT đã được kiểm chứng trong nhiều nghiên cứu về nước dâng và ngập lụt ven biển do bão tại Nhật Bản, Hàn Quốc và Việt Nam [Kim và cộng sự, 2008], [Kim và cộng sự, 2018], [Đỗ Đình Chiến, 2015], [Vũ Hải Đăng và cộng sự, 2016], [Nguyễn Bá Thủy và cộng sự, 2014], [Nguyễn Bá Thủy và cộng sự, 2016], [Thuy và cộng sự, 2017], [Thuy và cộng sự, 2020]. Luận án lựa chọn mô hình tích hợp SuWAT thay vì một số mô hình phổ biến (ví dụ: MIKE, Delft 3D, ADCIRC+SWAN) đang được áp dụng trong mô phỏng thuỷ

triều, nước dâng do bão, sóng trong bão và ngập lụt ven biển do những ưu điểm của mô hình SuWAT đã phân tích ở trên đồng thời cũng mang tính kế thừa từ những nghiên cứu trước của chính tác giả và đồng nghiệp.

Mặc dù có vai trò quan trọng, nhưng các nghiên cứu về ngập lụt ven biển do nước dâng bão tại Việt Nam hiện nay vẫn còn khá hạn chế. Một trong những nghiên cứu đầu tiên bằng mô hình số trị về ngập lụt ven biển là đề tài hợp tác giữa Viện Hàn Lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam với UBND tỉnh Thừa Thiên Huế năm 2012, đã tập trung vào xây dựng mô hình dự báo nước dâng do bão và ngập lụt vùng ven biển Thừa Thiên Huế, mô phỏng các kịch bản ngập lụt nước dâng do bão ứng với các tần suất khác nhau và nước biển dâng do biến đổi khí hậu [Nguyễn Thị Việt Liên và cộng sự, 2012]. Năm 2016, Tổng cục Phòng, chống thiên tai đã xây dựng bản đồ nguy cơ ngập ven biển cho tình huống bão mạnh/siêu bão đổ bộ vào ven biển Việt Nam cho 28 tỉnh thành ven biển. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chỉ tập trung xây dựng bản đồ ngập ven biển cho một số kịch bản xác định của vị trí bão đổ bộ với cấp bão mạnh tới siêu bão tại một số pha thủy triều, ngoài ra ngập lụt do nước dâng gây bởi ứng suất sóng, vốn chiếm một phần đáng kể trong mực nước dâng tổng cộng trong bão chưa được xét tới. Bên cạnh đó, việc sử dụng hệ số nhám hằng số là hằng số chung cho toàn khu vực dẫn đến kết quả ngập lụt thiên cao so với thực tế. Biến đổi khí hậu và mực nước biển dâng sẽ làm tăng nguy cơ ngập lụt tại vùng đất ven biển, nhất là với những khu vực có địa hình trũng, thấp. Theo chu kỳ 5 năm, Bộ Tài Nguyên và Môi trường (nay là Bộ Nông nghiệp và Môi trường) công bố kịch bản biến đổi khí hậu cho Việt Nam, trong đó có bản đồ ngập lụt do nước biển dâng. Tuy nhiên, kịch bản ngập lụt chỉ xét tới nguyên nhân mực nước biển trung bình dâng [Bộ TN&MT, 2020]. Nghiên cứu của [Wang và cộng sự, 2023] cho thấy sự gia tăng đáng kể về mức độ và phạm vi ngập lụt tại Tp. Hồ Chí Minh, trong đó mực nước biển do biến đổi khí hậu là yếu tố chính gây ra sự gia tăng các trận ngập lụt tổng hợp.

Nhìn chung, mặc dù các nghiên cứu trong và ngoài nước đã đạt được những tiến bộ đáng kể trong việc ứng dụng các mô hình tích hợp (như SuWAT, ROMS+SWAN, ADCIRC+SWAN) để tính toán nước dâng do bão và ngập lụt ven

biển, tuy nhiên, vẫn tồn tại những hạn chế nhất định cần giải quyết:

- Thứ nhất, đa số các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào việc mô phỏng lại các trận bão lịch sử. Các nghiên cứu này chỉ ra rằng tương tác giữa thủy triều và nước dâng do bão là quan trọng, nhưng chưa có các nghiên cứu nhằm định lượng sự thay đổi của nước dâng do bão và sóng ứng với nhiều cấp bão khác nhau (từ bão thường đến siêu bão). Bởi vì theo báo cáo của [IPCC, 2023], cường độ của các cơn bão nhiệt đới được dự báo sẽ gia tăng, khả năng xuất hiện bão mạnh và siêu bão ngày càng cao.

- Thứ hai, khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ, đặc trưng bởi chế độ nhật triều với biên độ triều lớn (2,5 – 4,0 m). Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng tại các vùng biển nông có biên độ triều lớn, sự tương tác phi tuyến giữa nước dâng do bão và thủy triều có thể làm thay đổi đáng kể đỉnh nước dâng tổng cộng và độ cao sóng. Tuy nhiên, câu hỏi về việc độ cao sóng và độ cao nước dâng do bão sẽ thay đổi cụ thể như thế nào nếu cùng một cơn bão đổ bộ vào các pha triều khác nhau (triều cao, triều trung bình và triều thấp) tại khu vực này vẫn chưa được giải đáp đầy đủ. Đồng thời, những thay đổi này sẽ diễn ra như thế nào theo các cấp bão.

- Thứ ba, về tương tác sông - biển chưa được làm rõ. Ngập lụt ven biển là một quá trình tổng hợp do sự kết hợp của nước dâng do bão, sóng lớn, thủy triều và dòng chảy từ sông đổ ra. Tuy nhiên, các nghiên cứu ngập lụt tại Việt Nam thường tách biệt các tác động thủy văn (lũ sông) và hải văn (nước dâng do bão, sóng). Tại Thanh Hóa, nơi có hệ thống sông Mã đổ ra biển, sự tương tác giữa lũ từ thượng nguồn và nước dâng từ biển vào là yếu tố chính gây ngập lụt diện rộng. Các nghiên cứu hiện có chưa đánh giá chi tiết sự tương tác sông - biển này ảnh hưởng thế nào đến mực nước tổng cộng, phạm vi và độ sâu ngập lụt khi bão đổ bộ.

- Thứ tư, về đánh giá nguy cơ ngập trong tương lai. Các bản đồ nguy cơ ngập lụt hiện có (ví dụ dự án năm 2016 của Tổng cục Phòng, chống thiên tai) được xây dựng dựa trên các kịch bản chưa xét đến nước biển dâng và thành phần nước dâng do sóng. Trong bối cảnh nước biển dâng do biến đổi khí hậu, nền mực nước trung bình sẽ thay đổi, làm gia tăng nguy cơ ngập lụt ngay cả với những cơn bão có cường độ

trung bình. Việc thiếu các đánh giá chi tiết về nguy cơ ngập lụt dưới tác động kép của bão mạnh và nước biển dâng là một khoảng trống cần được bổ sung.

Từ những phân tích, luận giải ở trên, có thể rút ra bốn vấn đề nghiên cứu mà Luận án cần tập trung giải quyết:

(1) Các nghiên cứu trước đây chủ yếu thảo luận về tác động của sóng và thủy triều lên nước dâng do bão cho các cơn bão lịch sử tại một khu vực cụ thể. Do vậy, tương tác giữa thủy triều, nước dâng và sóng vẫn cần được hiểu đầy đủ hơn cho nhiều cấp bão tại một khu vực, đặc biệt là trong bối cảnh biến đổi khí hậu được dự báo khả năng xuất hiện nhiều hơn bão mạnh/siêu bão trong tương lai [IPCC, 2023].

(2) Độ cao sóng và độ lớn nước dâng do bão thay đổi như thế nào ứng với các cấp bão đổ bộ vào các pha thuỷ triều khác nhau, nhất là tại khu vực có biên độ thuỷ triều lớn như ven bờ tây vịnh Bắc Bộ.

(3) Tương tác sông-biển có ảnh hưởng như thế nào tới ngập lụt vùng ven biển khi bão ảnh hưởng.

(4) Trong tương lai, dưới tác động của biến đổi khí hậu và nước biển dâng, nguy cơ ngập lụt ở từng khu vực ven biển cụ thể sẽ như thế nào?

Để giải quyết các vấn đề nêu trên, luận án ứng dụng mô hình số trị tích hợp thuỷ triều, sóng và nước dâng do bão (mô hình SuWAT), tập trung vào phân tích, đánh giá các nội dung sau:

(1) Đánh giá tương tác giữa thủy triều, nước dâng do bão và sóng biển và ảnh hưởng của những tương tác này tới độ cao nước dâng và độ cao sóng với các cấp bão ảnh hưởng khác nhau tại khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ.

(2) Đánh giá vai trò và mức độ đóng góp của thủy triều, sóng biển, nước dâng do bão và dòng chảy sông tới ngập lụt tại khu vực ven biển Thanh Hoá.

(3) Đánh giá nguy cơ ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng.

1.3. Tiểu kết Chương 1

Tổng quan các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước cho thấy ngập lụt

ven biển là hệ quả của sự tương tác phi tuyến phức tạp giữa các quá trình động lực biển (thủy triều, sóng, nước dâng) và các yếu tố khí tượng thủy văn. Sự tương tác này có thể làm thay đổi đáng kể nước dâng do bão, sóng và ngập lụt ven biển, tùy thuộc vào pha của thủy triều, cường độ của bão, mực nước trên sông và đặc điểm địa hình, công trình bảo vệ bờ biển. Việc bỏ qua hoặc đơn giản hóa các mối tương tác này trong tính toán sẽ dẫn đến đánh giá thấp hiện tượng ngập lụt ven biển.

Mô hình mã nguồn mở SuWAT được chứng minh là có khả năng mô phỏng tốt nước dâng và ngập lụt ven biển do bão trong các nghiên cứu trong và ngoài nước và được lựa chọn có tính kế thừa từ nghiên cứu trước.

Từ những phân tích tổng quan các nghiên cứu trên thế giới và ở Việt Nam, có thể rút ra các khoảng trống nghiên cứu chính mà Luận án cần tập trung giải quyết:

(1) Các nghiên cứu trước đây chủ yếu thảo luận về tác động của sóng và thủy triều lên nước dâng do bão cho các bão lịch sử tại một khu vực cụ thể. Do vậy, tương tác giữa thủy triều, nước dâng và sóng vẫn cần được hiểu đầy đủ hơn cho nhiều cấp bão tại một khu vực, đặc biệt là trong bối cảnh biến đổi khí hậu được dự báo khả năng xuất hiện nhiều hơn bão mạnh/siêu bão trong tương lai [IPCC, 2023].

(2) Độ cao sóng và nước dâng do bão thay đổi như thế nào ứng với các cấp bão đổ bộ vào các pha thuỷ triều khác nhau, nhất là tại khu vực có biên độ thuỷ triều lớn như ven bờ tây vịnh Bắc Bộ.

(3) Tương tác sông-biển có ảnh hưởng như thế nào tới ngập lụt vùng ven biển khi bão ảnh hưởng.

(4) Trong tương lai, dưới tác động của biến đổi khí hậu và nước biển dâng, nguy cơ ngập lụt ven biển với từng khu vực cụ thể sẽ như thế nào?

Đây là những căn cứ khoa học và thực tiễn để Luận án hướng tới giải quyết nhằm đạt được mục tiêu đề ra.

CHƯƠNG 2: PHẠM VI, SỐ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

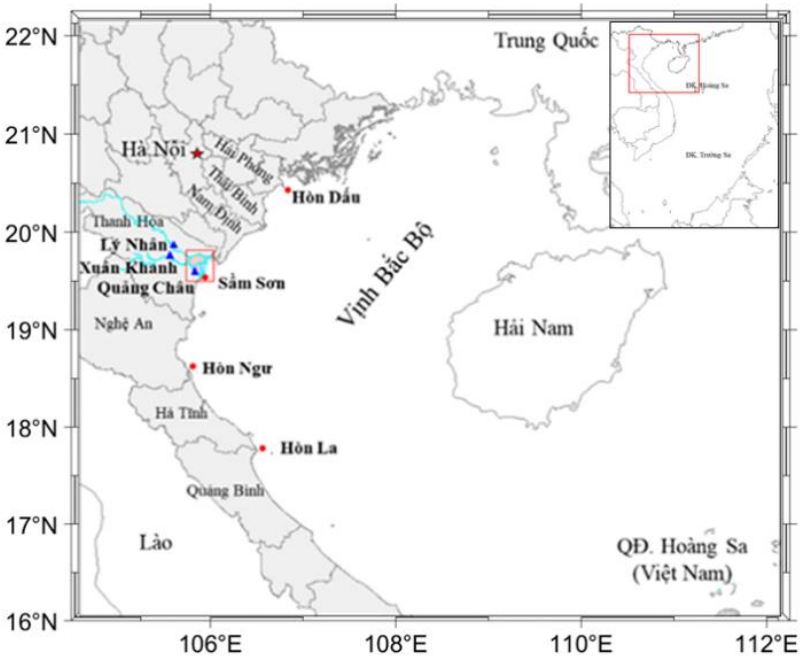
2.1. Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi nghiên cứu của luận án là khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và chi tiết cho ven biển tỉnh Thanh Hóa. Trong đó, ảnh hưởng của tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão tới độ cao nước dâng và độ cao sóng sẽ được tập trung đánh giá tại khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ (hình 2.1a). Nguy cơ ngập ven biển được đánh giá cho dải ven biển từ huyện Hậu Lộc tới thị xã Sầm Sơn (theo địa danh và ranh giới cũ) (gọi chung là từ Hậu Lộc tới Sâm Sơn), tỉnh Thanh Hóa (hình 2.1b).

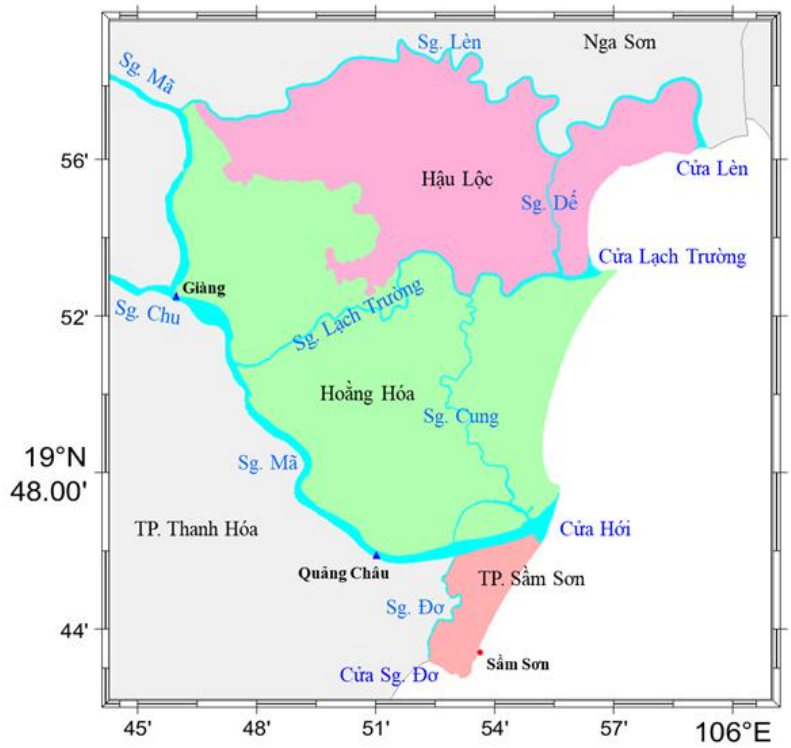
Thanh Hóa thuộc khu vực Bắc Trung Bộ của Việt Nam, với đường bờ biển dài khoảng 102 km. Đây là khu vực chịu ảnh hưởng của bão nhiều nhất ở Việt Nam, trung bình từ 2,0 - 2,5 cơn/năm, ba tháng nhiều bão nhất là từ tháng 7 đến tháng 9. Trong đó, ven biển từ Hậu Lộc tới Sầm Sơn đã từng bị ngập trên diện rộng do nước dâng do bão kết hợp với triều cường trong một số cơn bão ảnh hưởng tới khu vực như Wukong (9/2000), Damrey (9/2005), Doksuri (9/2017), Kajiki (8/2025) và Bualoi (9/2025). Thủy triều khu vực Thanh Hóa có chế độ nhật triều không đều, với biên độ thủy triều trung bình 2,5 - 3,5 m. Trong các đợt bão mạnh, nước dâng do bão có thể vượt 2 - 3 m, kết hợp với triều cường gây ra hiện tượng mực nước tổng cộng cao, đe dọa ngập lụt sâu tại các vùng cửa sông.

Khu vực từ Hậu Lộc tới Sầm Sơn, Thanh Hóa có hệ thống sông Mã, một trong hai hệ thống sông lớn nhất khu vực Bắc Trung Bộ của Việt Nam. Hệ thống sông này gồm dòng chính là sông Mã và 2 phụ lưu lớn là sông Chu và sông Bưởi ở thượng lưu, sông Lèn và sông Lạch Trường (sông Tào) ở hạ lưu. Cửa sông chính của Sông Mã đổ ra vịnh Bắc Bộ ở cửa Lạch Hới nằm giữa Hoằng Hóa và Sầm Sơn, hai cửa phụ là Lạch Trường nằm giữa Hoằng Hóa và Hậu Lộc và cửa Lèn nằm giữa Hậu Lộc và Nga Sơn. Trong vùng còn có ba sông nhỏ chảy theo hướng Bắc-Nam là sông Cung nối giữa sông Mã với sông Lạch Trường, sông Dế nối sông Lạch Trường với sông Lèn và sông Đơ nối sông Mã thông với biển ở cửa sông Đơ. Ở hai đầu sông Đơ được khống chế bằng các cống, để ngăn mặn và thoát lũ. Hình 2.1 thể hiện sơ đồ khu vực

nghiên cứu, bao gồm các trạm Quảng Châu, Hòn Dấu, Sầm Sơn, Hòn Ngư và Hòn La là các vị trí được xác định để kiểm nghiệm mô hình và phân tích kết quả.



(a)



(b)

Hình 2.1. Phạm vi nghiên cứu của luận án: (a) Ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và vị trí các trạm/điểm phân tích dữ liệu, (b) Phạm vi từ Hậu Lộc - Sầm Sơn, tỉnh Thanh Hóa.

Theo các bản đồ nền tỷ lệ 1/10.000 và 1/50.000 của Bộ Nông nghiệp và Môi trường, cho thấy một số đặc điểm của địa hình trong khu vực. Trên đất liền, địa hình thấp và tương đối bằng phẳng, khoảng 90% địa hình có cao độ nhỏ hơn 5m. Cụ thể, khu vực có cao độ dưới 0,5 m chiếm 7,8%, từ 0,5 m đến 1,0 m chiếm 11,6%, từ 1,0 m đến 2,0 m chiếm 34,7%, từ 2,0 m đến 3,0 m chiếm 21,9%, từ 3,0 m đến 4,0 m chiếm 10,8%, từ 4,0 m đến 10 m chiếm 5,0%, cao trên 10 m chiếm 8,2%. Trong vùng nghiên cứu có một số ngọn núi phân bố ở phía Tây và ven biển, như núi Trường Lệ ở TP. Sầm Sơn cao 76 m, núi Kim Chuế (Linh Trường) ở Hoằng Hóa, gần cửa Lạch Trường cao 200 m và núi Kim Trà ở phía thượng nguồn sông Lèn cao 800 m.

Đáy biển trong khu vực thuộc dạng địa hình đáy biển nông, thoải, thấp dần theo hướng Đông - Đông Nam. Vùng ven bờ phát triển một số khu vực rừng ngập mặn ven biển, trong đó tập trung chủ yếu ở khu vực cửa Lèn và cửa Lạch Trường.

Ngoài ra, một lý do khác luận án chọn dải ven biển từ Hậu Lộc tới Sầm Sơn để đánh giá chi tiết ngập lụt do nước dâng do bão còn do bởi số liệu địa hình (độ sâu dưới nước và trên cạn) và công trình bảo vệ bờ biển (đê, kè, đường giao thông - gọi chung là đê biển), những yếu tố ảnh hưởng tới nước dâng do bão và ngập lụt ven biển được cập nhật mới đến năm 2023 từ đề tài nghiên cứu khoa học cấp nhà nước mã số ĐTĐL.CN-46/22.

2.2. Số liệu phục vụ nghiên cứu

Trong luận án sử dụng các loại số liệu chính sau:

a. Số liệu địa hình trên cạn, dưới nước và công trình bảo vệ bờ biển:

+ Số liệu địa hình trên Biển Đông được thu thập từ GEBCO (General Bathymetry Chart of the Ocean) được cập nhật năm 2024 với độ phân giải 15 giây ((https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/).

+ Số liệu địa hình ở khu vực Thanh Hóa và lân cận được thu thập từ các hải đồ với các tỷ lệ 1:50.000, 1:100.000, 1:1000.000 và số liệu độ cao từ các bản đồ tỷ lệ 1:10.000 và 1:50.000 đã được công bố trong Dự án cập nhật Kịch bản biến đổi khí hậu năm 2020.

+ Số liệu địa hình, các mặt cắt, các công trình bảo vệ bờ biển như đê biển, đường giao thông (gọi chung là đê biển) được cập nhật đến năm 2023 từ đề tài "Nghiên cứu xây dựng bộ mô hình và quy trình công nghệ dự báo ngập lụt vùng ven biển do nước dâng và sóng trong bão", mã số ĐTĐL-CN-46/22.

Các nguồn số liệu này đều được quy về mốc "0" quốc gia tại trạm hải văn Hòn Dấu và được sử dụng để xây dựng các file số liệu địa hình cho mô hình SuWAT.

b. Số liệu quan trắc mực nước, sóng:

+ Chuỗi số liệu quan trắc mực nước ven biển (mực nước tổng hợp) tại trạm Hòn Dấu, Hòn Ngư, Sầm Sơn và trạm thủy văn Quảng Châu. Chuỗi số liệu thủy triều thiên văn và nước dâng do bão tại các trạm được tách từ mực nước quan trắc tổng hợp bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất [Phạm Văn Huấn, 2016]. Trong đó, số liệu quan trắc mực nước tại các trạm hải văn và thuỷ văn đã được quy về môc quốc gia.

+ Số liệu độ cao sóng quan trắc tại trạm Hòn Ngư và đo bằng phao trôi SIO do Trung tâm nghiên cứu và phát triển quan trắc ven biển (CORDC), Viện Hải dương học Scripps, Đại học California triển khai từ ngày 23/8/2017 đến ngày 20/12/2017, bước thời gian quan trắc số liệu sóng là 3 giờ.

Số liệu mực nước và sóng quan trắc được sử dụng để kiểm định mô hình. Lưu ý rằng tại các trạm Hòn Dấu, Hòn Ngư và Quảng Châu, mực nước được quan trắc từng giờ, trong khi sóng được quan trắc theo 03 lần/ngày vào 07:00, 13:00 và 19:00 giờ Việt Nam.

Trong luận án này, bão Doksuri (9/2017) được lựa chọn để xây dựng các kịch bản mô phỏng. Lý do chọn bão Doksuri (9/2017) do bởi đây là cơn bão có quỹ đạo điển hình gây nước dâng và ngập lụt tại khu vực, tương tự như một số cơn báo khác như Wukong (9/2000), Damrey (9/2005), Kajiki (8/2025), Bualoi (9/2025). Ngoài ra, tại thời điểm bão Doksuri ảnh hưởng có rất nhiều dữ liệu quan trắc về sóng và mực nước được thu thập đầy đủ hơn so với những cơn bão khác. Do vậy thời gian thu thập số liệu quan trắc mực nước và sóng để so sánh chỉ giới hạn trong thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng. Lý do luận án chọn số liệu quan trắc tại Hòn Ngư và

Hòn Dấu để so sánh nước dâng và mực nước tổng hợp do đây là 2 trạm hải văn ở lân cận ven biển Thanh Hóa và có quan trắc mực nước từng giờ, tại 2 trạm này đã ghi nhận nước dâng do bão lớn khi bão Doksuri (9/2017) đổ bộ.

c. Số liệu trường gió, áp, quỹ đạo bão:

+ Để hiệu chỉnh và kiểm nghiệm các mô hình, nghiên cứu sử dụng số liệu gió, áp suất không khí tái phân tích ERA5 trong cơn bão Doksuri (9/2017) với độ phân giải 0,25 độ kinh vĩ và bước thời gian 1 giờ của Trung tâm dự báo thời tiết hạn vừa Châu Âu [Bell và cộng sự, 2021]. Ngoài ra, số liệu về quỹ đạo và các tham số bão (best track) của bão Doksuri (9/2017) được sử dụng để xây dựng các kịch bản đánh giá tương tác giữa thủy triều, sóng biển và nước dâng do bão tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và nguy cơ ngập tại ven biển Thanh Hóa.

+ Để đánh giá nguy cơ bão, nước dâng do bão và ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa ở giai đoạn tương lai, luận án sử dụng số liệu bão d4PDF, một cơ cở dữ liệu khí hậu tập hợp lớn, được thiết kế riêng cho các đánh giá rủi ro biến đổi khí hậu [Mizuta và cộng sự, 2017], [Ishii và Mori, 2020]. Bộ dữ liệu này là kết quả của các mô phỏng tổng hợp được tiến hành cho hàng nghìn năm cho khí hậu trong quá khứ và tương lai bằng các mô hình khí quyển toàn cầu với độ phân giải ngang 60 km, cao gấp đôi so với hầu hết các mô hình trong CMIP5. Các mô phỏng khí hậu hiện tại bao gồm 100 thành phần, dựa trên các nhiễu loạn giá trị ban đầu của khí quyển và các nhiễu loạn nhiệt độ nước biển bề mặt hàng tháng. Các mô phỏng khí hậu trong tương lai gồm 90 thành phần được mô phỏng trong 60 năm (1951-2110) và được phân loại theo mức tăng nhiệt độ không khí bề mặt trung bình toàn cầu so với mức tiền công nghiệp +1,5^{o}K, +2^{o}K và +4^{o}K. Luận án sử dụng số liệu track bão được trích từ kết quả của mô hình hoàn lưu chung khí quyển MRI-AGCM3 của Viện nghiên cứu Khí tượng Nhật Bản, trong hai giai đoạn khí hậu hiện tại (1951–2010) và khí hậu tương lai (2051–2110) với kịch bản RCP 8.5 (mức tăng nhiệt độ không khí +4^{o}K). Các thông số bão/ATNĐ được trích xuất bằng phương pháp SimpleDM gồm (1): thời gian (ngày, tháng, năm giờ quốc tế UTC) với bước thời gian 06 giờ (0 giờ, 6 giờ, 12 giờ, 18 giờ), (2) kinh độ tại tâm bão, (3) vĩ độ tại tâm bão, (4) khí áp thấp nhất tại tâm bão

(hPa), (5) bán kính gió mạnh từ 50kt (hải lý) và (6) vận tốc gió cực đại tính bằng m/s.

+ Trị số nước biển dâng với kịch bản phát thải cao RCP 8.5 trong Kịch bản biến đổi khí hậu, do Bộ Tài nguyên và Môi trường (nay là Bộ Nông nghiệp và Môi trường) công bố năm 2020 [Bộ TN&MT, 2020] được sử dụng làm đầu vào cho mô hình mô phỏng ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa cho năm 2050 và năm 2100, tương ứng là 26 cm và 72 cm.

d. Số liệu sử dụng đất

Thông tin sử dụng đất là cơ sở quan trọng để xác định tham số ma sát của khu vực, số Manning (n). Nghiên cứu sử dụng số liệu sử dụng đất (LULC) năm 2017 của Dự án khoa học ALOS/ALOS-2 của Trung tâm nghiên cứu quan trắc Trái đất (EORC) thuộc Cơ quan thám hiểm hàng không vũ trụ Nhật Bản (JAXA). Dữ liệu sử dụng đất này chứa các lớp thông tin sử dụng đất hàng năm từ năm 1990 đến năm 2020 trên toàn lãnh thổ Việt Nam, độ phân giải không gian khoảng 30 m và 250 m với 2 cấp độ, cấp độ 1 gồm 10 lớp sử dụng đất (mã LULC) và cấp độ 2 với 18 lớp sử dụng đất. Độ chính xác tổng thể của lớp sử dụng đất cấp độ 1 dao động từ 86% đến 92% và lớp cấp độ 2 dao động từ 78% đến 85% [Phan và cộng sự, 2020], [Phan và cộng sự, 2021a], [Phan và cộng sự, 2021b].

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Nước dâng do bão, sóng và thủy triều là những yếu tố chính gây ra lũ lụt ven biển, trong khi lượng mưa và dòng chảy của sông cũng góp phần gây ra lũ lụt trong một số cơn bão. Ngoài yếu tố địa hình, công trình bảo vệ bờ và lưu lượng dòng chảy từ thượng nguồn mức độ ngập lụt vùng ven biển do bão phụ thuộc vào độ cao mực nước tổng cộng ven bờ, bao gồm mực nước biển trung bình, thủy triều, nước dâng do gió, áp và nước dâng do sóng.

Các thành phần mực nước ven bờ được mô tả như sau (hình 2.2a-b):

$$H_{tc} = H_{trung\ bình} + H_{thủy\ triều} + H_{nước\ dâng\ do\ bão} + (H_{dòng\ chảy\ sông}) \quad (2.1)$$

Trong đó:

H_{tc}: Mực nước tổng cộng trong bão.

$H_{trung\ bình}$: Mực nước trung bình, bằng không trong các điều kiện hiện tại.

$H_{thủy\ triều}$: Độ cao thủy triều trên nền mực nước trung bình.

$H_{nước\ dâng\ do\ bão}$: Nước dâng do bão.

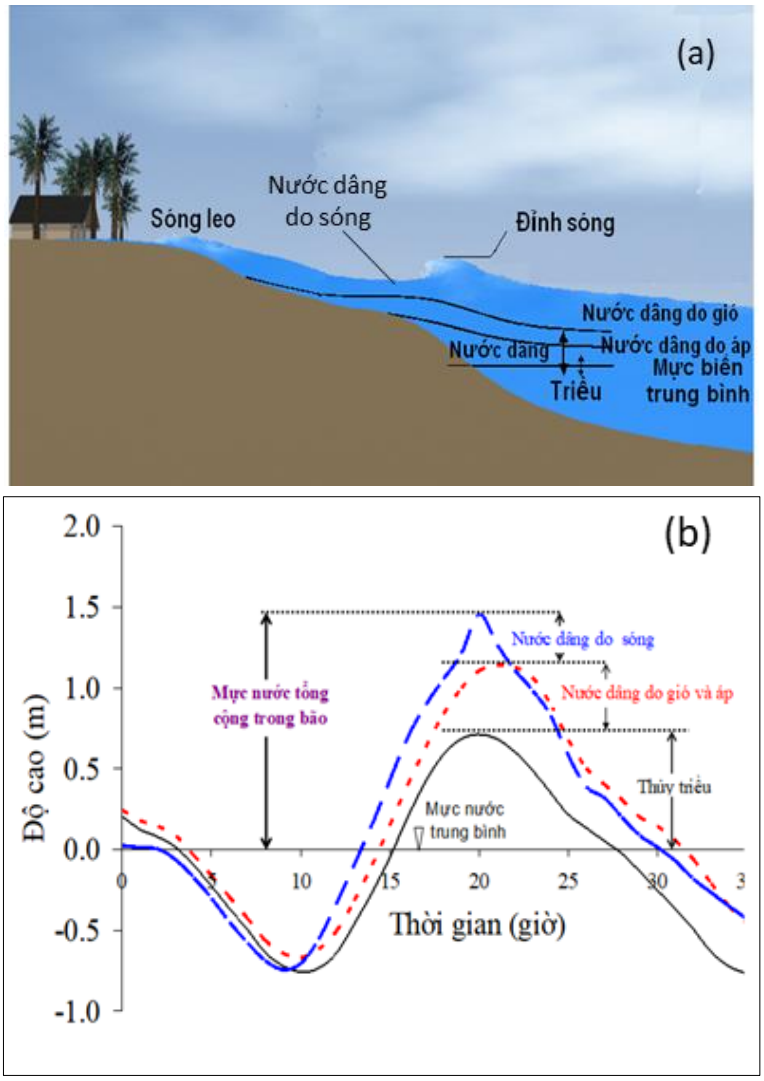
$H_{dòng\ chảy\ sông}$: Mực nước do dòng chảy sông gây ra ở vùng cửa sông.

$$H_{nước\ dâng\ do\ bão} = H_{gió+độ\ giảm\ khí\ áp} + H_{sóng} \quad (2.2)$$

với: $H_{gió+độ\ giảm\ khí\ áp}$: Nước dâng do gió và khí áp.

$H_{sóng}$: Nước dâng do sóng trong bão.

Trong tương lai mực nước biển trung bình sẽ dâng do biến đổi khí hậu, do vậy $H_{trung\ bình}$ khi đó sẽ bao gồm mực nước dâng do biến đổi khí hậu tại thời điểm đó.



Hình 2.2. Các thành phần mực nước ven bờ (a) và Dao động theo thời gian của các thành phần mực nước trong bão (b) [Đỗ Đình Chiến, 2015]

Nước dâng do bão được gây ra bởi ứng suất gió trên bề mặt và hiệu ứng giảm áp suất khí quyển trong bão, ngoài ra còn chịu tác động của sóng biển, thủy triều và địa hình khu vực (độ sâu đáy biển và hình dạng đường bờ biển). Trong đó, nước dâng do sóng được hiểu là sự dâng lên của mực nước do ứng suất bức xạ sóng và ứng suất bề mặt do sóng, trong đó nước dâng tạo bởi ứng suất bức xạ sóng là do quá trình chuyển đổi động năng sóng thành thế năng cột nước.

Sóng là một yếu tố phức tạp được kiểm soát bởi một số yếu tố như gió, địa hình, mực nước, dòng chảy. Sóng bão được tạo ra ở vùng nước sâu và sau đó truyền vào vùng ven bờ. Khi đi vào vùng nước nông hơn, sóng sẽ biến đổi do sự tương tác giữa sóng và địa hình đáy biển. Các quá trình này có thể bao gồm hiệu ứng nước nông, nhiễu xạ, khúc xạ và sóng vỡ. Sóng ở vùng ven bờ cũng có thể bị ảnh hưởng bởi gió và dòng chảy cục bộ. Sóng ảnh hưởng đến độ nhám của mặt nước và do đó làm gia tăng ứng suất của gió, gây ra nước dâng do bão. Một tác động quan trọng khác của sóng là tương tác sóng-dòng chảy làm khúc xạ sóng bởi dòng chảy và sự hình thành dòng chảy dọc bờ. Hệ quả là các đặc tính của sóng vùng gần bờ trở nên khác so với sóng ở vùng nước sâu. Sóng gần bờ có ảnh hưởng quan trọng đến hiện tượng ngập lụt ven biển thông qua hiện tượng làm tăng/giảm mực nước trung bình, hiện tượng sóng tràn khi chúng tương tác với các bãi biển hoặc công trình bảo vệ bờ. Nước dâng do sóng là một yếu tố làm gia tăng nguy cơ ngập lụt ven biển.

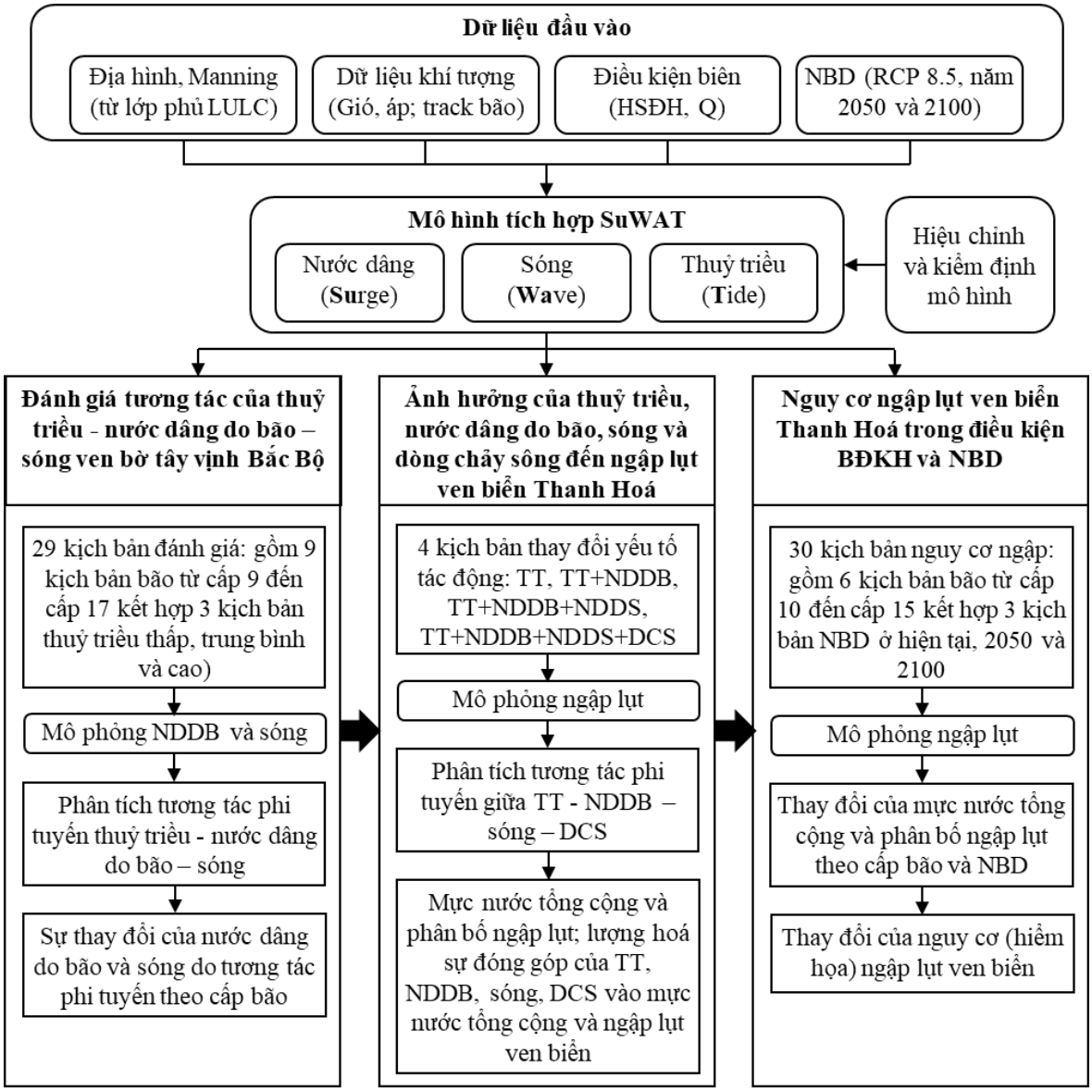
Ảnh hưởng của các hệ thống sông ngòi địa phương, cũng có thể tạo ra nguy cơ lũ lụt lớn hơn khi dòng nước ngọt tương tác với mực nước biển dâng cao trong bão ở hạ lưu. Điều này có thể làm nước ở hạ lưu không thể thoát ra biển và dẫn đến mực nước phía trong cửa sông dâng cao, có thể làm trầm trọng thêm tình trạng ngập lụt ven biển.

Nước biển dâng do biến đổi khí hậu là hiện tượng mực nước biển trung bình dâng cao hơn do biến đổi khí hậu, làm tăng diện tích vùng đất ngập nước ven biển, đồng thời gây ra sự không chắc chắn về mức dự phòng rủi ro ngập lụt ven biển. Nước biển dâng không chỉ chuyển sự phân bố mực nước cực đoan lên các độ cao cao hơn mà còn điều chỉnh chế độ mực nước cực trị thông qua các quá trình phi tuyến. Trên

thực tế, thủy triều và nước dâng do bão là sóng nước nông và phản ứng với những thay đổi của mực nước biển trung bình thông qua hiệu ứng áp suất. Do đó, mực nước biển trung bình và sự biến đổi theo không gian, thời gian của nó đóng một vai trò quan trọng trong đánh giá rủi ro lũ lụt ven biển và thích ứng ven biển.

Trong các yếu tố ảnh hưởng đến ngập lụt ven biển, thủy triều là yếu tố có chu kỳ có thể dự tính được với độ chính xác cao và yếu tố cần dự báo là nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông trên khu vực.

Để giải quyết các vấn đề đặt ra trong luận án này, tác giả áp dụng phương pháp mô hình hóa, cụ thể là mô hình tích hợp giữa mô hình thủy động lực và mô hình sóng SuWAT. Cách tiếp cận này cho phép xem xét ảnh hưởng của từng yếu tố đơn lẻ và ảnh hưởng tổng hợp của các yếu tố có khả năng ảnh hưởng đến độ cao nước dâng và ngập lụt ven biển như thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông. Trên cơ sở đó sẽ định lượng được đóng góp của từng quá trình vào mực nước tổng cộng và ngập lụt ven biển. Hình 2.3 thể hiện khung nghiên cứu của luận án. Đầu tiên, mô hình được thiết lập và kiểm định với số liệu quan trắc cho các mô phỏng thủy triều, nước dâng do bão, sóng và mực nước tổng cộng. Tiếp theo, thực hiện đánh giá tương tác giữa thủy triều, nước dâng do bão và sóng ở quy mô lớn ven bờ tây vịnh Bắc Bộ. Sau đó, trên cơ sở các đánh giá vừa nêu tiến hành phân tích và định lượng ảnh hưởng của các yếu tố thủy động lực đến ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa. Cuối cùng, luận án đánh giá nguy cơ ngập lụt ven biển Thanh Hóa dưới tác động của biến đổi khí hậu và nước biển dâng.



Hình 2.3. Sơ đồ khung nghiên cứu của luận án

2.3.1. Mô hình mô phỏng ngập lụt SuWAT

Mô hình tích hợp nước dâng, sóng và thủy triều (SuWAT) được phát triển bởi [Kim và cộng sự, 2008], được sử dụng để mô phỏng nước dâng do bão, sóng, thủy triều và ngập lụt trong khu vực nghiên cứu. SuWAT có thể thực hiện các phép tính song song cho một số miền tùy ý bằng cách sử dụng Giao diện truyền tin (MPI - Message Passing Interface). Sáu mô-đun nước dâng, sóng và thủy triều được tích hợp vào SuWAT như thể hiện trong hình 2.6, cho thấy luồng thông tin giữa các mô-đun và các miền tính [Kim và cộng sự, 2015]. Các mô-đun nước dâng và sóng có thể mô

phỏng độc lập hoặc mô phỏng kết hợp.

2.3.1.1. Mô hình nước dâng do bão

Hệ phương trình nước nông phi tuyến 2 chiều mô phỏng thủy triều và nước dâng do bão có xét đến thành phần ứng suất bức xạ gây ra bởi sóng được mô tả như sau:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \tag{2.3}$$

$$\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{d}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{MN}{d}\right)+gd\frac{\partial \eta}{\partial x}=fN-\frac{1}{\rho_w}d\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{1}{\rho_w}\left(\tau_S^x-\tau_b^x+F_x\right)+A_h\left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 M}{\partial y^2}\right) \tag{2.4}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N^2}{d}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{NM}{d}\right)+gd\frac{\partial \eta}{\partial y}=-fM-\frac{1}{\rho_w}d\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{1}{\rho_w}\left(\tau_S^y-\tau_b^y+F_y\right)+A_h\left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 N}{\partial y^2}\right) \tag{2.5}$$

Trong đó:

η: dao động mực nước bề mặt (m);

M, N: lưu lượng trung bình theo độ sâu hướng x và y (m^3/s);

f : tham số Coriolis;

P: áp suất khí quyển (hPa);

g : gia tốc trọng trường (m/s^2);

d : độ sâu tổng cộng $d=\eta+h$ (m);

A_h : khuếch tán rối theo phương ngang;

ρ_w : mật độ nước (kg/m^3);

F_x, F_y : áp lực do ứng suất bức xạ sóng (kg/ms^2) (chi tiết trong mục 2.3.3);

τ_b là ứng suất đáy (kg/ms^2), được tính toán bởi công thức:

$$\tau_b=\rho_w g n^2\frac{M}{d^{7/3}}|M| \tag{2.6}$$

n : hệ số nhám Manning ($m/s^{1/3}$);

τ_s : ứng suất bề mặt (kg/ms^2) (chi tiết trong mục 2.3.4).

Hệ các phương trình trên được sai phân theo sơ đồ so le Arakawa C theo không gian và sơ đồ Leap-frog theo thời gian. Sơ đồ upwind được sử dụng cho các thành phần phi tuyến. Sơ đồ Semi-Crank-Nicholson được sử dụng cho thành phần ứng suất

đáy, ứng suất gió và ứng suất sóng.

Điều kiện biên: Với lưới tính ngoài cùng, tại biên mở ngoài khơi, điều kiện biên là các hằng số điều hòa của 16 sóng triều (M2, S2, K1, O1, N2, P1, K2, Q1, M1, J1, OO1, 2N2, Mu2, Nu2, L2, T2) được trích từ mô hình thủy triều toàn cầu FES2014 [Lyard và cộng sự, 2021]. Theo cấu trúc của mô hình SuWAT, lưới tính tinh hơn sẽ sử dụng kết quả tính mực nước và dòng chảy từ lưới thô làm điều kiện biên lỏng. Tại các biên cứng, điều kiện phản xạ toàn phần được áp dụng cho trường hợp không tính ngập lụt, và biên khô/ướt cho tính ngập lụt. Trong khi đó biên lỏng dùng điều kiện phát xạ.

Độ ổn định của mô hình được xác định theo chỉ tiêu Courant (Courant stability criterion) về mối quan hệ giữa bước thời gian (Δt) và không gian (Δx, Δy) như trong phương trình (2.7). Tất cả các trường hợp tính toán trong luận án sử dụng bước thời gian tính (Δt) của mô hình thủy triều và nước dâng do bão là 1,0 giây, mô hình sóng là 900 giây, thời gian trao đổi dữ liệu của 2 mô hình là 900 giây.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{2\sqrt{gh}} \tag{2.7}$$

Mô hình tích hợp có khả năng tính toán theo 6 phương án như sau:

- Chỉ tính thủy triều ($H_{\text{thủy triều}}$);
- Chỉ tính sóng;
- Chỉ tính nước dâng do gió và áp ($H_{\text{gió+khí áp}}$);
- Nước dâng do gió và áp kết hợp thủy triều ($H_{\text{thủy triều}}$ *và* $H_{\text{gió+khí áp}}$);
- Nước dâng do gió và áp kết hợp với sóng ($H_{\text{gió+khí áp}}$ *và* $H_{\text{sóng}}$);
- Thủy triều kết hợp với nước dâng do gió, áp và sóng ($H_{\text{thủy triều}}$ và $H_{\text{gió+khí áp}}$ và $H_{\text{sóng}}$).

2.3.1.2. Mô hình sóng SWAN

Trong luận án, sử dụng mô hình sóng SWAN [Booij và cộng sự, 1999], được tích hợp vào mô-đun sóng của mô hình SuWAT [Kim và cộng sự, 2008], [Kim và cộng sự, 2010]. Mô hình SWAN được xây dựng dựa trên phương trình cân bằng tác động sóng với các nguồn cấp năng lượng trong hệ toạ độ Đề các:

$$\frac{\partial}{\partial t}N+\frac{\partial}{\partial x}C_xN+\frac{\partial}{\partial y}C_yN+\frac{\partial}{\partial \sigma}C_\sigma N+\frac{\partial}{\partial \theta}C_\theta N=\frac{S}{\sigma} \quad (2.8)$$

Trong đó: N: mật độ tác động phổ; C_x, C_y: vận tốc truyền năng lượng sóng trong không gian; C_σ, C_θ: vận tốc lan truyền trong không gian phổ (σ, θ); S: tổng năng lượng nguồn và tiêu tán; θ: hướng sóng.

Hàm nguồn S là tổng của các thành phần phát sinh và tiêu tán năng lượng sóng, được xác định như sau:

$$S=S_{in}+S_{nl3}+S_{nl4}+S_{ds,b}+S_{ds,br} \quad (2.9)$$

Trong đó các số hạng vế phải của phương trình (2.9) lần lượt là thành phần phát triển sóng do gió; thành phần chuyển đổi phi tuyến tương tác sóng bậc ba và bậc bốn; thành phần tiêu tán do sóng bạc đầu; thành phần tiêu tán do ma sát và sóng vỡ do nước nông.

2.3.1.3. Ứng suất bức xạ sóng

Trong hai phương trình chuyển động của hệ phương trình nước nông phi tuyến hai chiều (phương trình 2.4 và 2.5) có chứa hai thành phần F_x và F_y là áp lực do ứng suất bức xạ sóng. Độ lớn của nước dâng hay nước rút do ứng suất sóng sẽ phụ thuộc vào hai thành phần này. Áp lực do sóng phụ thuộc vào gradient theo không gian của ứng suất bức xạ sóng theo mối liên hệ dưới đây:

$$\begin{aligned} F_x &= -\frac{\partial S_{xx}}{\partial_x}-\frac{\partial S_{xy}}{\partial_y} \\ F_y &= -\frac{\partial S_{yx}}{\partial_x}-\frac{\partial S_{yy}}{\partial_y} \end{aligned} \quad (2.10)$$

trong đó ứng suất bức xạ sóng được xác định theo lý thuyết như sau [Longuet-Higgins và Stewart, 1962]:

$$S_{xy}=S_{yx}=\rho g\iint[\cos\theta\sin\theta]Ed\sigma d\theta \quad (2.11)$$

$$S_{yy}=\rho g\iint\left[\frac{C_g}{C}\sin^2\theta+\frac{C_g}{C}-\frac{1}{2}\right]Ed\sigma d\theta \quad (2.12)$$

$$S_{xx} = \rho g \iiint \left[\frac{C_g}{C} s\cos^2\theta + \frac{C_g}{C} - \frac{1}{2} \right] E d\sigma d\theta \qquad (2.13)$$

với C là vận tốc truyền sóng và C_g là vận tốc nhóm sóng, E là năng lượng sóng, σ tần số sóng và θ là hướng sóng.

Ứng suất bức xạ sóng là cơ sở để phân tích nhiều quá trình xảy ra tại vùng nước nông ven bờ như hiện tượng nước dâng và nước rút do sóng, tương tác giữa sóng và dòng chảy, dòng chảy dọc bờ do sóng. Các thành phần F_x và F_y phụ thuộc vào gradient của ứng suất bức xạ sóng nên có thể nhận giá trị âm và dương. Mô hình nước nông phi tuyến 2 chiều sẽ nhận F_x và F_y được tính từ mô hình SWAN theo từng bước thời gian tính toán.

2.3.1.4. Ứng suất trên mặt biển

Ứng suất bề mặt được xác định theo mối liên hệ sau:

$$\tau_s = \rho_a C_D \vec{U}_{10} \left| \vec{U}_{10} \right| \qquad (2.14)$$

trong đó:

ρ_a : mật độ không khí (kg/m^3);

U_{10}: Vận tốc gió trung bình tại độ cao 10m trên bề mặt biển (m/s);

C_D: hệ số kéo.

Trong trường hợp mô hình không xét đến sóng biển, hệ số kéo được tính theo mối liên hệ với vận tốc gió như sau [Honda và Mitsuyasu, 1980]:

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024U_{10}) \times 10^{-3} (U_{10} \le 8m/s) \\ (0.58 + 0.063U_{10}) \times 10^{-3} (U_{10} > 8\text{m/s}) \end{cases} \qquad (2.15)$$

Trong trường hợp mô hình có xét đến ảnh hưởng của sóng, khi đó ứng suất bề mặt sẽ bao gồm ứng suất do gió và ứng suất sóng và hệ số C_D được xác định phức tạp hơn, như trong tài liệu lý thuyết của mô hình SWAN, cụ thể như sau:

Ứng suất bề mặt được coi là tổng của ứng suất rối và ứng suất gây ra bởi sóng [Janssen, 1991]:

$$\tau = \tau_{\text{turb}} + \tau_{\text{w}} \qquad (2.16)$$

Ứng suất rối được mô hình hóa bằng lý thuyết xáo trộn theo phương thẳng

đứng:

$$\tau_{turb} = \rho_a (\kappa z)^2 \left(\frac{\partial U_{(z)}}{\partial z} \right)^2 \quad (2.17)$$

trong đó κ (= 0,4) là hằng số von Karman và $U(z)$ là tốc độ gió ở độ cao z. Vận tốc được giả định như sau:

$$U_{(Z)} = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z + z_e - z_0}{z_e} \right) \quad (2.18)$$

trong đó: u_* là vận tốc ma sát, $u_* = \sqrt{\tau/\rho_a}$, z_0 là độ dài nhám $z_0 = \alpha u^2/g$ (α = 0,01). Độ dài nhám hiệu dụng z_e phụ thuộc vào z_0, $\vec{\tau}_w$ vectơ ứng suất gây ra bởi sóng và tổng ứng suất bề mặt τ, được mô tả như sau:

$$z_e = \frac{z_0}{\sqrt{1 - |\vec{\tau}_w| / \tau}} \quad (2.19)$$

trong đó :

$$\vec{\tau}_\omega = \rho_\omega \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \omega S_{in}(\sigma, \theta) \frac{\vec{k}}{k} d\sigma d\theta \quad (2.20)$$

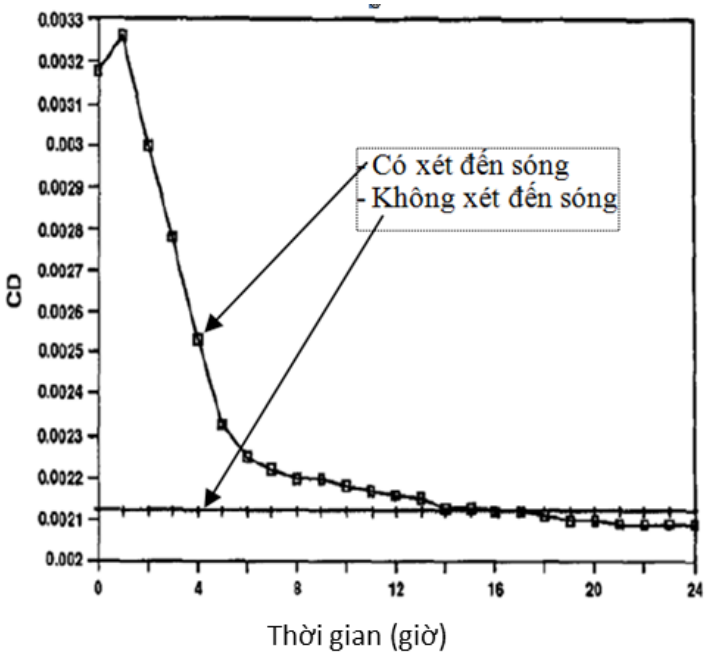
S_{in} (σ, θ) là hàm nguồn trường gió đầu vào, k là số sóng và $\vec{k}$ là véc tơ số sóng.

Hệ số kéo (drag coefficient) được xác định như sau:

$$C_D = u_*^2 / U(z)^2 = \left[\kappa / \left(\ln \frac{z + z_e - z_0}{z_e} \right) \right]^2 \quad (2.21)$$

Hệ số kéo khi có tính đến ảnh hưởng của sóng sẽ trở nên lớn hơn tại giai đoạn đầu của quá trình phát triển sóng dưới trạng thái ổn định của vận tốc gió tại độ cao 10 m như trên hình 2.4 [Janssen, 1992], ở đó là kết quả ước lượng hệ số kéo cho trường hợp vận tốc gió U_{10} = 18,45 m/s. Như vậy khi xét đến ảnh hưởng của sóng, hệ số kéo đã thay đổi so với trường hợp không xét tới sóng. Hệ số kéo C_D được tính từ mô hình SWAN và được truyền vào mô hình SuWAT giống như trường hợp của ứng suất bức xạ sóng. Sự khác nhau của hệ số kéo và thành phần ứng suất bức xạ sóng

được bổ sung trong phương trình nước nông phi tuyến hai chiều là nguyên nhân làm tăng trị số nước dâng do bão khi xét đến ảnh hưởng của sóng.

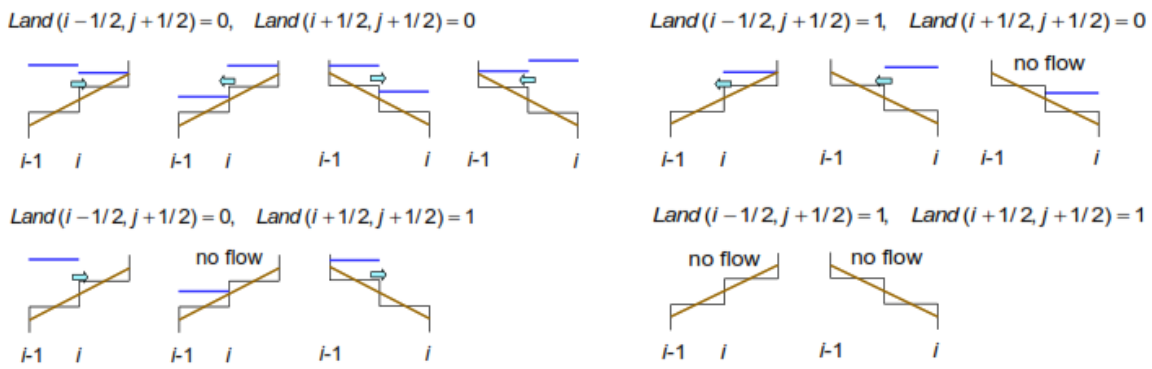


Hình 2.4. Hệ số C_D (a) và ứng suất bề mặt tại vận tốc gió U_{10}=18.45m/s cho trường hợp mô hình có và không xét ảnh hưởng của sóng [Jannsen, 1992]

2.3.1.5. Điều kiện khô ướt, biên sông

Mô hình SuWAT áp dụng thuật toán biên di dộng trong mô phỏng ngập lụt. Hình 2.5 mô tả thuật toán biên di động của mô hình minh họa theo hướng x với chỉ số "land" là một biến trong mô hình. Trong đó chỉ số "land" được xác định là khô (không ngập) nếu "land = 0" và không ướt (ngập) nếu "land = 1". Trong suốt quá trình tính của mô hình, tại từng bước thời gian dao động mực nước tại từng điểm η(i,j) luôn được so sánh với độ cao tại điểm đó H(i,j) để xác định xem có lượng nước tràn vào vùng đất khô hay không và dòng chảy đi vào hay đi ra, tuỳ thuộc vào độ cao của mực nước và địa hình tại đó. Quy trình cũng tương tự được sử dụng cho hướng y.

Đối với biên sông, lưu lượng nước theo thời gian tại các vị trí trên sông là kết quả mô phỏng từ mô hình 1D được sử dụng làm điều kiện biên sông.



Hình 2.5. Thuật toán mô tả biên di động trong mô hình SuWAT [Kim và cộng sự, 2008].

2.3.1.6. Các tham số sử dụng trong mô phỏng sóng

Trong nghiên cứu này, các mô phỏng sóng được thực hiện với các giá trị mặc định của các tham số vật lý như được mô tả bởi [Kim và cộng sự, 2015]: sóng phát triển tuyến tính theo [Cavaleri và Malanotte-Rizzoli, 1981], sóng phát triển phi tuyến (hàm mũ) theo [Janssen, 1989] và [Janssen, 1991], sóng bạc đầu theo [Janssen, 1991], tương tác sóng bậc bốn theo [Hasselmann và cộng sự, 1985], sóng vỡ do độ sâu theo [Battjes và Janssen, 1989] và ma sát đáy theo [Madsen và cộng sự, 1988]. Để thích ứng với nhiễu xạ sóng trong các mô phỏng SWAN, một phép xấp xỉ khúc xạ-nhiễu xạ tách pha đã được được sử dụng [Holthuijsen và cộng sự, 2003]. Trong các tính toán sóng, sử dụng hệ số Ur = 10 cho giới hạn của tương tác sóng bậc bốn và hệ số q_b = 1,0 cho tỷ lệ sóng vỡ. Các phép rời rạc sau đây được sử dụng: 10° trong độ phân giải hướng và 25 khoảng tần số trong giới hạn từ 0,03 đến 1,00 Hz. Phổ sóng trong miền lưới thô được chuyển đến ranh giới mở trong miền lưới mịn hơn tại mỗi bước thời gian 900 giây. Mô hình sóng cũng mô phỏng với bước thời gian 900 giây.

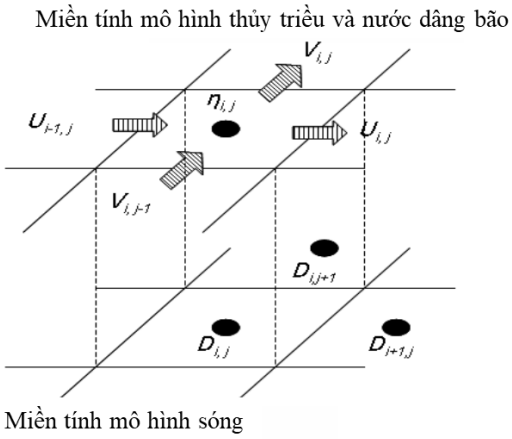
2.3.2. Kết nối mô hình thủy triều nước dâng do bão và mô hình sóng

Trong mô hình tích hợp SuWAT, lưới tính thủy triều, nước dâng do bão và lưới tính sóng được minh họa như trên hình 2.6. Tất cả các thành phần của các tham số sóng được xác định tại điểm *D* trên lưới. Dòng chảy theo hướng *x* và *y* được gán với các điểm *U* và *V* tương ứng, trong khi đó dao động mực nước được xác định tại

η. Các thành phần xác định tại (i, j) của lưới tính nước dâng cũng tương ứng với các tham số sóng được xác định tại (i, j) trên lưới của mô hình sóng.

Trong tính toán, thành phần mực nước η được chuyển trực tiếp đến $D_{i,j}$ trên lưới của mô hình SWAN, trong khi đó vận tốc dòng chảy trung bình $U_{i-1,ji\ j}$ và $U_{i,j}$ theo hướng x được nội suy tuyến tính đến $D_{i,j}$, cũng tương tự với thành phần vận tốc dòng chảy theo hướng y. Với SWAN, hệ số kéo và áp lực gây ra bởi ứng suất bức xạ sóng tại $D_{i,\ j}$ và $D_{i+1,\ j}$ được nội suy tuyến tính tới điểm $U_{i,j}$ của mô hình nước dâng, trình tự cũng tương tự theo phương y.

Cuối cùng, vận tốc gió theo hướng x và y được xác định tại η và D trên lưới tính của mô hình nước dâng và sóng tương ứng.



Hình 2.6. Sơ đồ tính toán các thành phần trong SuWAT [Kim và cộng sự, 2008]

Với lưới tính lồng, quá trình kết nối được thực hiện bằng các chương trình con của các mô hình thành phần tương ứng với số miền được sử dụng để tính toán. Mỗi chương trình con kết nối sẽ chạy liên tiếp từ lưới thô cho đến lưới tinh hơn thông qua giao diện MPI. Kết quả đầu ra mực nước, dòng chảy hoặc phổ sóng của lưới tính thô sẽ được sử dụng làm điều kiện tại biên cho lưới tính kế tiếp, cho đến lưới tính cuối cùng.

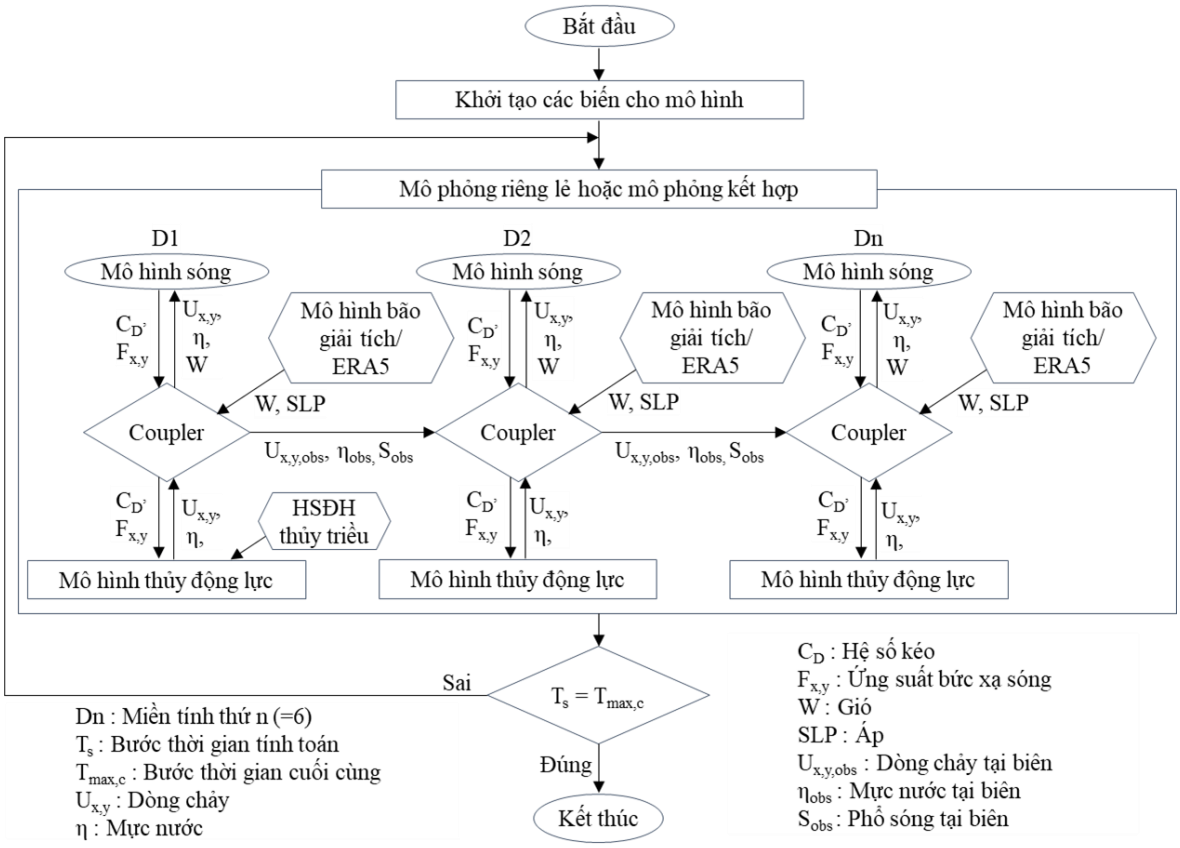
Quá trình truyền các tham số trong mô hình được tích hợp tính cuối cùng. Quá trình truyền các tham số trong mô hình tích hợp và giữa lưới lồng được thể hiện như trên hình 2.7 với trình tự dưới đây:

(1) Ban đầu mô hình nước dâng/thủy triều tính toán thủy triều từ miền 1 tới 6.

(2) Trong miền tính 1, quá trình tính các tham số sóng được thực hiện sau quá trình tính dòng chảy và mực nước. Giá trị mực nước và dòng chảy của mô đun nước dâng cùng ứng suất gió sẽ được truyền vào mô đun sóng. Mô đun sóng sau khi tính toán ứng suất bức xạ sóng và hệ số kéo sẽ truyền đến mô đun nước dâng do bão.

(3) Sau khi hoàn thành tính toán tại miền tính 1, số liệu mực nước và dòng chảy của mô đun thủy triều và nước dâng và số liệu phổ sóng của mô đun sóng tại các điểm biên của miền tính 2 sẽ nhận làm điều kiện biên cho miền tính thứ 2.

Quy trình trên được lặp lại cho đến miền tính cuối cùng.



Hình 2.7. Sơ đồ tích hợp của mô hình SuWAT cho lưới lồng 6 lớp (n=6) [Kim và cộng sự, 2015]

2.3.3. Mô hình bão giải tích

Một mô hình tham số gió và áp suất được nhúng trong SuWAT đã được sử dụng để tái tạo trường gió và áp suất của bão. Công thức của Schloemer (1954) được sử dụng để mô phỏng trường áp suất bề mặt trong bão:

$$P = P_c + \Delta P . e^{-\frac{R}{r}} \quad (2.22)$$

$$\Delta P = P_n - P_c \quad (2.23)$$

Trong đó:

P : Áp suất tại điểm tính cách tâm bão r km (hPa)

P_c : Áp suất ở tâm bão (hPa)

P_n : Áp suất ở rìa bão (= 1010 hPa)

R : Bán kính gió cực đại (km)

r : Khoảng cách từ tâm bão tới điểm tính (km)

Công thức của Fujii và Mitsuta (1986) được lựa chọn để mô phỏng trường gió bề mặt trong bão [Fujii và Mitsuta, 1986]:

$$V_{gr} = r_t \left[\sqrt{\frac{f^2}{4} + \frac{\mathrm{R}\Delta P}{\rho_a r^2 r_t} \mathrm{e}^{\left(-\frac{\mathrm{R}}{\mathrm{r}}\right)}} - \frac{f}{2} \right] \quad (2.24)$$

Trong đó:

V_{gr} : là gió địa chuyển

f = 2Ωsinθ : tham số Coriolis

Ω : Tần số tự quay của trái đất (≈ 1.99×10^{-7})

θ : là vĩ độ địa lý

ρ_a : là mật độ không khí

r_t được tính như sau:

$$r_t = \frac{r}{1 + \frac{U_{10}}{V_{gr}} sin\beta} \quad (2.25)$$

Trong đó U_{10} là gió tại độ cao 10 m. Trong phương trình (2.25), V_{gr} và U_{10} là giá trị tại bước thời gian trước đó. β là góc giữa hướng di chuyển của bão và hướng tới r theo chiều ngược kim đồng hồ. U_{10} được tính bằng cách nhân V_{gr} với C_1 như sau:

$$U_{10} = C_1 V_{gr} \quad (2.26)$$

$$C_1 = C_2 + [C_3 - C_2] \left(\frac{r}{C_4 \mathrm{R}} \right)^{k-1} e^{\left\{ \left(1 - \frac{1}{k}\right) \left[1 - \left(\frac{r}{C_4 \mathrm{R}} \right)^k \right] \right\}} \quad (2.27)$$

Trong đó, các hệ số k = 1,2, C_2 = 0,6667, C_3 = 1,2 và C_4 = 0,5.

Trong mô hình này, sự biến dạng cấu trúc lõi bão không được tính đến.

2.3.4. Mô hình dòng chảy sông

Trong nghiên cứu này, lưu lượng tại các vị trí biên sông SM trên sông Mã và SC trên sông Chu (hình 2.8f) được trích từ kết quả của mô hình MIKE 11 và được kế thừa từ kết quả nghiên cứu của Dự án cấp Bộ Tài Nguyên và Môi trường "Phân vùng rủi ro thiên tai và lập bản đồ cảnh báo lũ ngập lụt" [Lương Hữu Dũng, 2023].

2.4. Miền, lưới tính và địa hình cho mô hình

2.4.1. Miền tính, lưới tính và địa hình

Luận án hướng tới mục tiêu đánh giá ảnh hưởng của tương tác thủy triều, sóng và nước dâng do bão tới độ cao nước dâng và độ cao sóng tại vùng biển ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và mô phỏng ngập lụt vùng ven biển Thanh Hóa, do vậy, mô hình cần thiết phải xây dựng trên lưới tính chi tiết để nhằm mục đích:

(1) có thể chi tiết hóa sự biến đổi phức tạp của địa hình của khu vực ven bờ, trên cạn nhằm tăng độ chính xác của tính toán;

(2) làm tăng độ tin cậy của tính toán nước dâng do sóng, vì nước dâng do sóng thường chỉ có thể được đánh giá đầy đủ với các lưới tính có độ phân giải cao.

Do vậy, trong luận án sử dụng lưới lồng sáu cấp, được mô tả như sau:

- Miền ngoài cùng D01 (hình 2.8a), bao phủ toàn bộ Biển Đông (105^o - 120^{o}E; 8^o - 22^{o}N) với độ phân giải 4500 m.

- Miền D02 (hình 2.8b) được thiết lập để bao phủ bờ biển phía bắc của Tỉnh Quảng Ninh đến bờ biển phía nam của Tỉnh Quảng Ngãi (105^o – 112,5^{o}E; 14,5^o – 22^{o}N), với độ phân giải 1500 m.

- Miền trung gian, D03 (hình 2.8c) trong phạm vi 105^o – 108,5^{o}E; 17,5^o – 21,5^{o}N, với độ phân giải 500 m. Kết quả mô phỏng từ miền tính D3 sẽ tập trung phân tích tại 03 vị trí Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La. Lý do chọn 03 vị trí này do Hòn Dấu và Hòn Ngư là trạm hải văn, có quan trắc mực nước từng giờ để có thể đánh giá diễn

biển nước dâng do bão, Hòn La được chọn do bởi đây là vị trí gần tâm bão đổ bộ, có nước dâng và sóng trong bão cũng như ảnh hưởng của tương tác thủy triều sóng và nước dâng do bão tới độ cao nước dâng và sóng có thể lớn hơn hai vị trí còn lại.

- Miền D4 (hình 2.8d) tập trung vào vùng biển ven bờ từ Ninh Bình đến Nghệ An thuộc phạm vi 105,75^o – 106,5^{o}E; 19,2^o – 20,22^{o}N với độ phân giải 150 m.

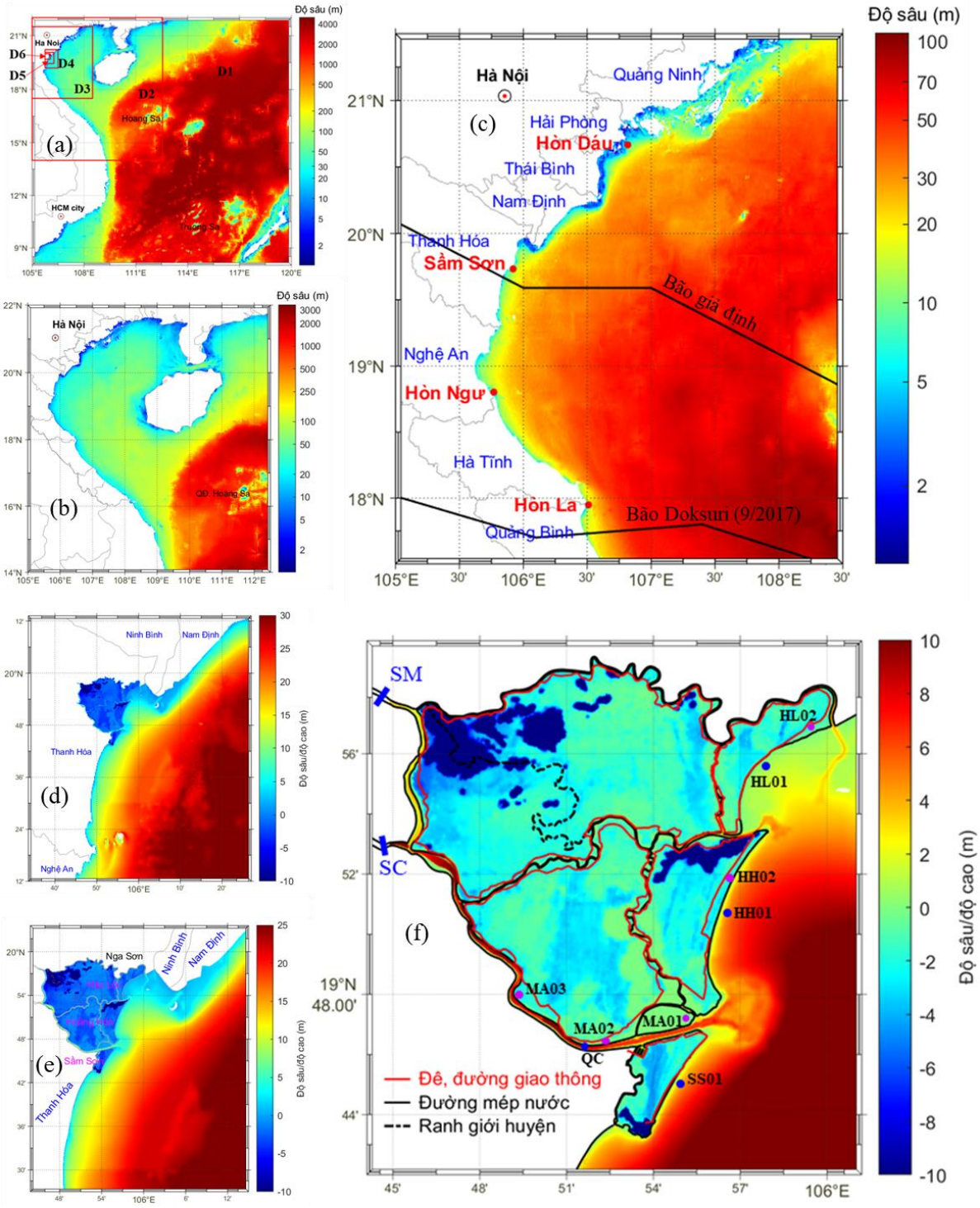
- Miền gần trong cùng D5 (hình 2.8e) tập trung vào vùng biển ven bờ phía bắc tỉnh Thanh Hóa đến nam tỉnh Nam Định thuộc phạm vi 105,75^o – 106,27^{o}E; 19,45^o – 20,05^{o}N, với độ phân giải 50 m .

- Miền trong cùng D6 (hình 2.8f) tập trung vào vùng ven biển thuộc Hậu Lộc, Hoằng Hóa và Sầm Sơn, tỉnh Thanh Hóa, thuộc phạm vi 105,75^o – 106,04^{o}E; 19,705^o – 19,99^{o}N, với độ phân giải chi tiết nhất là 20 m. Đây khu vực luận án sẽ tập trung mô phỏng ngập lụt. Các vị trí trên miền D6 sẽ sử dụng để phân tích kết quả mô phỏng về diễn biến theo thời gian độ cao mực nước tổng hợp/độ sâu ngập lụt.

Thông tin chi tiết về miền tính, lưới tính và số điểm của từng lưới tính thể hiện trên bảng 2.1.

Bảng 2.1. Thông tin của các miền tính

Tên miền tính	Ranh giới	Kích thước lưới (m)	Số điểm lưới (Nx x Ny)
D1	105^o - 120^{o}E 8^o - 22^{o}N	$\Delta x = \Delta y$ = 4500 m	371 x 345
D2	105^o - 112,5^{o}E 14,5^o – 22^{o}N	$\Delta x = \Delta y$ = 1500 m	556 x 556
D3	105^o - 108,5^{o}E 17,5^o - 21,5^{o}N	$\Delta x = \Delta y$ = 500 m	778 x 889
D4	105,75^o - 106,5^{o}E 19,2^o - 20,22^{o}N	$\Delta\Delta x = \Delta y$ = 150 m	557 x 747
D5	105,75^o - 106,27^{o}E 19,45^o - 20,05^{o}N	$\Delta x = \Delta y$ = 50 m	1556 x 1779
D6	105,75^o - 106,04^{o}E 19,705^o - 19,99^{o}N	$\Delta x = \Delta y$ = 20 m	1701 x 1713



Hình 2.8. Miền của khu vực nghiên cứu gồm 6 cấp lưới: (a) miền ngoài cùng, (b, c, d, e) các miền trung gian và (f) miền trong cùng tính ngập lụt

2.4.2. Công trình bảo vệ bờ biển tại Thanh Hóa

Công trình bảo vệ bờ biển trong luận án này được hiểu là hệ thống đê biển, đê sông, đường giao thông ven biển (gọi chung là đê biển), những yếu tố ảnh hưởng tới ngập lụt tại khu vực khi mực nước biển dâng/rút theo pha thủy triều và nước dâng trong thời gian bão ảnh hưởng, chi tiết về cao trình đê/đường giao thông cho từng khu vực như sau (hình 2.9):

Tại Hậu Lộc:

+ Ở ven biển, cao trình đê biển đổi từ 4,5 m ở khu vực cửa sông Lèn lên đến 5,5 m ở đoạn giữa, sau đó giảm dần đến 5,2 m ở khu vực cửa sông Lạch Trường.

+ Đê hữu sông Lèn có cao trình từ 4,5 m ở cửa sông, tăng dần đến trên 10 m ở khu vực thượng nguồn hợp lưu với sông Mã.

+ Đê sông Dế tương đối thấp, cao trình từ 3,1 m đến 3,5 m.

+ Đê tả sông Lạch Trường có cao trình biến đổi từ 4,3 m ở khu vực giao với sông Dế đến 8,0 m ở thượng nguồn hợp lưu với sông Mã.

Tại Hoằng Hóa:

+ Ở ven biển: Có tuyến đường chạy dọc từ bắc xuống nam, cao trình biến đổi từ 3,5 m đến 4,0 m.

+ Đê hữu sông Lạch Trường, cao trình biến đổi từ 4,3 m ở khu vực giao với sông Dế đến 8,0 m ở thượng nguồn hợp lưu với sông Mã.

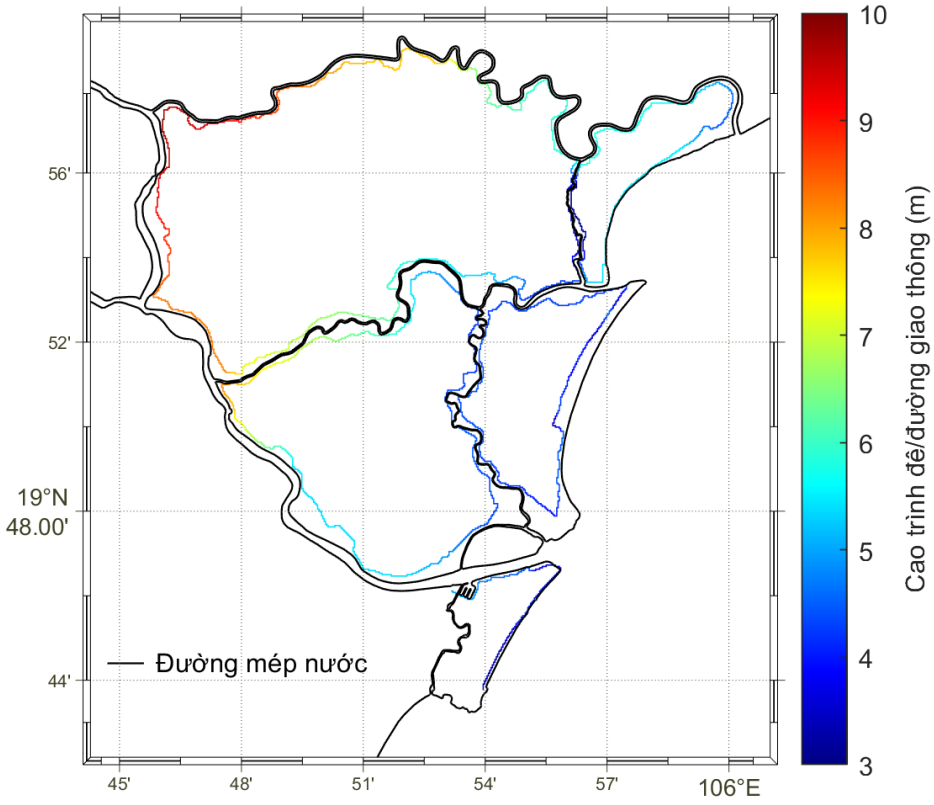
+ Đê tả sông Mã, cao trình đê tăng dần từ 4,3 m ở gần cửa Hới (hợp lưu với sông Cung) đến 8,0 m ở khu vực hợp lưu với sông Lạch Trường và trên 10 m ở khu vực hợp lưu với sông Lèn.

+ Sông Cung có cao trình biến đổi từ 4,3 m đến 4,5 m.

Tại Sầm Sơn:

+ Đường ven biển có cao trình từ 3,6 m đến 4,2 m.

+ Đê cửa sông có cao trình từ 5,0 m giảm dần đến 4,3m về phía cửa sông.



Hình 2.9. Cao trình đê/đường giao thông khu vực nghiên cứu

2.4.3. Lựa chọn ma sát đáy

Trong các mô hình thủy động lực học, hệ số nhám Manning (n) đại diện cho lực cản của đáy hoặc bề mặt địa hình đối với dòng chảy. Việc lựa chọn tham số này ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ truyền sóng triều, nước dâng và đặc biệt là phạm vi cũng như độ sâu ngập lụt trên đất liền.

Nhiều nghiên cứu trước đây tại Việt Nam thường sử dụng hệ số nhám hằng số cho toàn bộ miền tính (thường lấy n ≈ 0,02 – 0,025 phù hợp cho vùng biển/đáy cát) hoặc chỉ phân loại đơn giản theo độ sâu (vùng nước sâu, vùng ven bờ). Cách này không phản ánh đúng thực tế vật lý khi nước tràn vào đất liền. Trên đất liền, dòng chảy chịu lực cản rất lớn và không đồng nhất từ nhà cửa, cây cối, đồng ruộng... (ví dụ: rừng ngập mặn cản nước mạnh hơn nhiều so với mặt nước thoáng hoặc đồng cỏ). Việc dùng hệ số nhám thấp của biển cho vùng đất liền sẽ làm cho nước tràn vào nhanh hơn và xa hơn thực tế, dẫn đến sai số lớn trong kết quả mô phỏng ngập lụt.

Trong luận án này, thay vì dùng một giá trị chung, luận án xây dựng trường

ma sát biến đổi theo từng ô lưới dựa trên lớp phủ thực tế. Luận án sử dụng bản đồ sử dụng đất (LULC) năm 2017 của JAXA với độ phân giải 30m (hình 2.10a) để làm cơ sở tính toán. Việc này giúp mô phỏng chính xác hơn quá trình tiêu tán năng lượng khi nước biển tràn qua các loại địa hình khác nhau, từ đó nâng cao độ tin cậy của kết quả mô phỏng ngập lụt.

Hệ số n được xác định bằng cách liên kết thông tin từng lớp sử dụng đất LULC với hệ số manning được mô tả trong các tài liệu hướng dẫn thực hành về thủy lực [Arcement và Schneider, 1989] và trong các nghiên cứu trước đây [Bunya và cộng sự, 2010], [Dietrich và cộng sự, 2011]. Số liệu sử dụng đất có độ phân giải 30 m, cấp độ 2, năm 2017 được sử dụng để xác định hệ số Manning. Các giá trị cụ thể của hệ số n theo các mã LULC được trình bày trong bảng 2.2 và bảng 2.3. Hình 2.10b cho thấy các giá trị n được áp dụng ở miền tính trong cùng D6. Ngoài ra, các nghiên cứu trước đây đã xác định được hệ số n=0.02 là phù hợp nhất với việc mô phỏng thủy triều, nước dâng do bão, sóng và mực nước tổng cộng trong khu vực nghiên cứu [Đỗ Đình Chiến, 2015], [Nguyễn Bá Thủy và cộng sự, 2016], [Thuy và cộng sự, 2020] và [Thai và cộng sự, 2017]. Do đó, trong luận án sử dụng các giá trị của n được gán lần lượt là 0,02, 0,025, 0,025, 0,03 và 0,045 cho tương ứng với vùng biển, cửa sông, sông lớn sâu, sông nhỏ sâu và sông nhỏ nông dòng chảy hạn chế.

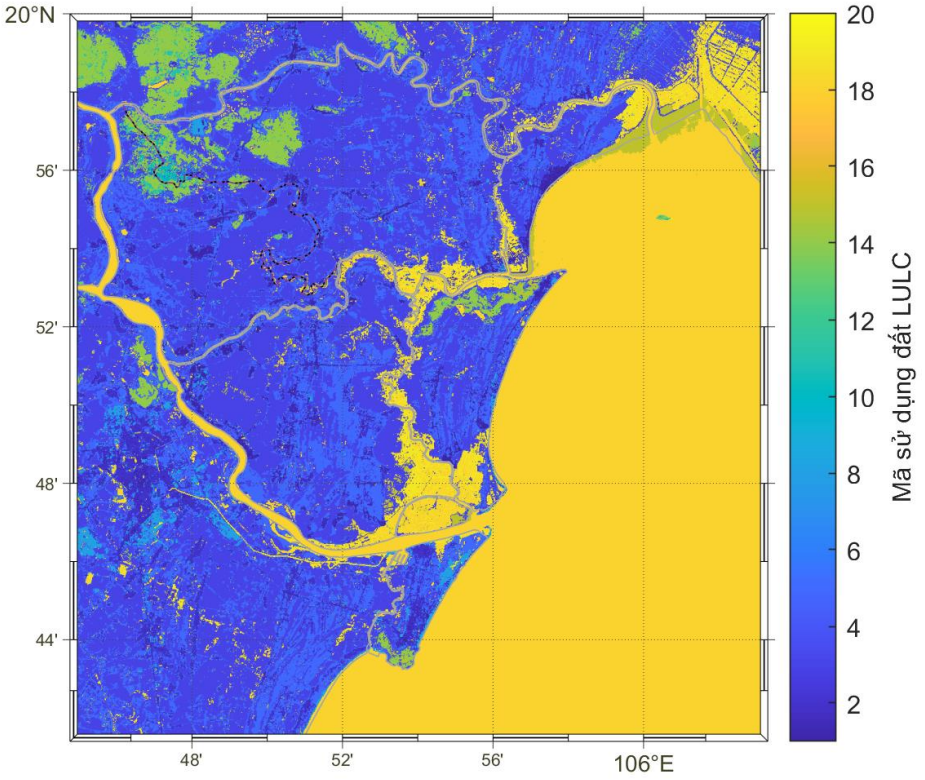
Bảng 2.2. Giá trị n theo phân loại mã LULC

Mã LULC	**Mô tả**	**n**
1	Khu đô thị 1 hoặc Khu vực phát triển cao	0,12
2	Khu đô thị 2 hoặc Khu vực phát triển cao	0,12
3	Đất trồng lúa	0,1
4	Đất trồng cây lâu năm	0,1
5	Đất trồng trọt khác	0,1
6	Cây trồng trong nhà	0,1
7	Đồng cỏ	0,08
8	Đất cằn cỗi	0,075
9	Cây bụi	0,08

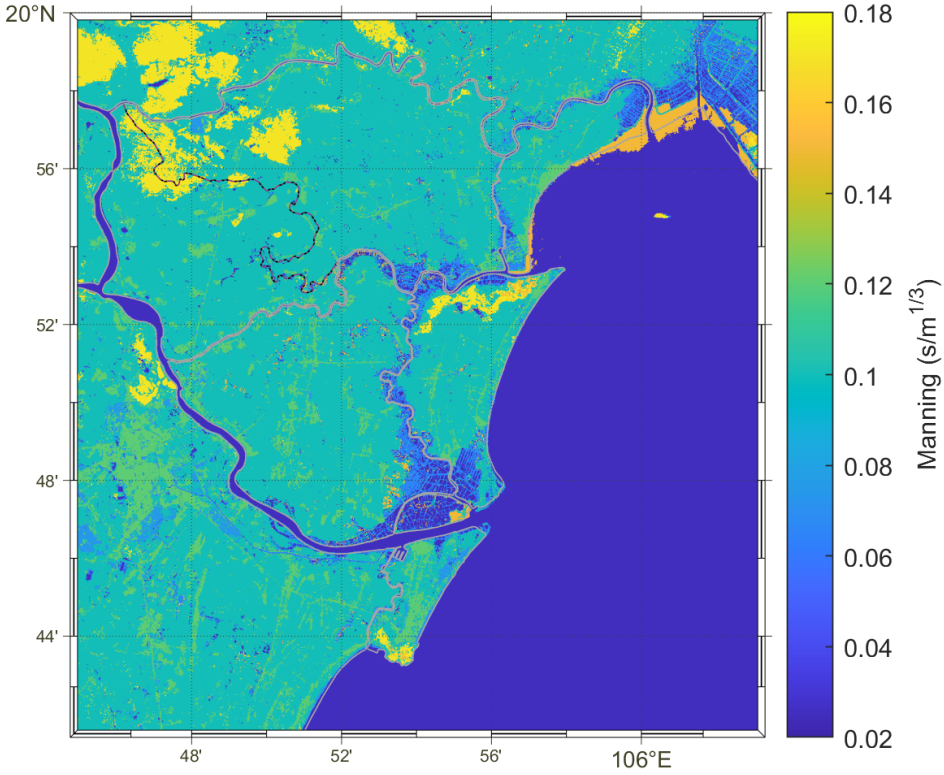
Mã LULC	Mô tả	n
10	Rừng lá rộng rụng	0,17
11	Rừng lá rộng	0,17
12	Rừng lá kim	0,17
13	-	-
14	Cây trồng đồn điền	0,17
15	Rừng ngập mặn	0,15
16	Đất ngập nước nội địa	0,05
17	-	-
18	Mặt nước thoáng	0,025
19	Nuôi trồng thủy sản	0,065
20	Khu vực trồng tre nứa	0,16

Bảng 2.3. Giá trị n áp dụng trong nghiên cứu

Mã LULC	Mô tả	n
1	Khu vực đô thị, dân cư (ĐĐT)	0,12
3	Đất trồng lúa (ĐTL)	0,1
7	Đồng cỏ (ĐĐC)	0,08
8	Đất cằn cỗi (ĐCC)	0,075
10	Rừng lá rộng (RLR)	0,17
15	Rừng ngập mặn (RNM)	0,15
16	Đất ngập nước nội địa (ĐNN)	0,05
18	Mặt nước thoáng (ĐMT)	0,025
19	Nuôi trồng thủy sản (ĐTS)	0,065



(a) Mã sử dụng đất LULC



(b) Số Manning (n)

Hình 2.10. Phân bố mã LULC (a) và số Manning (b) trong miền tính D6

2.5. Phương pháp đánh giá sai số kết quả mô phỏng

Để đánh giá hiệu quả mô phỏng của mô hình, ba chỉ số được sử dụng gồm: hệ số xác định (R^2), sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và sai số bình phương trung bình (RMSE). Các chỉ số này được xác định như sau:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (2.39)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|S_i - O_i| \quad (2.40)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{n}} \quad (2.41)$$

Trong đó: n là tổng số số liệu, S_i là số liệu tính toán, O_i là số liệu thực đo, $\bar{O}$ là giá trị trung bình của số liệu thực đo.

2.6. Tiểu kết Chương 2

Để giải quyết các bài toán đặt ra, Luận án đã xác lập được khung nghiên cứu và phương pháp luận cụ thể:

- Xác định phạm vi nghiên cứu: Từ phạm vi rộng cho đánh giá tương tác thuỷ triều, sóng và nước dâng do bão trên toàn dải ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và phạm vi hẹp hơn để đến đánh giá ngập lụt cho khu vực ven biển cụ thể từ Hậu Lộc - Sầm Sơn (Thanh Hóa).

- Thiết lập được mô hình tích hợp SuWAT với lưới lồng 6 cấp và ứng dụng mô hình cho mô phỏng tương tác phi tuyến hai chiều giữa sóng và nước dâng do bão, tương tác sông - biển. Hệ thống lưới tính lồng 6 cấp (từ 4500 m xuống 20 m) đảm bảo mô phỏng chi tiết ngập lụt khu vực ven biển tỉnh Thanh Hóa.

- Khác biệt với các nghiên cứu trước đây thường sử dụng hệ số nhám hằng số cho toàn miền tính, Luận án đã thiết lập trường hệ số nhám Manning (n) biến đổi theo không gian dựa trên dữ liệu sử dụng đất (LULC) độ phân giải cao 30 m. Việc gán các

giá trị ma sát riêng biệt cho từng loại lớp phủ (đô thị, rừng ngập mặn, đồng lúa, mặt nước...) trên mỗi ô lưới giúp mô phỏng sát thực tế quá trình tiêu tán năng lượng và cản trở dòng chảy khi nước biển tràn vào đất liền, từ đó nâng cao độ tin cậy của kết quả mô phỏng ngập lụt ven biển.

- Dữ liệu địa hình, đê biển tại ven biển Thanh Hoá được cập nhật đến năm 2023.

Luận án sử dụng phương pháp, công nghệ hiện đại, đang phổ biến sử dụng trên thế giới và Việt Nam. Các dữ liệu luận án sử dụng được thu thập từ các nguồn chính thống, đảm bảo độ tin cậy và tính đại diện trong nghiên cứu.

CHƯƠNG 3: ẢNH HƯỞNG CỦA TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC YẾU TỐ THUỶ ĐỘNG LỰC ĐẾN ĐỘ LỚN NƯỚC DÂNG, ĐỘ CAO SÓNG TẠI VEN BỜ TÂY VỊNH BẮC BỘ VÀ NGẬP LỤT TẠI VEN BIỂN TỈNH THANH HÓA

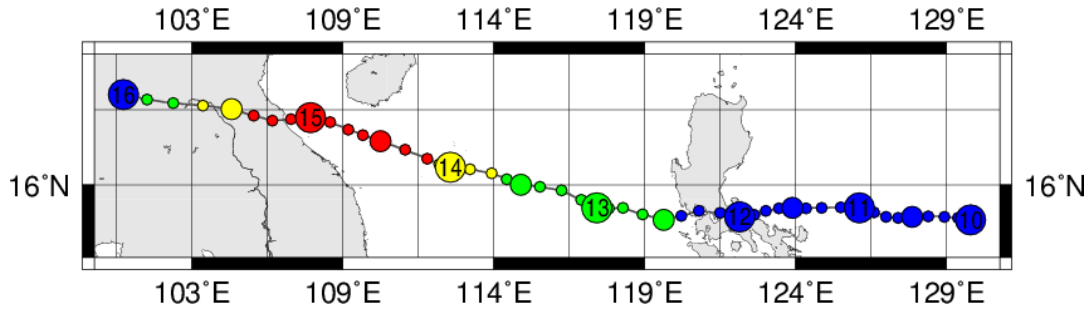
Trong Chương này, trước khi thực hiện mô phỏng và phân tích ảnh hưởng của tương tác giữa các yếu tố thuỷ động lực đến độ lớn nước dâng, độ cao sóng tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa, mô hình sẽ được kiểm định với số liệu quan trắc thủy triều, nước dâng do bão, mực nước tổng hợp và sóng trong bão trong khoảng thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng. Đánh giá ảnh hưởng của tương tác thuỷ triều, sóng và nước dâng do bão tới độ lớn nước dâng và độ cao sóng ở ven biển bờ tây vịnh Bắc Bộ sử dụng quỹ đạo bão Doksuri (9/2017) và tăng/giảm cấp bão nhưng giữ nguyên các tham số bão khác. Ảnh hưởng của các yếu tố thuỷ động lực và dòng chảy sông tới ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa được mô phỏng và phân tích cho trường hợp bão Doksuri (9/2017).

3.1. Kiểm định mô hình tại khu vực nghiên cứu

Mô hình SuWAT đã được hiệu chỉnh và kiểm định với thủy triều, nước dâng do bão và sóng biển tại nhiều khu vực biển tại Việt Nam trong nhiều nghiên cứu [Đỗ Đình Chiến, 2015], [Thuy và cộng sự, 2017], [Thuy và cộng sự, 2020] và [Thai và cộng sự, 2017]. Trong đó, các lưới tính D1-D3 được kế thừa từ các nghiên cứu nêu trên và mô hình SuWAT đã được hiệu chỉnh và kiểm định đối với một số cơn bão tại các trạm thuộc các lưới tính này (Hòn Dấu, Sầm Sơn và Hòn Ngư). Do vậy, trước khi áp dụng mô hình vào đánh giá ảnh hưởng của tương tác thủy triều, sóng và nước dâng do bão tới độ cao nước dâng do bão và sóng tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ, luận án thực hiện kiểm định mô hình trong mô phỏng thủy triều, nước dâng do bão, mực nước tổng hợp và độ cao sóng trong khoảng thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng.

Số liệu quan trắc trong phạm vi bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng được thu thập để so sánh. Bão Doksuri (9/2017) với quỹ đạo như trên hình 2.8c và 3.1, đổ bộ vào ven biển Hà Tĩnh - Quảng Bình tại thời điểm ven bờ tây vịnh Bắc Bộ đang trong kỳ triều cường cao. Bão Doksuri (9/2017) đã gây ra sóng lớn và nước biển dâng cao

làm ngập nhiều tuyến đê biển trên phạm vi không gian rộng suốt từ Hải Phòng đến Nghệ An (hình 3.2). Nước dâng do bão lớn nhất tại Hòn Dấu và Hòn Ngư được xác định từ mực nước quan trắc tại trạm (sau khi tách thủy triều khỏi mực nước tổng hợp) như trên hình 3.3, tương ứng là 0,78 m và 1,0 m.



Hình 3.1. Quỹ đạo của bão Doksuri (9/2017), đổ bộ vào các tỉnh Quảng Bình và Hà Tĩnh [https://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/]

(a) Đê Cát Hải, Hải Phòng
(báo nguoiduatin.vn)

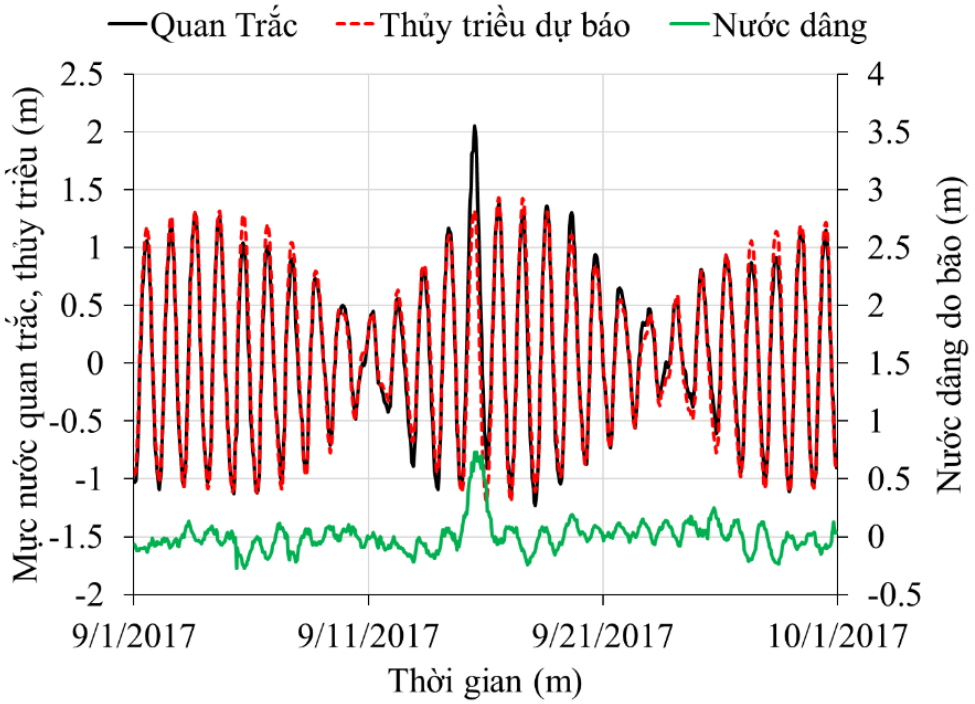
(b) Hải Hậu, Nam Định
(báo nguoiduatin.vn)

(c) Sầm Sơn, Thanh Hóa
(báo tienphong.vn)

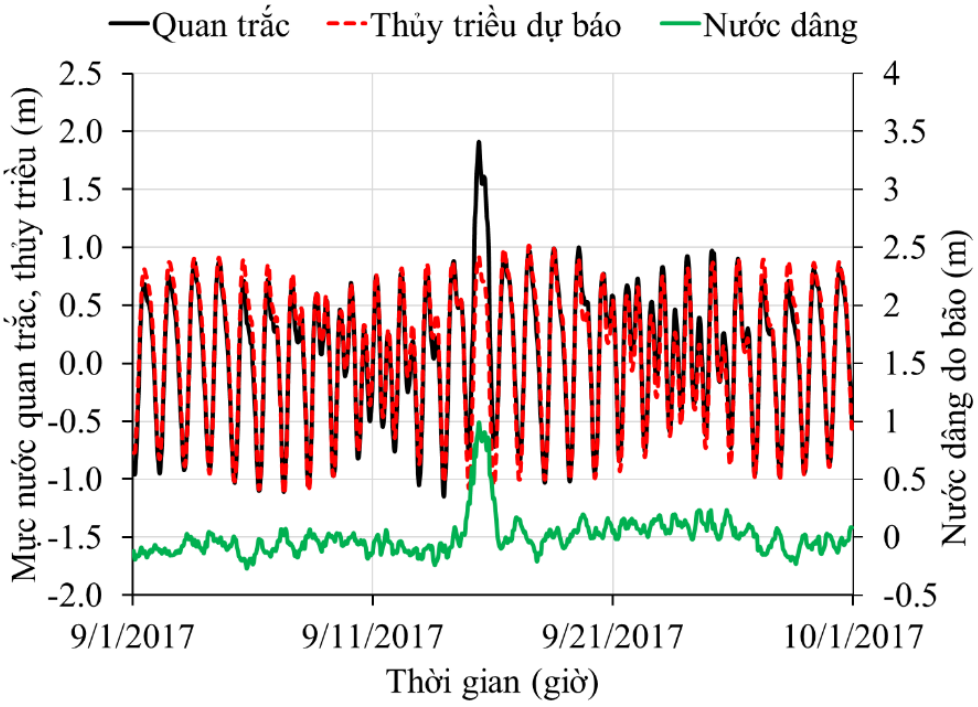
(d) Cửa Lò, Nghệ An
(báo tienphong.vn)

Hình 3.2. Ảnh chụp ngập lụt do nước dâng và sóng lớn trong bão Doksuri (9/2017): (a) tại Cát Hải, Hải Phòng, (b) tại Hải Hậu, Nam Định, (c) tại Sầm Sơn, Thanh Hóa và (d) tại Cửa Lò, Nghệ An

((a), (b): https://www.nguoiduatin.vn/anh-huong-cua-bao-so-10-cac-tinh-duyen-hai-bac-bo-ngap-lut-204339095.htm; (c), (d): https://tienphong.vn/bao-so-10-can-quet-mien-trung-it-nhat-4-nguoi-chet-post976535.tpo)



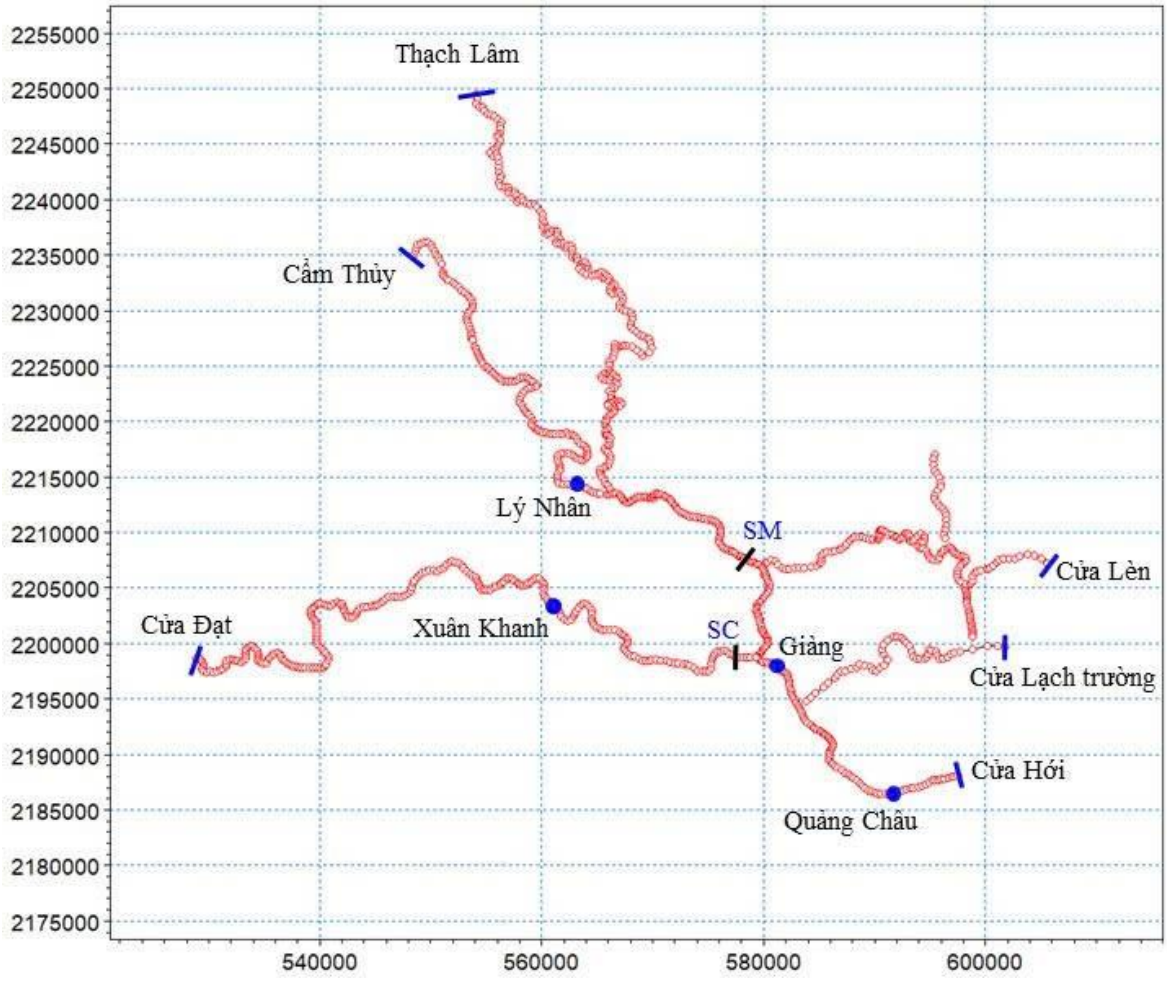
(a) Hòn Dấu



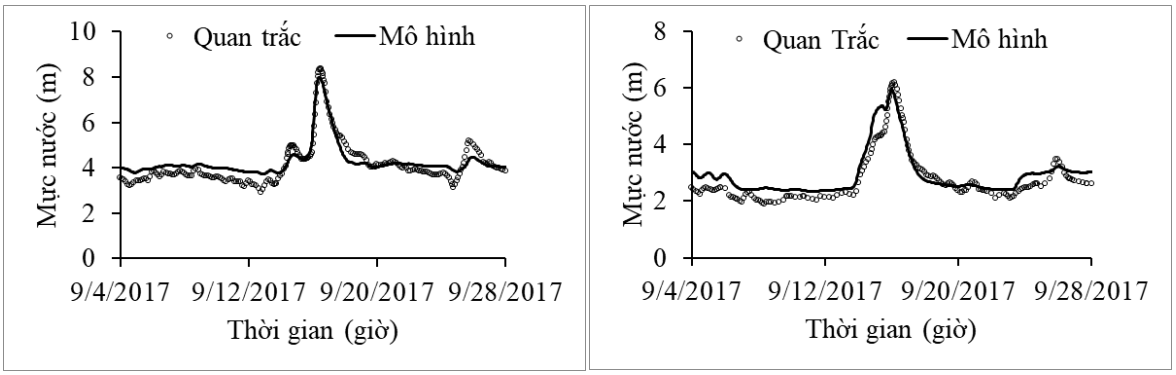
(b) Hòn Ngư

Hình 3.3. Dao động mực nước quan trắc, thủy triều và nước dâng tại Hòn Dấu (a) và Hòn Ngư (b) trong cơn bão Doksuri (9/2017).

Đối với biên sông, kế thừa kết quả nghiên cứu của Dự án cấp Bộ Tài Nguyên và Môi trường "Phân vùng rủi ro thiên tai và lập bản đồ cảnh báo lũ ngập lụt" (như đã giới thiệu tại Mục 2.3.4, Chương 2), luận án sử dụng mô hình MIKE 11 của dự án để tính toán lưu lượng nước tại hai vị trí SM trên sông Mã và SC trên sông Chu (hình 2.8f và hình 3.4), làm điều kiện biên sông cho mô hình SuWAT. Kết quả mô phỏng của mô hình MIKE 11 được kiểm nghiệm lại với mực nước quan trắc tại hai trạm thủy văn Lý Nhân (sông Mã) và Xuân Khanh (sông Chu) trong thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng như thể hiện trên hình 3.5. Trong đó, vị trí hai trạm này được thể hiện trên hình 2.1 (a) và hình 3.4. Kết quả kiểm nghiệm cho thấy mô hình MIKE 11 có đủ độ tin cậy để tính toán lưu lượng nước làm điều kiện biên cho mô hình SuWAT.



Hình 3.4. sơ đồ mạng lưới sông Mã và sông Chu



(a) Lý Nhân (b) Xuân Khanh

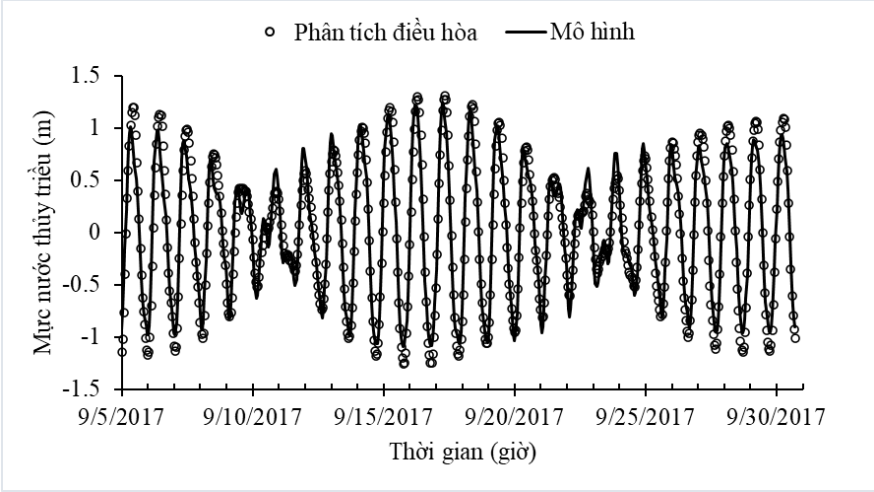
Hình 3.5. So sánh mực nước tại các trạm thủy văn Lý Nhân (a) và Xuân Khanh (b) trong thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng

a) Kiểm định với thủy triều

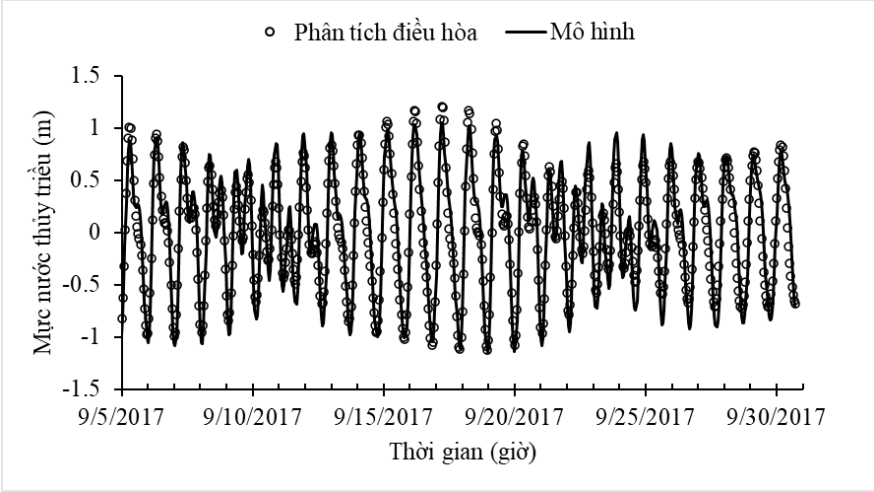
Luận án sử dụng số liệu thủy triều dự tính từ các hằng số điều hòa tại trạm hải văn Hòn Dấu, Sầm Sơn và Hòn Ngư để kiểm định mô hình SuWAT trong mô phỏng thủy triều. Bộ hằng số điều hòa được tính từ chuỗi quan trắc mực nước liên tục nhiều năm tại ba trạm hải văn nói trên do ngành Khí tượng thủy văn quản lý, do vậy có độ tin cậy cao.

Trong mô hình, hệ số nhám được sử dụng để hiệu chỉnh kết quả tính toán. Mô hình cho phép sử dụng hệ số nhám là hằng số trên toàn bộ miền tính hoặc biến đổi theo không gian. Mô hình cũng cho phép các lưới khác nhau có thể sử dụng những hệ số nhám khác nhau. Để kiểm chứng mô hình, luận án sử dụng hệ số nhám là hằng số, n=0,02, đối với các miền tính từ D1 đến D3. Các miền tính còn lại từ D4 đến D6 sử dụng hệ số nhám biến đổi theo không gian như được mô tả trong mục 2.4.3.

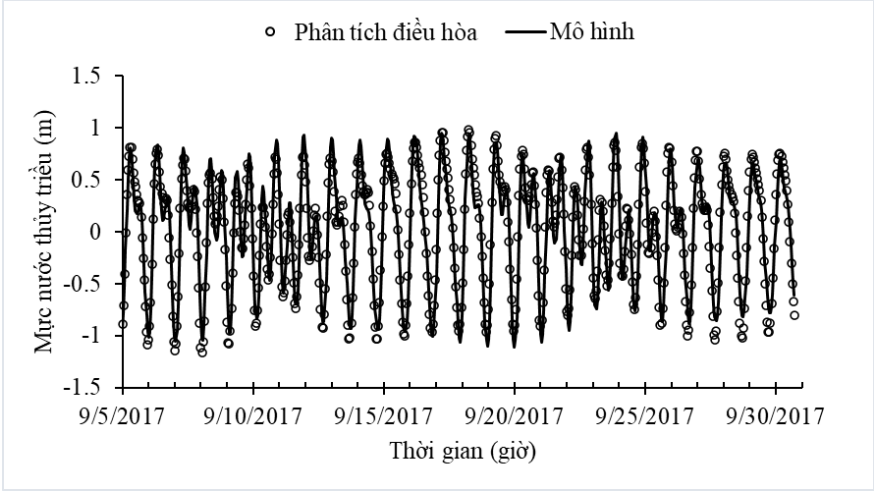
Kết quả kiểm nghiệm trên hình 3.6 và thống kê sai số trên bảng 3.1 cho thấy mô hình SuWAT mô phỏng thủy triều khá tốt tại 3 trạm hải văn trong khu vực. Lưu ý rằng, dữ liệu thủy triều trên hình 3.6 cũng như các dữ liệu về mực nước tổng hợp để phân tích, so sánh ở những nội dung dưới đây đã được quy về mốc quốc gia.



(a) Hòn Dấu



(b) Sầm Sơn



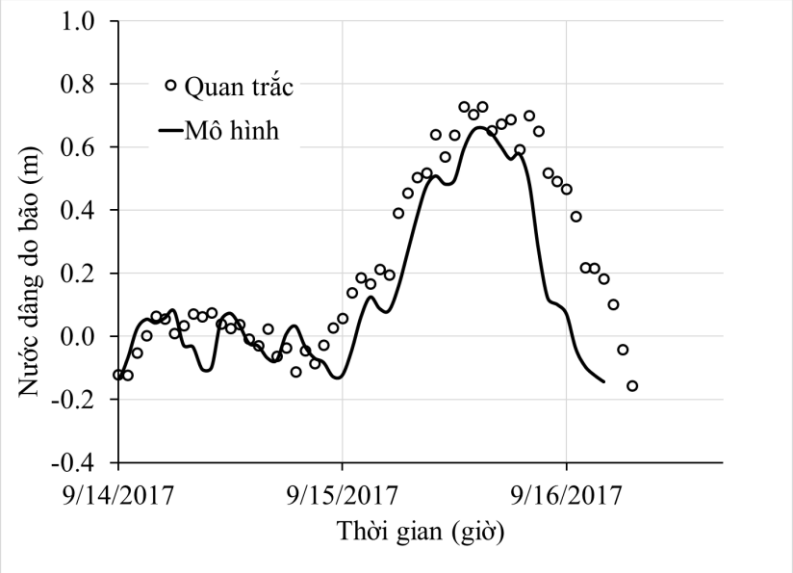
(c) Hòn Ngư

Hình 3.6. So sánh mực nước thủy triều mô phỏng từ mô hình SuWAT và phân tích điều hòa tại trạm Hòn Dấu (a), Sầm Sơn (b) và Hòn Ngư (c) tháng 9/2017

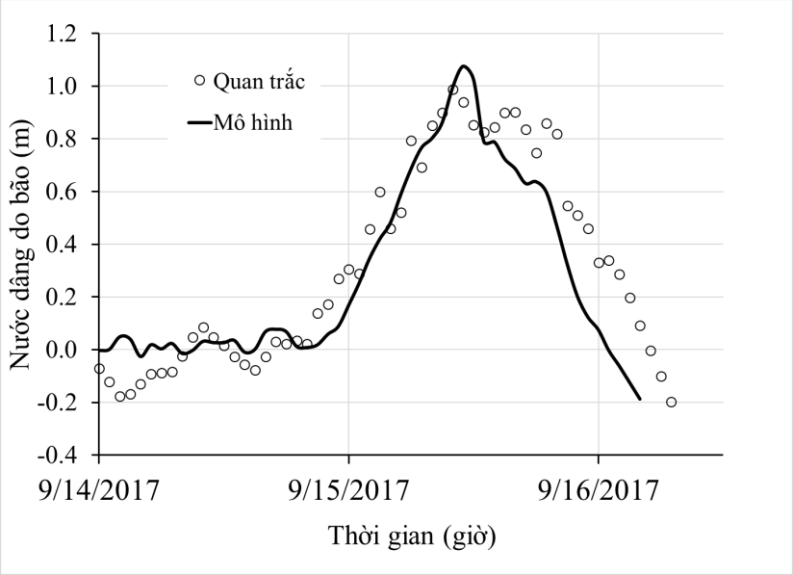
b) Kiểm định mô hình với nước dâng do bão và mực nước tổng cộng

Trên hình 3.7a-b thể hiện so sánh giữa kết quả tính toán với số liệu quan trắc nước dâng do bão tại trạm Hòn Dấu và Hòn Ngư trong thời gian bão Doksuri ảnh hưởng. Luận án không lấy số liệu tại trạm Sầm Sơn để kiểm định mô hình nước dâng và mực nước tổng cộng do tại đây quan trắc mực nước chỉ thực hiện 04 lần/ngày (vào 01, 07, 13, 19 giờ) và thực hiện bằng mắt trên thước ngắm nên chất lượng có nhiều hạn chế nhất là trong trường hợp có bão ảnh hưởng.

Sai số giữa kết quả mô phỏng và quan trắc thể hiện trên bảng 3.1. Đánh giá chung cho thấy mô hình mô phỏng khá tốt diễn biến nước dâng do bão với sai số đỉnh nước dâng tại 2 trạm dưới 0,2 m. So sánh diễn biến trên hình 3.7a-b cho thấy nước dâng tính toán có xu hướng thiên thấp từ sau ngày 14 tháng 9 năm 2017, ngoại trừ khu vực xung quanh đỉnh nước dâng tại trạm Hòn Ngư. Nguyên nhân có thể do nước dâng do sóng chưa được tính toán đầy đủ trên lưới tính còn thô do hiện tượng sóng vỡ chưa được mô phỏng đầy đủ trên lưới tính có độ phân giải 500 x 500 m. Điều này cũng đã được đề cập trong một số nghiên cứu trước đó, khi đánh giá ảnh hưởng của độ phân giải lưới tính tới ứng suất bức xạ do sóng [Kim và cộng sự, 2010], [Thái và cộng sự, 2017)].



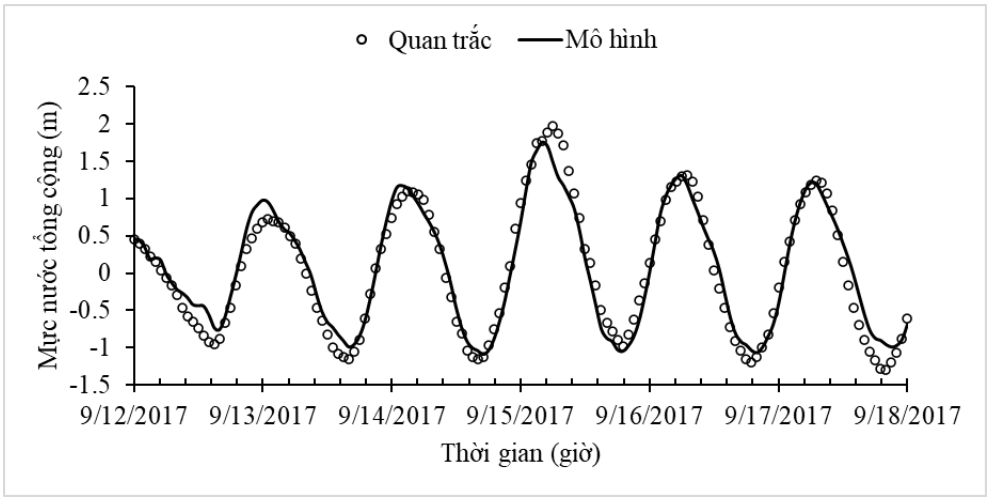
(a) Hòn Dấu



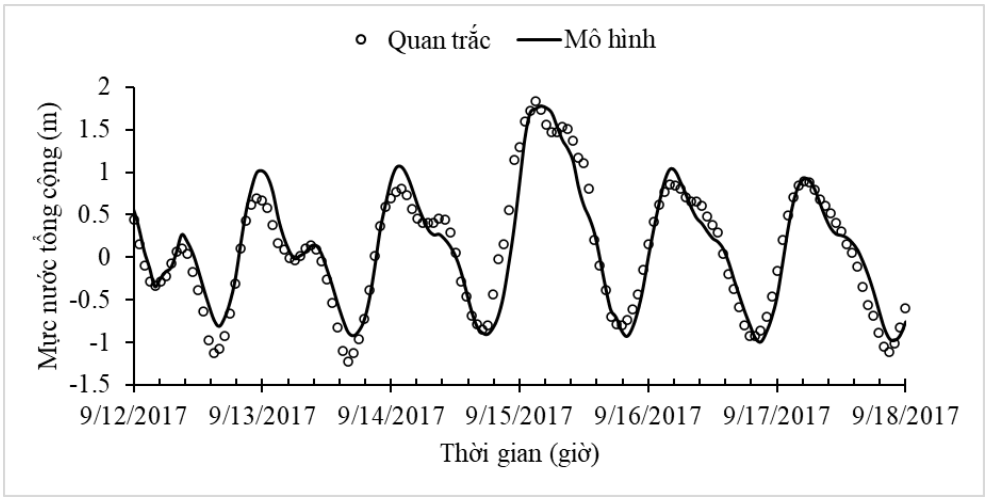
(b) Hòn Ngư

Hình 3.7. So sánh nước dâng do bão tính toán bằng mô hình couple nước dâng và sóng tại Hòn Dấu (a) và Hòn Ngư (b) trong bão Doksuri (9/2017).

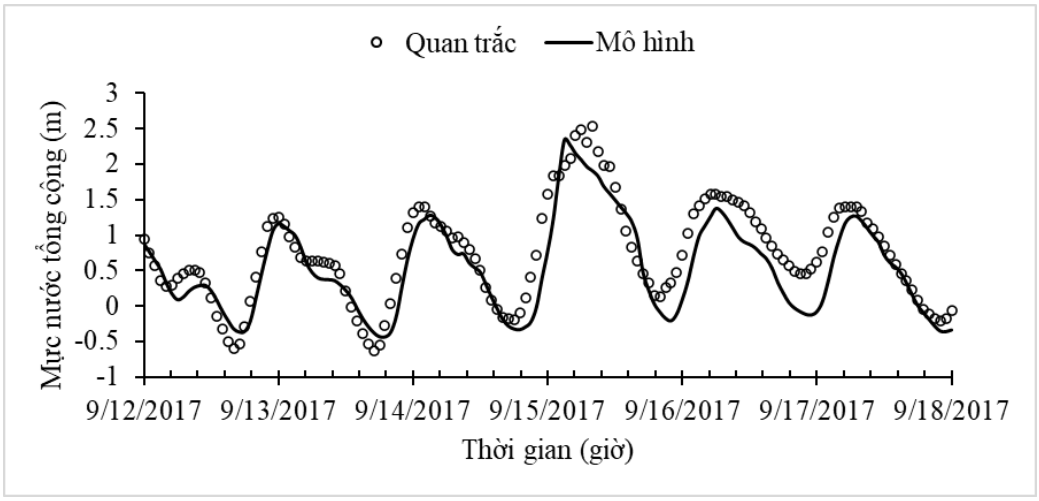
Trên hình 3.8(a) và (b) thể hiện sự so sánh giữa kết quả tính toán từ mô hình với số liệu quan trắc mực nước tổng hợp tại trạm Hòn Dấu, Hòn Ngư và trạm thủy văn cửa sông Quảng Châu trên sông Mã trong thời gian bão Doksuri (2017) ảnh hưởng. Tại Hòn Dấu và Hòn Ngư, do mô phỏng thủy triều và nước dâng do bão (trên hình 3.6 và 3.7) tương đối sát với thực tế nên kết quả mô phỏng mực nước tổng hợp cũng khá tốt so với số liệu quan trắc. Với trạm Quảng Châu (hình 3.8c), sai số về thời gian mực nước đạt đỉnh và giá trị lớn nhất của mực nước tương ứng là 3 giờ và 0,2 m. Sự lệch pha của đỉnh mực nước chủ yếu do hai nguyên nhân sau: lưu lượng đầu vào mô hình có thể bị ước lượng thấp hơn so với thực tế và việc làm trơn lòng sông từ quá trình nội suy số liệu, dẫn đến nước dâng và sóng truyền vào trong sông nhanh hơn. Ngoài ra, mực nước tại trạm cửa sông Quảng Châu còn bị chi phối bởi sự tương tác phức tạp giữa sông và biển. Trong nghiên cứu này, điều kiện biên sông được áp đặt bằng lưu lượng theo thời gian, đây là tác động một chiều của sông đến các yếu tố động lực biển. Điều này đã bỏ qua sự phản hồi từ nước dâng, sóng đến dòng chảy sông. Đây là một hạn chế như đã được đề cập trong nghiên cứu của [Zhang và cộng sự, 2020]. Chi tiết về các sai số thể hiện trên bảng 3.1.



(a) Hòn Dấu



(b) Hòn Ngư



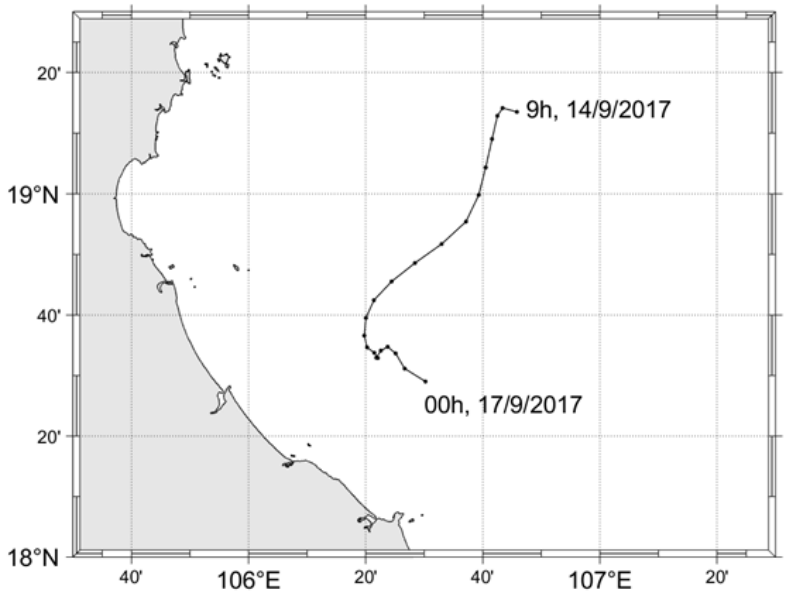
(c) Quảng Châu

Hình 3.8. So sánh mực nước tổng cộng trong bão Doksuri (9/2017): (a) Hòn Dấu, (b) Hòn Ngư và (c) Quảng Châu

c) Kiểm nghiệm với sóng

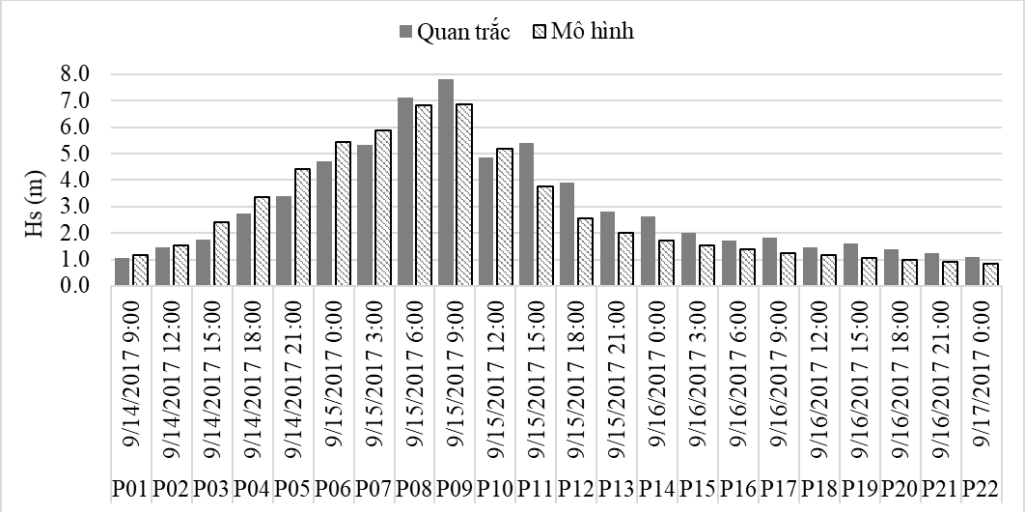
Để kiểm định mô hình SuWAT trong mô phỏng độ cao sóng trong thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng, số liệu quan trắc tại trạm Hòn Ngư và phao trôi (SIO) di chuyển ngoài khơi Bắc Trung Bộ trong thời gian bão Doksuri ảnh hưởng được thu thập để so sánh (hình 3.9).

Trên hình 3.10 và 3.11 thể hiện so sánh kết quả tính độ cao sóng có nghĩa (H_s) từ mô hình với số liệu quan trắc từ phao SIO và tại trạm Hòn Ngư. Sai số giữa tính toán và mô phỏng thể hiện trên bảng 3.1, cho thấy mô hình SuWAT mô phỏng khá tốt sự biến đổi độ cao sóng có nghĩa trong bão Doksuri (9/2017).

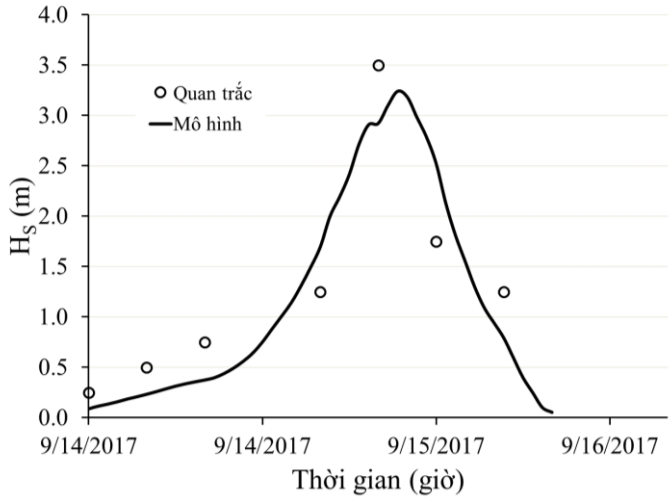


Thời gian	Điểm	Kinh độ	Vĩ độ	Thời gian	Điểm	Kinh độ	Vĩ độ
9/14/2017 9:00	P01	106.76389	19.22507	9/14/2017 18:00	P12	106.33406	18.65877
9/14/2017 12:00	P02	106.72327	19.23567	9/14/2017 21:00	P13	106.32944	18.60995
9/14/2017 15:00	P03	106.70840	19.21423	9/15/2017 0:00	P14	106.33754	18.57753
9/14/2017 18:00	P04	106.69322	19.15062	9/15/2017 3:00	P15	106.35778	18.56274
9/14/2017 21:00	P05	106.67507	19.07239	9/15/2017 6:00	P16	106.36808	18.54833
9/15/2017 0:00	P06	106.65524	18.99683	9/15/2017 9:00	P17	106.36353	18.54915
9/15/2017 3:00	P07	106.61893	18.92365	9/15/2017 12:00	P18	106.37667	18.56874
9/15/2017 6:00	P08	106.54951	18.86193	9/15/2017 15:00	P19	106.39600	18.57912
9/15/2017 9:00	P09	106.47365	18.80975	9/15/2017 18:00	P20	106.41882	18.56093
9/15/2017 12:00	P10	106.40719	18.75905	9/15/2017 21:00	P21	106.44435	18.51939
9/15/2017 15:00	P11	106.35680	18.70745	9/16/2017 0:00	P22	106.50366	18.48362

Hình 3.9. Vị trí quỹ đạo phao SIO trong thời gian bão Doksuri 2017 (9/2017)



Hình 3.10. So sánh độ cao sóng có nghĩa tính từ mô hình với quan trắc trong bão Doksuri 2017 từ phao SIO



Hình 3.11. So sánh độ cao sóng có nghĩa tính từ mô hình và quan trắc trong bão Doksuri (9/2017) tại trạm Hòn Ngư

Các chỉ số thống kê trong Bảng 3.1 cho thấy, R^2 đạt mức cao đối với cả thủy triều (0,91 - 0,94), mực nước tổng cộng (0,89 - 0,94) và sóng biển (0,94 - 0,95), cho thấy mô hình tái hiện khá tốt cả mực nước và sóng. Đối với nước dâng do bão, R^2 đạt giá trị thấp hơn (0,71 - 0,78) nhưng vẫn ở mức khá tốt. Các chỉ số MAE từ 0,12-0,25 đối với thủy triều, nước dâng do bão và mực nước tổng cộng, 0,17-0,53 đối với sóng. Sai số này là nhỏ so với độ lớn của các yếu tố, ngoài trừ nước dâng do bão (vượt quá 10%). Các chỉ số RMSE có sự chênh lệch nhỏ so với MAE tương ứng, chứng tỏ kết

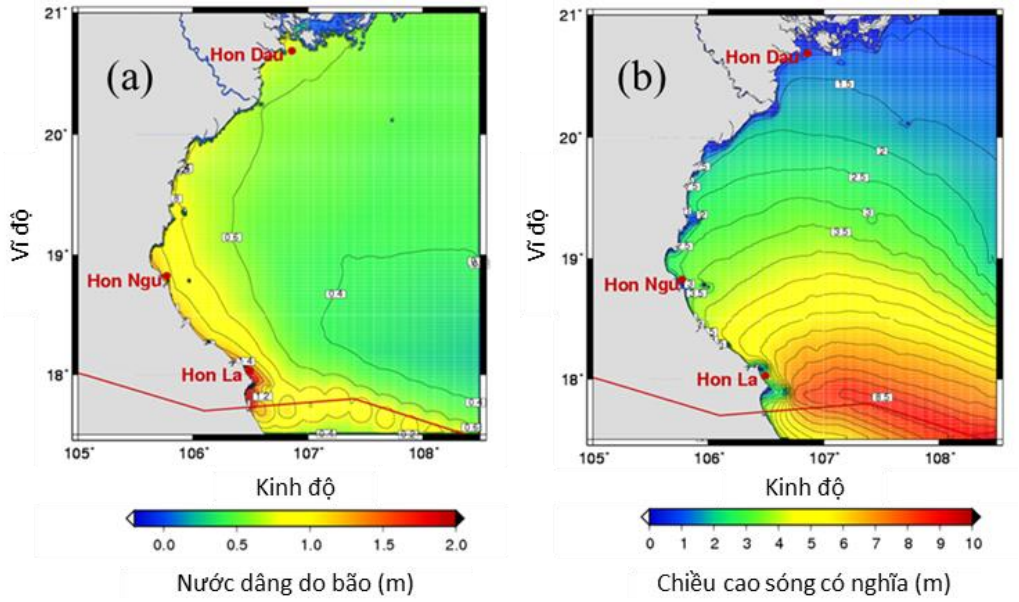
quả mô hình ổn định, không xuất hiện các giá trị sai số cực đoan.

Nhìn chung, kết quả mô hình thiên thấp so với thực đo. Ngoài các nguyên nhân đã phân tích ở trên, có thể liên quan đến độ phân giải của trường gió, áp đầu vào là 0,25 độ, chưa phản ánh đúng phân bố không gian của trường gió, áp trong thực tế, nhất là khu vực gió mạnh trong bão.

Bảng 3.1. Các chỉ số đánh giá mô hình

Yếu tố	**Tên Trạm**	**R^2**	**MAE (m)**	**RMSE (m)**
Thủy triều	Hòn Dấu	0,94	0,13	0,16
	Sầm Sơn	0,91	0,13	0,16
	Hòn Ngư	0,91	0,14	0,17
Nước dâng do bão	Hòn Dấu	0,71	0,13	0,16
	Hòn Ngư	0,78	0,12	0,14
Mực nước tổng hợp	Hòn Dấu	0,94	0,17	0,20
	Hòn Ngư	0,90	0,18	0,23
	Quảng Châu	0,89	0,25	0,31
Sóng biển	Hòn Ngư	0,94	0,17	0,20
	Phao SIO	0,95	0,53	0,79

Về phân bố theo không gian của nước dâng do bão lớn nhất và độ cao sóng có nghĩa lớn nhất, kết quả mô phỏng thể hiện trong hình 3.12 cho thấy sự phù hợp với diễn biến thực tế. Nước dâng lớn nhất đạt khoảng 2,0 m ở các vùng ven biển gần trạm Hòn La và giảm dần về phía bờ biển phía bắc, nơi có trạm Hòn Dấu. Phân bố không gian của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất cũng có cùng xu hướng, từ 4,0 m gần Hòn La đến dưới 1,0 m gần Hòn Dấu.



Hình 3.12. Phân bố không gian của nước dâng do bão lớn nhất (a) và độ cao sóng có nghĩa lớn nhất (b) trong cơn bão Doksuri (9/2017), được tính bằng mô hình kết hợp nước dâng và sóng.

Các so sánh và đánh giá ở trên cho thấy mô hình SuWAT đã mô phỏng tương đối tốt diễn biến thủy triều, nước dâng do bão, mực nước tổng hợp và độ cao sóng tại khu vực nghiên cứu trong thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng.

Nội dung tiếp theo của luận án sẽ trình bày về tương tác giữa các yếu tố thủy động lực ở khu vực ven bờ trong điều kiện bão và ảnh hưởng của chúng đến ngập lụt ven biển.

3.2. Ảnh hưởng của tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão tới độ lớn nước dâng và độ cao sóng ở ven bờ tây vịnh Bắc Bộ

Các nghiên cứu trước đây chủ yếu thảo luận về tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão cho trường hợp với cơn bão lịch sử cụ thể [Nguyễn Bá Thủy và cộng sự, 2016], [Thuy và cộng sự, 2017], [Thuy và cộng sự, 2020], [Đỗ Đình Chiến, 2015] và [Thai và cộng sự, 2017]. Do vậy, đánh giá tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão tới độ cao nước dâng và sóng trong bão cần thiết được đánh giá đầy đủ hơn, đặc biệt là trong bối cảnh biến đổi khí hậu, có thể có bão mạnh/siêu bão xuất hiện trong tương lai như báo cáo của IPCC [IPCC, 2023].

Cụ thể, một số vấn đề cần được thảo luận thêm: (1) Tương tác giữa sóng và nước dâng do bão, đặc biệt là đối với siêu bão, diễn ra như thế nào? (2) Độ cao của sóng và nước dâng do bão thay đổi như thế nào nếu bão đổ bộ vào khu vực có biên độ thủy triều cao?

Để giải quyết những câu hỏi đó, trong chương này sẽ tập trung đánh giá tương tác giữa sóng và nước dâng do bão đối với các cấp bão đổ bộ vào các pha thủy triều: triều thấp, trung bình và triều cao ở ven bờ tây vịnh Bắc Bộ thông qua một loạt các kịch bản mô phỏng sử dụng quỹ đạo bão Doksuri (2017), là quỹ đạo điển hình gây ra nước dâng do bão cao trên phạm vi rộng trong khu vực nghiên cứu. Trong các kịch bản mô phỏng, cường độ bão được thay đổi lên đến cấp siêu bão tại thời điểm trước khi bão đổ bộ (hình 3.13), trong khi các tham số khác của bão Doksuri (9/2017) được giữ cố định.

3.2.1. Các kịch bản mô phỏng

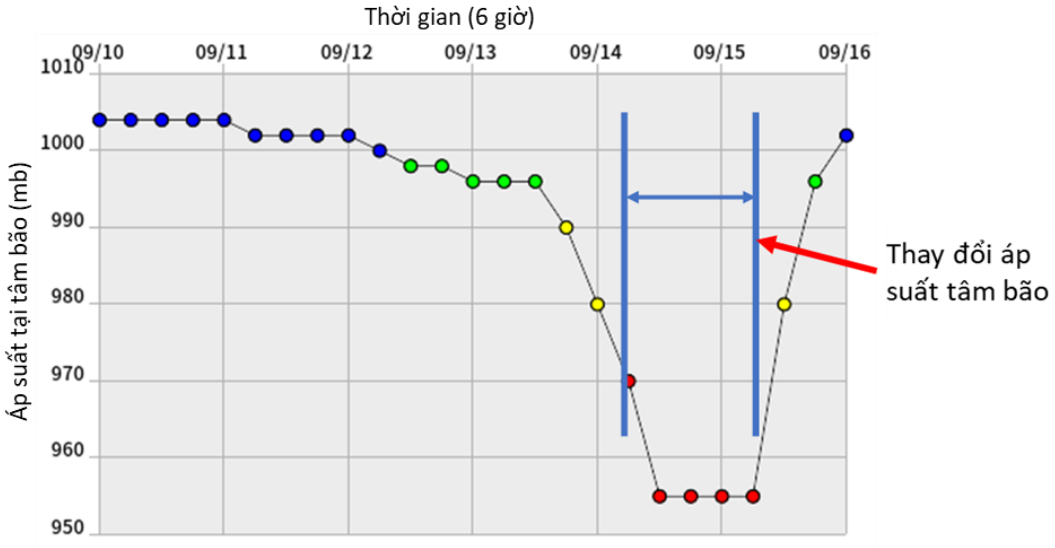
3.2.1.1. Kịch bản về cường độ bão

Kịch bản về cường độ bão được thiết kế như trên bảng 3.2, với 9 kịch bản về sự thay đổi khí áp tại tâm bão ở giai đoạn như trên hình 3.13, trong đó kịch bản số 5 (EXP05) là trường hợp bão Doksuri (9/2017) thật.

Các kịch bản về tăng/giảm cấp bão được thiết lập theo tăng/giảm khí áp tại tâm bão của bão Doksuri (9/2017) với bước 10 hPa trong khoảng thời gian từ 06:00 ngày 14 đến 06:00 ngày 15 tháng 9 năm 2017. Các khoảng thay đổi áp 6 hPa và 5 hPa được thực hiện lần lượt vào lúc 12:00 và 18:00 ngày 15/9. Ví dụ, trong kịch bản Exp02, độ giảm khí áp tâm bão là 28 hPa, từ 58 hPa của bão Doksuri (9/2017) (955 hPa) trong khoảng thời gian từ lúc 06:00 ngày 14 đến 06:00 ngày 15 tháng 9 năm 2017, trong khi trong Exp08 (siêu bão), tốc độ này thay đổi thành 88 hPa. Theo cách này, các kịch bản về cấp bão được tạo ra. Ngoại trừ thay đổi khí áp tại tâm bão, các tham số khác của bão Doksuri được giữ nguyên.

Như vậy, theo thang cấp gió Beaufort trong Quyết định số 18/2021/QĐ-TTg, các kịch bản bão sẽ ứng với các cấp bão như sau: Exp01 (cấp 9) và Exp02 (cấp 10)

sẽ tương đương với bão nhiệt đới; kịch bản Exp03 (cấp 11), Exp04 (cấp 12) và Exp05 (cấp 13) là bão nhiệt đới mạnh; kịch bản Exp06 (cấp 14) và Exp07 (cấp 15) là bão nhiệt đới rất mạnh và Exp08 (cấp 16) và Exp09 (cấp 17) tương đương với cấp siêu bão.



Hình 3.13. Áp suất tâm bão Doksuri và minh hoạ khoảng thời gian thay đổi khí áp tâm bão (thời gian trước khi bão Doksuri (9/2017) đổ bộ vào các tỉnh Quảng Trị và Hà Tĩnh) [https://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/].

Bảng 3.2. Danh sách kịch bản về cấp bão thực hiện mô phỏng

Thời gian	Tốc độ giảm áp suất tại tâm (hPa)								
	Exp01	Exp02	Exp03	Exp04	Exp05	Exp06	Exp07	Exp08	Exp09
	Cấp 9	Cấp 10	Cấp 11	Cấp 12	Cấp 13	Cấp 14	Cấp 15	Cấp 16	Cấp 17
	Bão		Bão mạnh			Bão rất mạnh		Siêu bão	
2017/9/ 13/00:00	17	17	17	17	17 (996)	17	17	17	17
2017/9/ 13/06:00	17	17	17	17	17 (996)	17	17	17	17
2017/9/ 13/12:00	17	17	17	17	17 (996)	17	17	17	17
2017/9/ 13/18:00	23	23	23	23	23 (990)	23	23	23	23
2017/9/ 14/00:00	23	33	33	33	33 (980)	33	33	33	33

Thời gian	Tốc độ giảm áp suất tại tâm (hPa)								
	Exp01	Exp02	Exp03	Exp04	Exp05	Exp06	Exp07	Exp08	Exp09
	Cấp 9	Cấp 10	Cấp 11	Cấp 12	Cấp 13	Cấp 14	Cấp 15	Cấp 16	Cấp 17
	Bão		Bão mạnh			Bão rất mạnh		Siêu bão	
2017/9/ 14/06:00	18	28	36	36	43 (970)	50	58	65	73
2017/9/ 14/12:00	18	28	38	48	58 (955)	68	78	88	98
2017/9/ 14/18:00	18	28	38	48	58 (955)	68	78	88	98
2017/9/ 15/00:00	18	28	38	48	58 (955)	68	78	88	98
2017/9/ 15/06:00	18	28	38	48	58 (955)	68	78	88	98
2017/9/ 15/12:00	9	15	21	27	33 (980)	39	44	50	56
2017/9/ 15/18:00	0	0	7	12	17 (996)	22	27	33	38

Ghi chú: Exp05: Kịch bản Bão Doksuri (9/2017)

3.2.1.2. Kịch bản về phương pháp mô phỏng

Toàn bộ 09 kịch bản về cấp bão được tạo ra như trên sẽ được sử dụng để mô phỏng nước dâng và sóng trong bão với phương án mô hình có và không tích hợp (không xét tới) mô phỏng với sóng (khi mô phỏng nước dâng do bão) và nước dâng do bão (khi mô phỏng sóng trong bão), và được thực hiện trong cho cả 03 pha thủy triều thấp, trung bình và cao. Trong trường hợp mô hình không xét tới ảnh hưởng của sóng, tham số C_D của Honda và Mitsuyasu (1980) trong công thức (2.15) được sử dụng, trong trường hợp có tích hợp với sóng, tham số C_D phụ thuộc vào sóng trong Công thức (2.16) và ứng suất bức xạ do sóng tính từ các công thức (2.11) đến (2.13) được sử dụng. Ảnh hưởng của tương tác giữa nước dâng và sóng trong các pha thủy triều khác nhau được kiểm tra tại ba vị trí Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La, vị trí của ba trạm này được thể hiện trên hình 2.8c. Việc lựa chọn Hòn Dấu (Bắc Bộ), Hòn Ngư và Hòn La (Bắc Trung Bộ) để đại diện cho khu vực có biên độ thuỷ triều, địa hình và hình dạng đường bờ khác nhau và có chênh lệch về độ lớn nước dâng với quỹ đạo

bão được lựa chọn, trong đó Hòn La có nước dâng lớn nhất do nằm gần vị trí tâm bão đổ bộ. Thông tin về các phương án tính, kết quả với ký hiệu cụ thể như sau:

Độ cao nước dâng do bão và độ cao sóng có nghĩa trong các thí nghiệm số được quy ước như sau:

- Nước dâng do bão (η_{p+wd+r}): Được mô phỏng bằng mô hình tích hợp, có xét đến tương tác nước dâng và sóng. Trong đó, nước dâng được gây bởi độ giảm khí áp trong bão (p), ứng suất gió ước tính theo lực cản phụ thuộc vào gió và sóng (wd) và lực sóng do ứng suất bức xạ do sóng gây ra (r).
- Nước dâng do bão (η_{p+w}): Được mô phỏng bằng mô hình không tích hợp, bỏ qua tương tác nước dâng và sóng, chỉ xét đến sự giảm áp suất (p) và ứng suất gió tính theo lực cản Honda-Mitsuyasu (w)
- Chênh lệch nước dâng do hiệu ứng sóng = η_{p+wd+r} - η_{p+w}.
- Độ cao sóng có nghĩa ($Hs_{coupled}$): mô phỏng bằng mô hình kết hợp, có xét đến sự tương tác của nước dâng và sóng.
- Độ cao sóng có nghĩa ($Hs_{uncoupled}$): mô phỏng bằng mô hình không tích hợp, bỏ qua tương tác của nước dâng và sóng.
- Chênh lệch độ cao sóng có nghĩa do hiệu ứng nước dâng = $Hs_{coupled}$ - $Hs_{uncoupled}$.

Để xem xét ảnh hưởng của pha thủy triều đến nước dâng do bão, mô hình kết hợp và không kết hợp đã tính đến mực nước thủy triều thấp, trung bình và cao.

3.2.2. Ảnh hưởng của pha thủy triều đến nước dâng và sóng trong bão

3.2.3.1. Ảnh hưởng của pha thủy triều đến nước dâng do bão

Để nghiên cứu ảnh hưởng của thủy triều đến độ cao của sóng và nước dâng do bão trong khu vực nghiên cứu, 54 kịch bản mô phỏng đã được thực hiện cho 9 cấp bão đổ bộ (bảng 3.2) vào đất liền ở ba pha thủy triều: thủy triều thấp, thủy triều trung bình và thủy triều cao. Trong đó, bao gồm 27 kịch bản sử dụng mô hình tích hợp nước dâng và sóng và 27 kịch bản sử dụng mô hình không tích hợp nước dâng và sóng.

Hình 3.14 thể hiện diễn biến theo thời gian của độ cao nước dâng tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La đối với kịch bản Exp09, tương ứng với siêu bão đổ bộ vào đất liền ở ba pha thủy triều. Có thể thấy rằng, ở cả ba vị trí nước dâng do bão cao nhất ở pha thủy triều thấp và thấp nhất ở pha thủy triều cao. Nguyên nhân là do mối quan hệ nghịch đảo giữa độ sâu của nước và mực nước dâng do gió: khi độ sâu của nước nông hơn, hiệu ứng sóng dài trong vùng nước nông ven bờ sẽ làm mực nước tăng lên trong điều kiện gió không đổi và ngược lại (ví dụ: Kim và cộng sự, 2008). Nước dâng lớn nhất trong pha thủy triều thấp lần lượt là 1,29 m, 2,32 m và 4,28 m tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La. Vào thời điểm đó, kịch bản bão Exp09 tạo ra tốc độ gió ở độ cao 10m trên bề mặt biển tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La, tương ứng lần lượt là 14,1 m/s, 28,3 m/s và 40,5 m/s. Sự khác biệt của nước dâng lớn nhất trong pha thủy triều trung bình so với pha thủy triều cao là 0,02 m, 0,16 m và 0,32 m tương ứng tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La. Sự khác biệt này trong pha thủy triều thấp so với pha thủy triều cao là 0,05 m, 0,33 m và 0,64 m tương ứng tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La, lớn hơn so với pha thủy triều trung bình. Trên hình 3.15 thể hiện phân bố không gian của chênh lệch nước dâng lớn nhất trong kịch bản mô phỏng bão Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều thấp và pha thủy triều cao. Mức chênh lệch cao nhất ở xung quanh Hòn La (gần vị trí bão đổ bộ) và giảm dần về phía Hòn Dấu, nơi độ cao nước dâng thấp hơn.

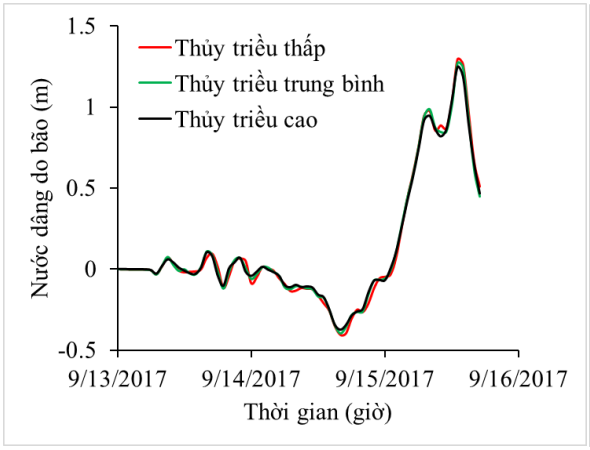
Để xem xét ảnh hưởng của pha thủy triều tới nước dâng do bão, luận án đã tính toán sự chênh lệch của nước dâng lớn nhất trong các kịch bản mô phỏng, kết quả thể hiện trên hình 3.16, trong đó:

- "PS(HT)-PS(MT)": Nước dâng lớn nhất trong pha thủy triều cao trừ đi nước dâng lớn nhất trong pha thủy triều trung bình.
- "PS(LT)-PS(MT)": Nước dâng lớn nhất trong pha thủy triều thấp trừ đi nước dâng lớn nhất trong pha thủy triều trung bình.

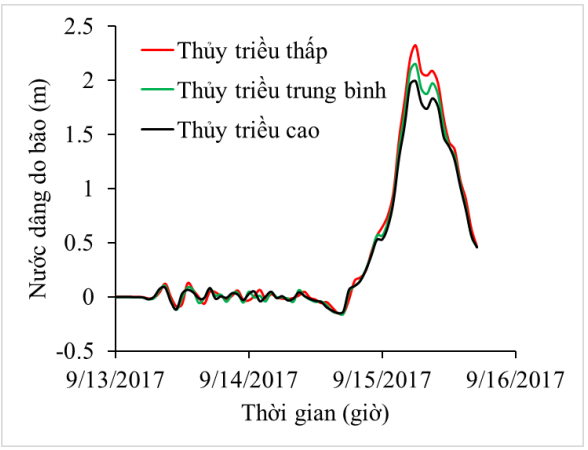
Có thể thấy xu thế của "PS(HT)-PS(MT)" tại ba vị trí là tăng lên khi cường độ bão tăng, từ kịch bản Exp01 đến kịch bản Exp09. Chênh lệch lớn nhất tại Hòn La, nơi gần tâm bão nhất, trong khi chênh lệch nhỏ nhất tại Hòn Dấu, nơi xa tâm bão

nhất. Đối với "PS(LT)-PS(MT)", xu hướng tương tự như trường hợp chênh lệch nước dâng lớn nhất của "PS(LT)-PS(MT)" về giá trị tuyệt đối, tăng từ kịch bản Exp01 đến kịch bản Exp09. Kết quả cũng cho thấy chênh lệch tuyệt đối của nước dâng lớn nhất là cao nhất tại Hòn La và thấp nhất tại Hòn Dấu.

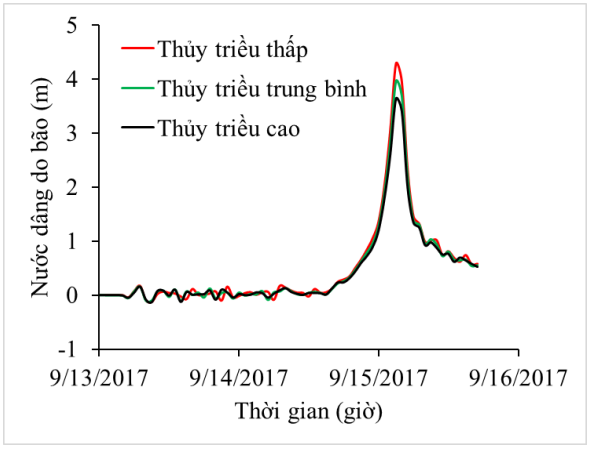
Tại Hòn La, trong Exp01 (bão nhiệt đới), Exp05 (bão mạnh), và Exp09 (siêu bão) "PS(HT)-PS(MT)" (và "PS(LT)-PS(MT)") tương ứng là -0,07 m (0,10 m), -0,20 m (0,22 m) và -0,32 m (0,32 m). Các giá trị đó tương ứng với 20,0% (28,6%), 9,6% (10,6%) và 8,1% (8,1%) của [((PS(HT)-PS(MT))/PS(MT) và ((PS(LT)-PS(MT))/PS(MT)].



(a) Hòn Dấu

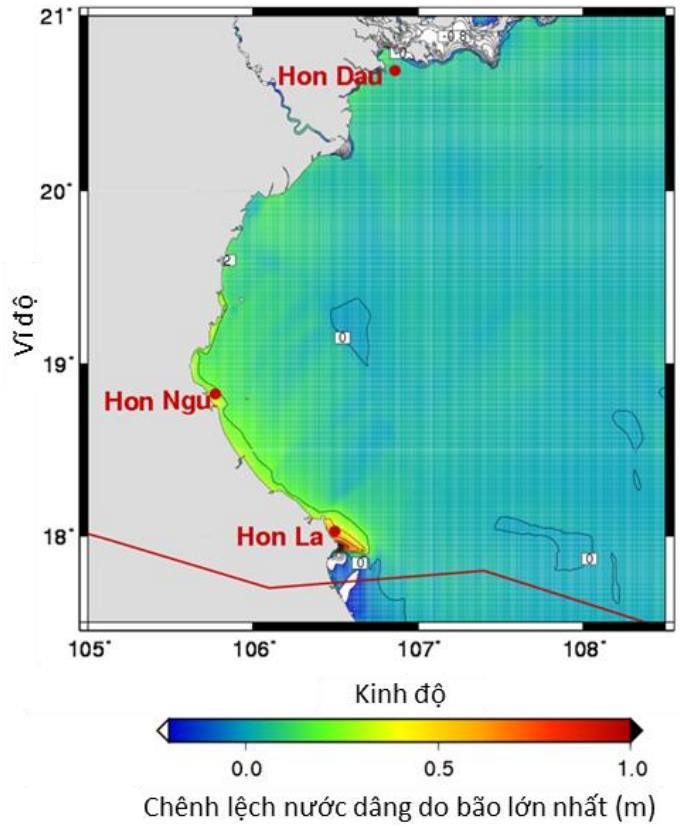


(b) Hòn Ngư

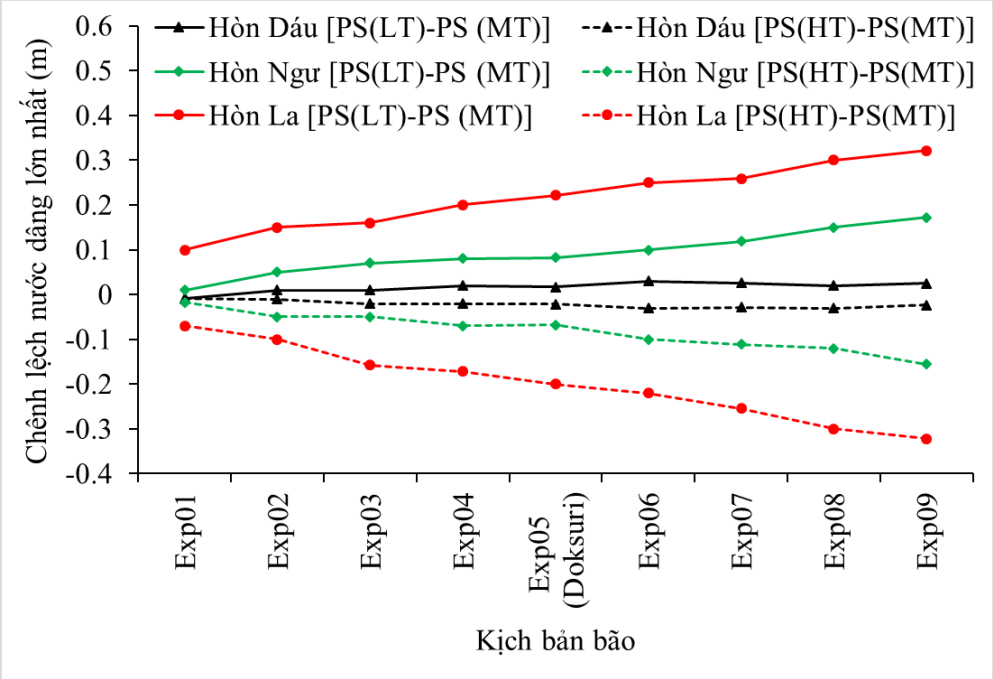


(c) Hòn La

Hình 3.14. Dao động nước dâng do bão trường hợp kịch bản Exp09 (siêu bão) đổ bộ vào pha thủy triều thấp, trung bình và cao: (a) Hòn Dấu, (b) Hòn Ngư và (c) Hòn La



Hình 3.15. Phân bố không gian của chênh lệch nước dâng do bão lớn nhất giữa bão kịch bản Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều thấp và triều cao.



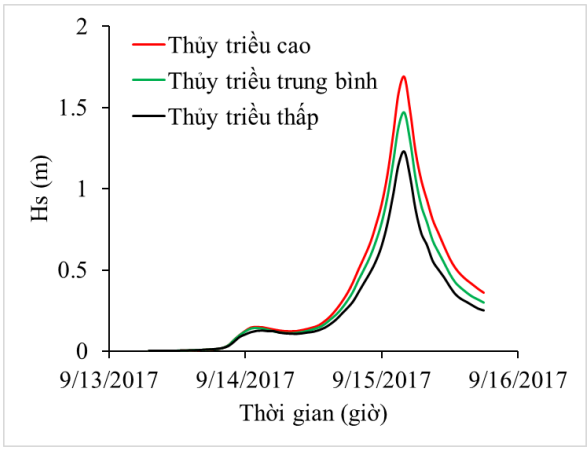
Hình 3.16. Chênh lệch nước dâng do bão lớn nhất trong các kịch bản mô phỏng

Tóm lại, ảnh hưởng của pha thủy triều tới nước dâng do bão trở nên rõ ràng khi cường độ bão mạnh lên. Ngoài ra, khi biên độ thủy triều cao hơn, tác động của pha thủy triều tới nước dâng do bão sẽ đáng kể hơn. Chênh lệch nước dâng do bão khi bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp và cao khoảng 2% trong trường hợp bão Xangsane (9/2006), cấp 11 (thang gió Beaufort) đổ bộ vào bờ biển miền Trung Việt Nam, nơi có biên độ thủy triều trung bình là 1,8 m, thấp hơn tại khu vực của nghiên cứu này [Thuy và cộng sự, 2016]. Trong nghiên cứu này, tác động của thủy triều lên nước dâng lên tới 8,1% đối với trường hợp siêu bão (Exp09), cho thấy tác động của thủy triều là rất đáng kể hơn. Cần lưu ý rằng ở pha triều cao, mặc dù nước dâng do bão thấp hơn khi bão đổ bộ vào pha triều thấp, nhưng ở các vùng ven biển có biên độ triều lớn như khu vực nghiên cứu, mực nước tổng hợp vẫn sẽ cao, dẫn đến nguy cơ ngập lụt ven biển cao. Trên thực tế, ở vùng ven bờ tây vịnh Bắc Bộ, đã có nhiều trường hợp bão gây nước dâng thấp nhưng đổ bộ vào pha triều cường, gây ra ngập lụt trên diện rộng.

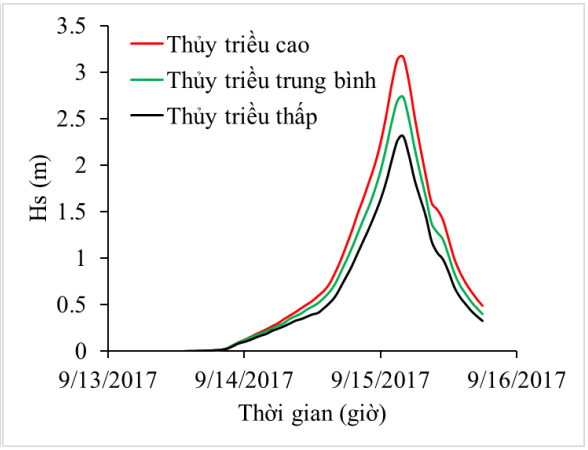
3.2.3.2. Ảnh hưởng của pha thủy triều đến sóng trong bão

Tương tự như đánh giá ảnh hưởng của pha thủy triều tới nước dâng do bão trong phần trước, ảnh hưởng của pha thủy triều lên sóng được kiểm tra bằng cách so sánh sự khác biệt của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất được tính toán ở ba pha thủy triều thấp, trung bình và cao. Hình 3.17 cho thấy sự thay đổi của độ cao sóng có nghĩa (Hs) tại Hòn La được tính toán với kịch bản bão Exp01, Exp05 và Exp09 trong các pha thủy triều thấp, trung bình và cao. Kết quả cho thấy, đối với cả ba kịch bản bão, độ cao sóng có nghĩa lớn nhất khi bão đổ bộ trong pha thủy triều cao và nhỏ nhất trong pha thủy triều thấp. Xu thế này ngược với tác động của pha thủy triều lên nước dâng do bão đã phân tích ở phía trên. Ví dụ, độ cao sóng có nghĩa cao nhất tại Hòn La trong pha thủy triều cao là 1,69 m, 3,16 m và 3,89 m tương ứng với kịch bản bão Exp01, Exp05 và Exp09. Do vậy, chiều cao sóng ở vùng biển ven bờ chịu chi phối lớn bởi độ sâu của nước thời điểm bão ảnh hưởng. Độ cao sóng trong pha thủy triều cao lớn hơn trong pha thủy triều thấp là do trong pha thủy triều cao độ sâu biển lớn hơn dẫn tới làm giảm ma sát đáy khi sóng biển xâm nhập từ vùng nước sâu vào vùng

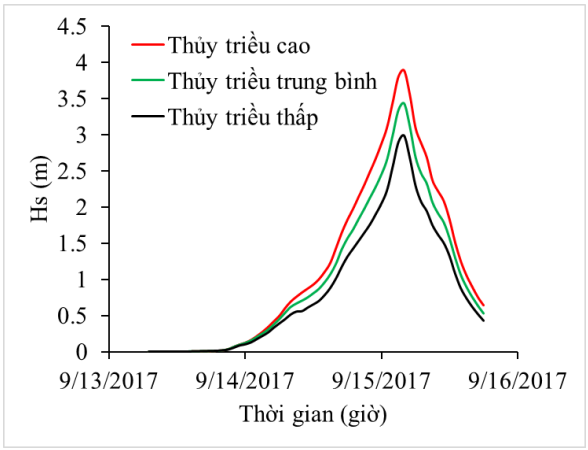
nước nông. Phân bố chênh lệch độ cao sóng có nghĩa lớn nhất giữa kịch bản siêu bão (Exp 09) đổ bộ vào pha thủy triều cao và pha thủy triều thấp thể hiện ở hình 3.18 cho thấy chênh lệch lớn nhất là ở khu vực gần Hòn La và giảm dần về phía Hòn Dấu.



(a) Exp01

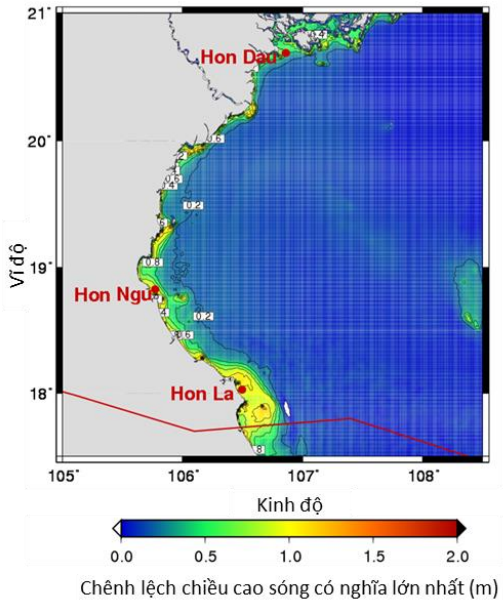


(b) Exp05



(c) Exp09

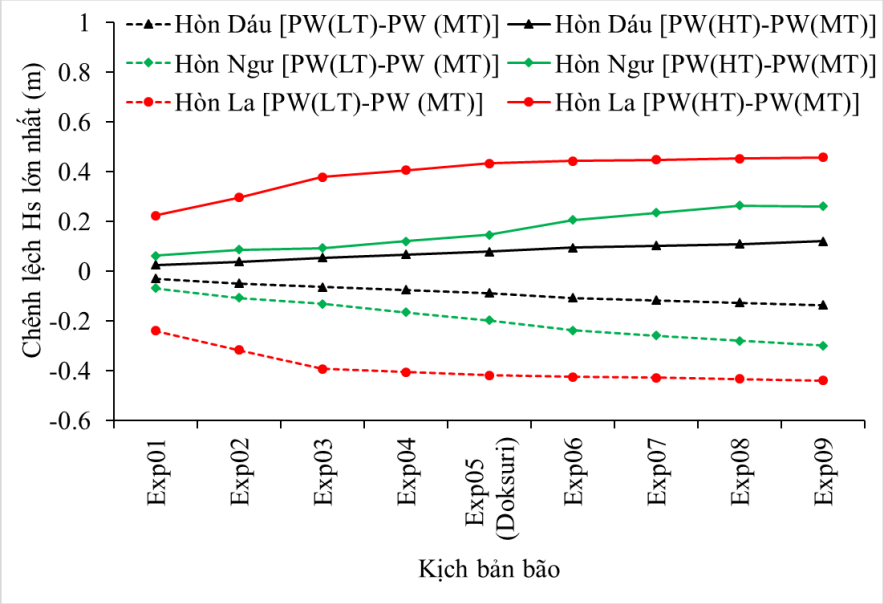
Hình 3.17. Độ cao sóng có nghĩa (Hs) theo thời gian tại Hòn La trong kịch bản bão Exp01 (a), Exp05 (b) và Exp09 (c) đổ bộ vào pha thủy triều thấp, trung bình và cao.



Hình 3.18. Chênh lệch độ cao sóng có nghĩa lớn nhất với bão kịch bản Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều cao và pha thủy triều thấp

Ảnh hưởng của pha thủy triều lên độ cao sóng được đánh giá, phân tích thông qua chênh lệch giữa độ cao sóng có nghĩa lớn nhất được mô phỏng trong pha thủy triều cao so với trong pha thủy triều trung bình (PW(HT)-PW(MT)) và trong pha thủy triều thấp so với trong pha thủy triều trung bình (PW(LT)-PW(MT)) trong 9 kịch bản cấp bão, được thể hiện trên hình 3.19. Kết quả cho thấy tại cả ba vị trí Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La, "PW(HT)-PW(MT)" có xu hướng tăng dần khi cường độ bão tăng, trong khi "PW(LT)-PW(MT)" có xu hướng ngược lại. Tại Hòn La, chênh lệch độ cao sóng có nghĩa lớn nhất giữa trường hợp bão Exp01, Exp05 và Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều cao và pha thủy triều trung bình lần lượt là 0,22 m, 0,43 m và 0,46 m, tương ứng với sự thay đổi về phần trăm [((PW(HT)-PW(MT))/PW(MT)] lần lượt là 15,3%, 15,9% và 13,3%. Tuy nhiên, những khác biệt tăng dần thể hiện rõ hơn ở Hòn Ngư và Hòn Dấu trong tất cả các kịch bản cấp bão đổ bộ. Tác động của pha thủy triều lên sóng là đáng kể tại Hòn La, nơi có sóng lớn do gần đường đi của bão. Những kết quả này phù hợp với một số nghiên cứu trước đây [Lewis và cộng sự, 2019] và [Ma và cộng sự, 2024]. Độ cao sóng có nghĩa thay đổi theo mực nước; mực nước cao dẫn đến độ cao sóng tăng và mực nước giảm dẫn đến độ cao sóng giảm [Ma và cộng sự,

2024]. Trong trường hợp mực nước cao, mô hình tích hợp cho kết quả độ cao sóng lớn hơn 20% ở một số vùng so với mô hình không kết hợp [Lewis và cộng sự, 2019].



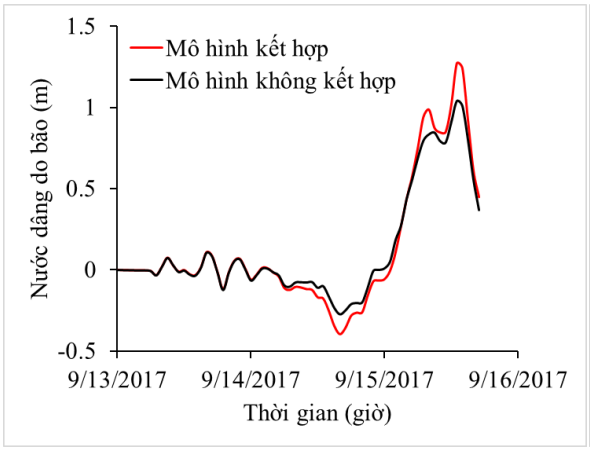
Hình 3.19. Chênh lệch độ cao sóng có nghĩa lớn nhất tại Hòn Dấu và Hòn Ngư trong các kịch bản thủy triều cao và thủy triều thấp so với thủy triều trung bình

Theo kịch bản biến đổi khí hậu năm 2020 do Bộ Tài nguyên và Môi trường (nay là Bộ Nông nghiệp và Môi trường) công bố, mực nước biển trung bình tại khu vực nghiên cứu dự kiến sẽ dâng lên trong những thập kỷ tới, theo kịch bản phát thải cao RCP8.5 là 26 cm vào năm 2050, 72 cm vào năm 2100. Khi bão xảy ra vào thời điểm thủy triều lên cao, kết hợp với nước dâng, sóng lớn có thể xâm nhập sâu hơn vào đất liền cùng với nền mực nước biển trung bình dâng cao, làm tăng nguy cơ lũ lụt và phá hủy các công trình ven biển.

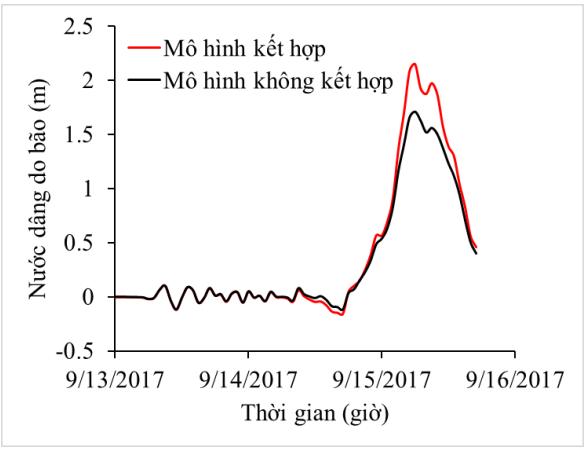
3.2.3. Ảnh hưởng của sóng tới nước dâng do bão

Để nghiên cứu tác động của sóng lên nước dâng do bão, hai phương án về mô hình sử dụng mô phỏng được thiết kế, đó là mô hình có và không tích hợp với sóng, tức là trường hợp không tích hợp với sóng sẽ bỏ qua ứng suất bức xạ do sóng và ứng suất bề mặt do sóng. Hình 3.20 thể hiện dao động theo thời gian của nước dâng do bão tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La, là kết quả mô phỏng theo hai mô hình đã nêu ở trên và cho trường hợp kịch bản bão Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều trung bình.

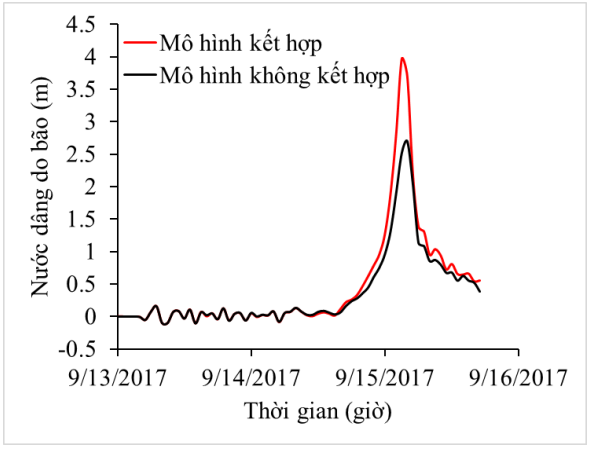
Nước dâng lớn nhất tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La khi sử dụng mô hình tích hợp với sóng lần lượt là 1,27 m, 2,14 m và 3,96 m, trong khi nước dâng lớn nhất khi mô hình không tích hợp với sóng lần lượt là 1,04 m, 1,71 m và 2,70 m. Nói cách khác, khi tính đến tác động của sóng, nước dâng do bão lớn nhất được khuếch đại 0,23 m (18,0%), 0,33 m (20,3%) và 1,26 m (31,9%), so với mô hình không xét tới sóng (bỏ qua lực cản phụ thuộc vào sóng và ứng suất bức xạ do sóng gây ra). Tại Hòn La có chênh lệch nước dâng do bão lớn nhất vì đóng góp của sóng vào nước dâng do bão lớn hơn so với những nơi khác. Xu hướng này cũng có thể thấy trên hình 3.21 về phân bố chênh lệch của nước dâng lớn nhất giữa 2 phương án tính, có và không xét tới tác động của sóng, thể hiện rõ dọc bờ biển từ Hòn La đến Hòn Ngư.



(a) Hòn Dấu



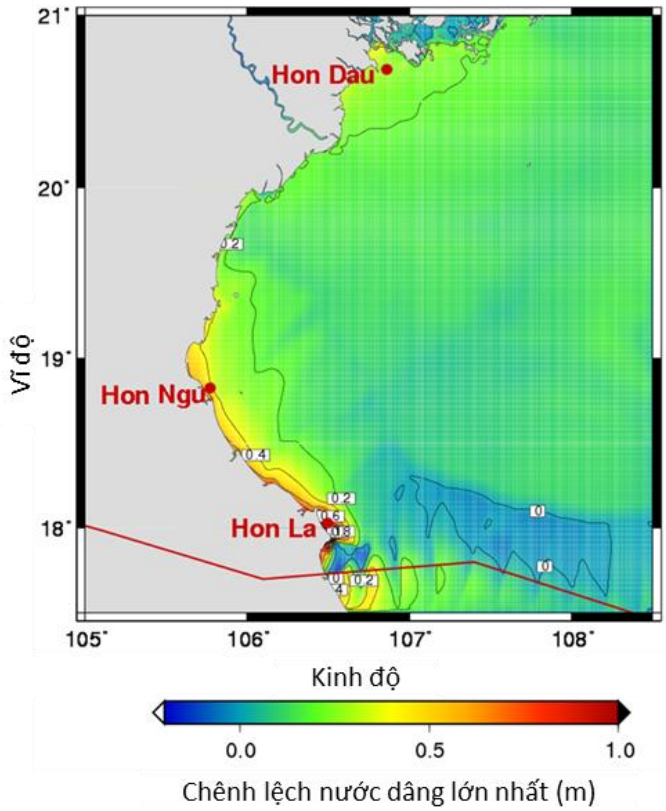
(b) Hòn Ngư



(c) Hòn La

Hình 3.20. Dao động theo thời gian của nước dâng do bão tại Hòn Dấu (a), Hòn Ngư (b) và Hòn La (c) trong kịch bản Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều trung bình

trong trường hợp mô hình có và không kết hợp với sóng



Hình 3.21. Chênh lệch nước dâng lớn nhất giữa phương án mô hình có và không tích hợp với sóng trong kịch bản Exp09 ở pha thủy triều trung bình

Để định lượng tác động của sóng lên nước dâng do bão trong các kịch bản mô phỏng, nước dâng do sóng gây ra được ước lượng bằng cách lấy nước dâng mô phỏng từ mô hình kết hợp với sóng (η_{p+wd+r}) trừ đi nước dâng mô phỏng từ mô hình không kết hợp với sóng (η_{p+w}) trong 9 kịch bản về cấp bão đổ bộ vào ba pha thủy triều thấp, trung bình và cao. Kết quả được thể hiện trong hình 3.22, trong đó đường màu xanh lá cây biểu thị nước dâng do sóng tại Hòn La, đường màu đỏ tại Hòn Ngư và đường màu đen là tại Hòn Dấu. Trong đó, ở pha thủy triều thấp được thể hiện trên hình 3.22(a), pha thủy triều trung bình trong hình 3.22(b) và pha thủy triều cao trong hình 3.22(c). Kết quả chỉ ra rằng nước dâng lớn nhất do sóng gây ra gia tăng khi cường độ bão tăng từ Exp01 đến Exp09. Đặc biệt, tốc độ tăng của nước dâng lớn nhất do sóng gây ra tại Hòn La, nơi gần tâm bão nhất, là rất lớn so với ở Hòn Ngư và Hòn Dấu. Sự

khác nhau giữa nước dâng lớn nhất do sóng gây ra trong ba pha thủy triều dần mở rộng từ kịch bản Exp01 đến Exp09, cho thấy cả những thay đổi phi tuyến tính trong hiệu ứng thủy triều lên nước dâng do sóng.

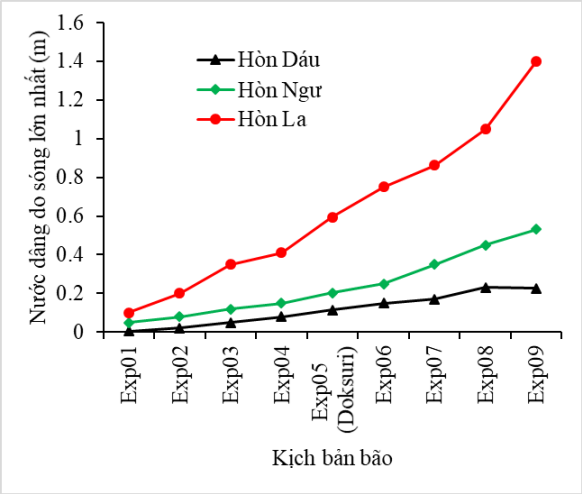
Dựa trên những kết quả ở hình 3.22, có thể đưa ra một số nhận xét như sau: Nước dâng lớn nhất do sóng trong ba pha thủy triều tại ba vị trí tăng khi cường độ bão tăng, đặc biệt là ở khu vực có nước dâng và sóng do bão lớn. Ví dụ, tại Hòn La, chênh lệch của nước dâng do sóng lớn nhất trong kịch bản Exp01, Exp05 và Exp09 khi bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp là 0,10 m (22,2%), 0,59 m (25,6%) và 1,40 m (32,7%), trong đó tỷ lệ được tính bằng:

Tỷ lệ thay đổi theo phần trăm = $((\eta_{p+wd+r} - \eta_{p+w})/\eta_{p+wd+r}) \times 100$

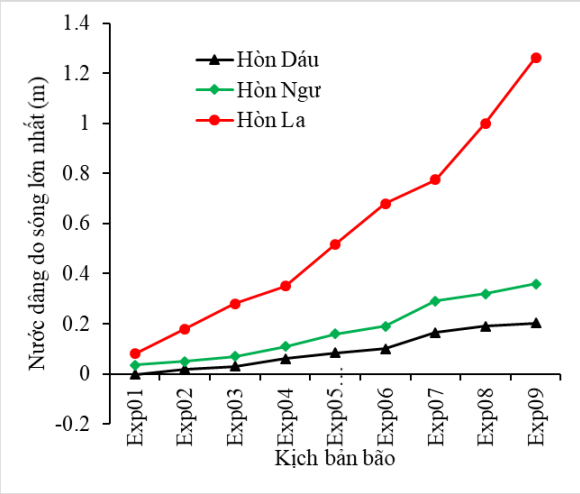
Nước dâng do sóng phụ thuộc vào vị trí so với tâm bão đổ bộ: Ví dụ, trong trường hợp kịch bản siêu bão Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều thấp gây nước dâng do sóng lớn nhất là 0,23 m (17,5%), 0,53m (22,9%) và 1,40 m (32,7%), tương ứng tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La. Hòn La có nước dâng do sóng lớn nhất vì tại đây có độ cao sóng cao hơn hai vị trí còn lại. Nhìn chung, nước dâng do sóng lớn nhất trong pha thủy triều thấp và thấp hơn trong pha thủy triều cao: ví dụ, Hòn La, chênh lệch của nước dâng do sóng lớn ở pha thủy triều cao, trung bình và thấp tương ứng là 1,10 m (30,3%), 1,26 m (31,9%) và 1,40 m (32,7%) (hình 3.23). Như vậy, có thể thấy tác động của sóng lên nước dâng do bão là đáng kể, có khả năng lên tới 32,7% tại pha thủy triều thấp, đặc biệt là ở những khu vực có siêu bão đổ bộ. Những kết quả này phù hợp với nghiên cứu trước đây về sự đóng góp của lực cản phụ thuộc vào sóng và ứng suất bức xạ do sóng gây ra vào tổng độ cao nước dâng [Kim và cộng sự, 2010], [Li và cộng sự, 2020], [Liu và cộng sự, 2020] và [Li và cộng sự, 2023]: Sự đóng góp của nước dâng do sóng là 40% dọc theo bờ biển Vịnh Tosa trong Bão Anita (1970) [Kim và cộng sự, 2010]; Nước dâng do sóng đóng góp từ 6% đến 35% vào tổng lượng nước dâng do bão trên bờ biển Đài Loan trong một số cơn bão như Bão Jangmi (2008), Bão Morakot (2009), Bão Saola (2012) và Bão Soudelor (2015); Lực cản của sóng chiếm 15 đến 22% mức tăng trong nước dâng do bão ở các vùng ven biển phía nam của Biển Bột Hải [Li và cộng sự, 2023]. Trong đó, sự đóng góp của nước dâng

do sóng vào nước dâng do bão tăng phi tuyến tính theo cường độ bão. Tuy nhiên, tỷ lệ thay đổi thấp, đối với trường hợp siêu bão (siêu bão Hato, 2017), sự đóng góp của sóng vào nước dâng do bão chỉ là 6,66%.

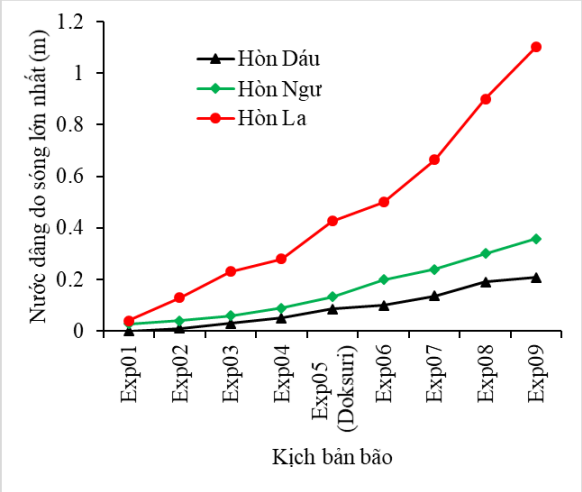
Như vậy, nếu bỏ qua tương tác giữa sóng và nước dâng do bão trong mô phỏng có thể dẫn đến đánh giá thấp hiểm họa nước dâng do bão và ngập lụt ven biển, nhất là ở khu vực gần tâm khi siêu bão đổ bộ.



(a) Thủy triều thấp

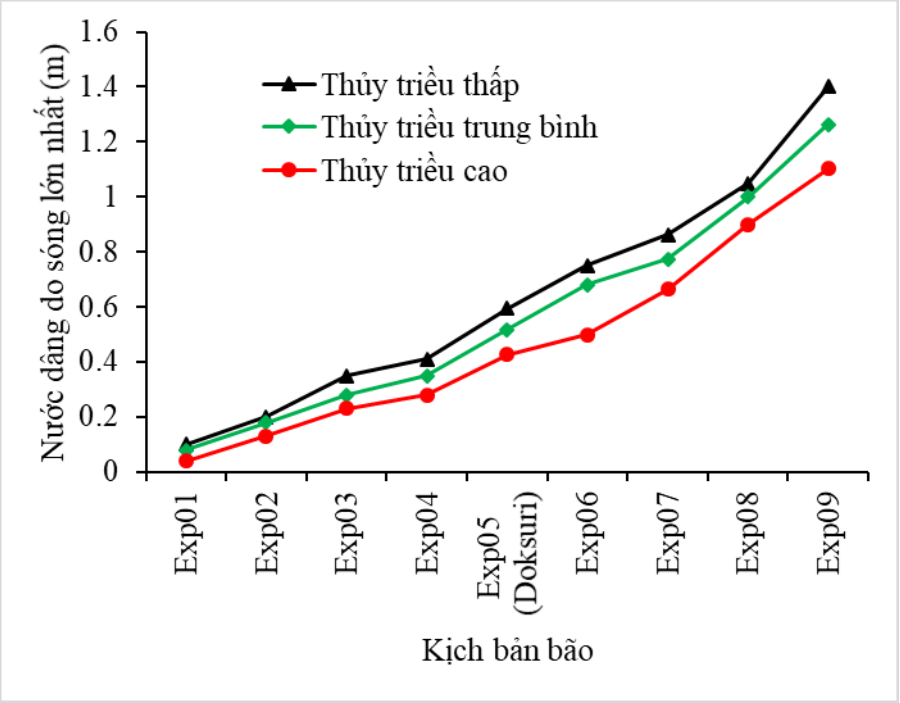


(b) Thủy triều trung bình



(c) Thủy triều cao

Hình 3.22. Nước dâng do sóng lớn nhất tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La trong các pha thủy triều thấp (a), trung bình (b) và cao (c).

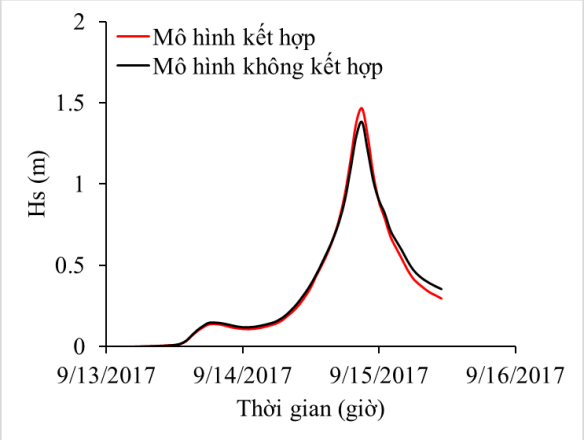


Hình 3.23. Nước dâng do sóng lớn nhất với các kịch bản cấp bão tại Hòn La, trong pha thủy triều thấp, trung bình và cao

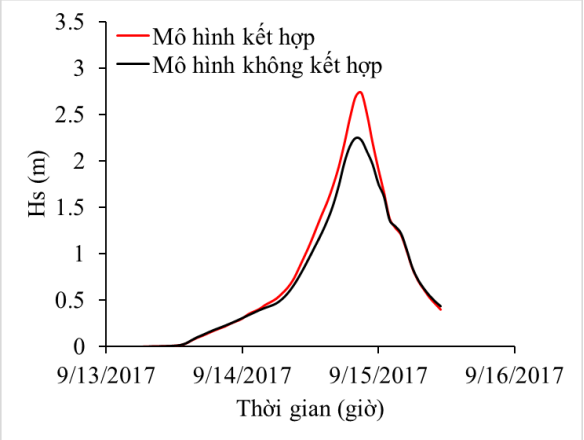
3.2.4. Ảnh hưởng của nước dâng tới độ cao sóng

Tương tự như đánh giá tác động của sóng lên nước dâng do bão tại Mục 3.2.3, tác động của nước dâng do bão lên sóng sẽ được thảo luận dựa trên kết quả mô phỏng của các kịch bản và xem xét sự khác nhau của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất giữa mô hình tính sóng có và không kết hợp với nước dâng do bão.

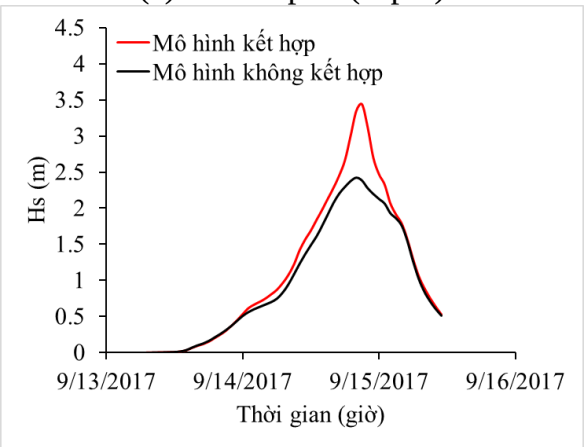
Hình 3.24 thể hiện dao động theo thời gian của độ cao sóng có nghĩa tại Hòn La trong kịch bản Exp01, Exp05 và Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều trung bình được tính toán bởi mô hình có và không tích hợp với nước dâng do bão đã đề cập ở trên. Độ cao sóng có nghĩa lớn nhất trong mô hình tích hợp với nước dâng tại Hòn La lần lượt là 1,47 m, 2,73 m và 3,43 m và sự khác nhau giữa hai mô hình ($Hs_{coupled} - Hs_{uncoupled}$) lần lượt là 0,09 m (6,0%), 0,48 m (17,6%) và 1,02 m (29,6%).



(a) Bão Exp01 (cấp 9)



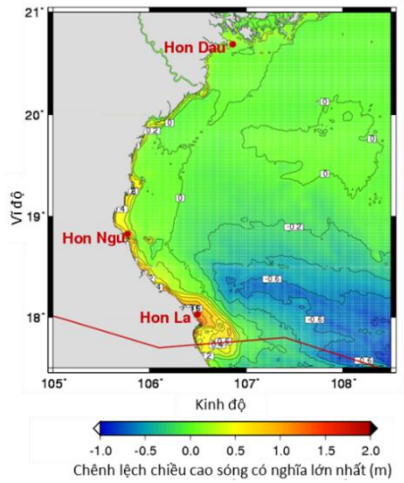
(b) Bão Exp05 (cấp 13)



(c) Bão Exp09 (cấp 17)

Hình 3.24. Dao động độ cao sóng có nghĩa tại Hòn La trong kịch bản bão Exp01 (a), Exp05 (b), và Exp09 (c) đổ bộ vào pha thủy triều trung bình. Trường hợp mô hình tính sóng có và không kết hợp với nước dâng do bão

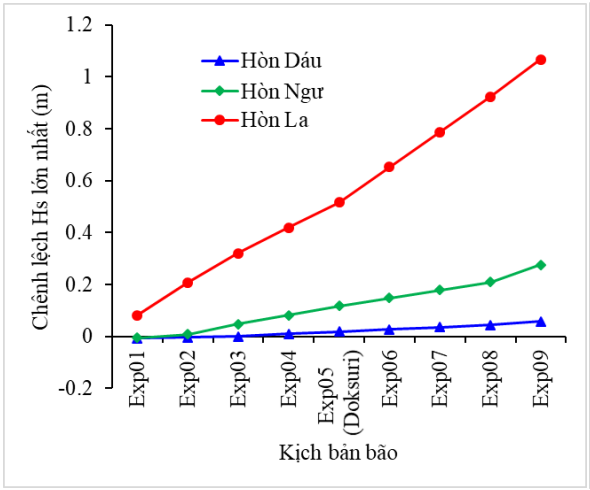
Phân bố không gian của chênh lệch độ cao sóng có nghĩa lớn nhất được thể hiện trong hình 3.25 chỉ ra rằng ở khu vực ven bờ, độ cao sóng mô phỏng bằng mô hình tích hợp với nước dâng cao hơn so với mô phỏng bằng mô hình không tích hợp, đặc biệt là ở khu vực xung quanh Hòn La. Trong khi đó, khu vực ngoài xa bên phải đường đi của bão thì thấp hơn. Điều này là do sự tương tác giữa sóng và dòng chảy, cũng như sự thay đổi độ sâu của biển do nước do nước dâng bão gây nên. Đặc biệt, tác động bởi độ sâu biển tăng do đóng góp của nước dâng do bão đối với sóng có thể thấy rõ ở vùng gần bờ.



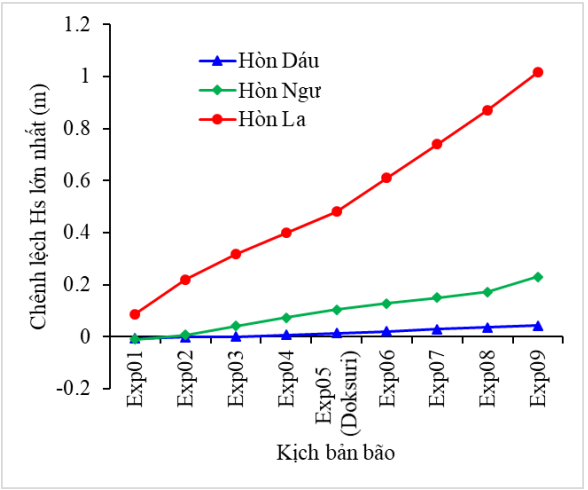
Hình 3.25. Chênh lệch của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất giữa mô hình có và không tích hợp với nước dâng do bão trong kịch bản bão Exp09 đổ bộ vào pha thủy triều trung bình.

Hình 3.26 cho thấy sự khác nhau về độ cao sóng lớn nhất giữa mô hình có và không tích hợp với nước dâng trong một loạt kịch bản cấp bão từ Exp01 đến Exp09: màu xanh lá cây biểu thị sự khác nhau tại Hòn La, màu đỏ tại Hòn Ngư và màu đen là tại Hòn Dấu. Sự khác nhau về độ cao sóng có nghĩa lớn nhất trong các pha thủy triều thấp, trung bình và cao cũng được thể hiện trong hình 3.26. Có thể nhận thấy rằng sự khác nhau là dương trong tất cả các kịch bản mô phỏng, so với mô hình không tích hợp, độ cao sóng có nghĩa lớn nhất mô phỏng từ mô hình tích hợp lớn hơn: 0,08 m (4,6%), 0,44 m (13,8%) và 0,95 m (24,4%) trong kịch bản Exp01, Exp05 và Exp09 tại Hòn La trong pha thủy triều cao. Sự khác nhau của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất thể hiện tại Hòn La, nơi có nước dâng do bão lớn nhất. Kết quả cũng cho thấy, sự khác nhau về độ cao sóng lớn nhất của các kịch bản về cấp bão đổ bộ không có nhiều khác biệt trong các pha thủy triều. Ví dụ, với kịch bản Exp09 tại Hòn La, sự khác nhau là 1,06 m, 1,02 m và 0,95 m lần lượt đối với các pha thủy triều thấp, trung bình và cao. Do đó, có thể thấy rằng tác động của nước dâng lên sóng có ý nghĩa hơn tác động của thủy triều lên sóng thông qua chênh lệch giữa phương án tính sóng có và không xét tới ảnh hưởng của nước dâng ở 03 pha thuỷ triều không lớn. Hơn nữa, tác động của nước dâng trong siêu bão có thể làm tăng độ cao của sóng lên tới 24,4% với pha thủy triều cao, đặc biệt là ở khu vực bão đổ bộ.

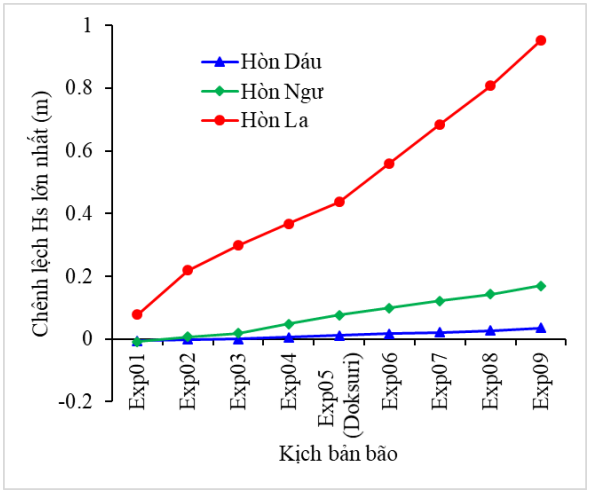
Tác động của nước dâng do bão tới độ cao sóng trong bão trong nghiên cứu này phù hợp với các phát hiện của [Luo và cộng sự, 2021], [Mo và cộng sự, 2023] và [Ma và cộng sự, 2024]. Các nghiên cứu này chỉ ra rằng, ở vùng nước gần bờ, độ cao sóng có nghĩa tăng khi nước dâng do sóng tăng [Luo và cộng sự, 2021]. Mực nước thay đổi do nước dâng do bão khiến độ cao sóng có nghĩa tăng khoảng từ 0,9 m đến 1,3 m ở khu vực gần bờ và độ cao sóng có nghĩa giảm nhẹ ở các khu vực ngoài khơi phía nam Biển Hoàng Hải [Mo và cộng sự, 2023].



(a) Thủy triều thấp



(b) Thủy triều trung bình



(c) Thủy triều cao

Hình 3.26. Chênh lệch của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất tại Hòn Dấu, Hòn Ngư và Hòn La giữa trường hợp mô hình có và không tích hợp với nước dâng do bão. Bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp (a), trung bình (b) và cao (c).

Tương tác giữa thủy triều, nước dâng và sóng là quá trình phức tạp. Ngoài sự thay đổi độ sâu của nước do thủy triều, nước dâng, còn có sự tương tác giữa sóng và dòng chảy. Sóng thay đổi độ cao của nước dâng thông qua lực cản phụ thuộc vào sóng và ứng suất bức xạ do sóng gây ra, trong khi sự thay đổi độ cao của nước dâng ảnh hưởng đến độ cao của sóng. Ảnh hưởng của dòng chảy lên sóng trong bão cũng phụ thuộc vào hướng của dòng chảy và sóng trong khu vực. Cơ chế này vẫn là chủ đề nghiên cứu cần được thảo luận chi tiết trong các nghiên cứu trong tương lai.

Trên đây là những kết quả phân tích về tầm quan trọng của quá trình tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ trong mô phỏng nước dâng và sóng trong bão, nội dung tiếp theo sẽ tập trung phân tích chi tiết mức độ đóng góp của từng yếu tố: thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông tới ngập lụt tại khu vực ven biển Thanh Hóa, bão Doksuri (9/2017) tiếp tục được lựa chọn để mô phỏng.

3.3. Ảnh hưởng của thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông tới ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa

Trong điều kiện bão, mực nước tổng cộng khu vực ven biển và cửa sông có thể thay đổi đáng kể do sự tương tác của nhiều yếu tố khác nhau như thủy triều, nước dâng do bão, sóng và dòng chảy sông. Tác động tổng hợp của các yếu tố này quyết định tổng mực nước trong một cơn bão. Cửa sông là vùng chuyển tiếp giữa sông và biển, khu vực hình thành các hệ sinh thái độc đáo. Sự tương tác giữa sông (lưu lượng) và biển (thủy triều, nước dâng do bão, sóng) trong các cơn bão có thể làm thay đổi đáng kể mực nước ở khu vực cửa sông. Sự tương tác này khuếch đại tác động của các yếu tố, dẫn đến hình thành mực nước cực đoan. Sự thay đổi của mực nước tổng cộng dẫn đến sự thay đổi của ngập lụt khu vực ven biển. Vì vậy, các yếu tố thủy động lực học như thủy triều, nước dâng do bão, sóng và dòng chảy sông điều khiển mực nước tổng cộng nhưng cũng đồng thời điều khiển quá trình ngập lụt ở khu vực ven biển và các cửa sông.

3.3.1. Các kịch bản tính toán

Để đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố thủy động lực đến ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa, các kịch bản tính toán được thiết lập dựa trên trường hợp bão Doksuri (9/2017) (bảng 3.3), bằng cách thêm/bớt các yếu tố có tác động tới ngập lụt như thủy triều (đánh giá ảnh hưởng của pha thủy triều), nước dâng sóng (đánh giá ảnh hưởng của sóng) và dòng chảy sông (đánh giá ảnh hưởng dòng chảy sông). Do vậy, ảnh hưởng của thủy triều, sóng biển và dòng chảy sông tới ngập lụt tại khu vực ven biển được hiểu là sự khác biệt về diện tích và độ sâu ngập lụt giữa các kịch bản tính toán trình bày trong bảng 3.3.

Bảng 3.3. Danh sách kịch bản mô phỏng tác động của các yếu tố thủy động lực đến ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa

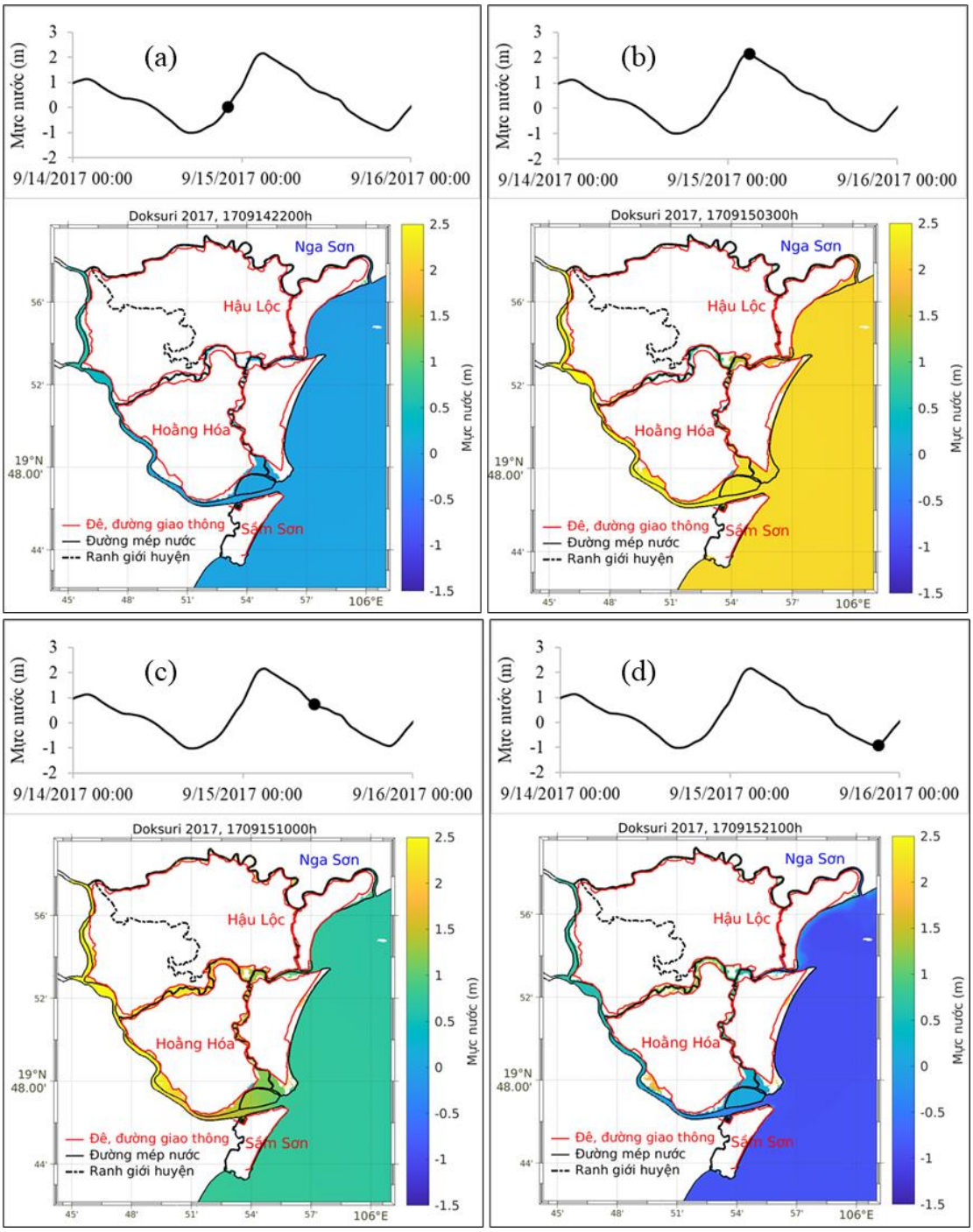
Tên kịch bản	Các yếu tố thủy động lực được xem xét			
	Thủy triều	Gió và áp	Sóng	Dòng chảy sông
TT	x			
TT+NDDB	x	x		
TT+NDDB+NDDS	x	x	x	
TT+NDDB+NDDS+DCS	x	x	x	x

TT : Thủy triều
TT+NDDB : Thủy triều + Nước dâng do bão
TT+NDDB+NDDS: Thủy triều + Nước dâng do bão + Nước dâng do sóng
TT+NDDB+NDDS+DCS: Thủy triều + Nước dâng do bão + Nước dâng do sóng + Dòng chảy sông

3.3.2. Diễn biến ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa trong bão Doksuri (9/2017)

Trên hình 3.27 là kết quả mô phỏng diễn biến mực nước trong bão Doksuri (9/2017) ở các pha thủy triều khác nhau, trong kịch bản "TT+NDDB+NDDS+DCS". Lúc 22 giờ (GMT) ngày 14/9/2017, thời điểm 9 giờ trước khi bão đổ bộ. Ở thời điểm này, mực nước ven biển Thanh Hóa đang ở mức triều trung bình, chưa có hiện tượng nước dâng/rút do tác động của gió và sóng (hình 3.27a); Lúc 03 giờ ngày 15/9/2017 (hình 3.27b), là thời điểm mực nước biển dâng cao nhất do kết hợp nước dâng do bão với đỉnh triều. Tại thời điểm này đã có nhiều khu vực trên đất liền bị ngập; Lúc 10h

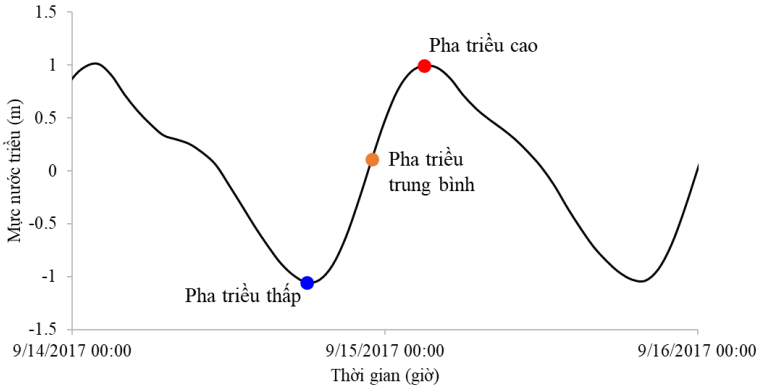
ngày 15/9/2017 (hình 3.27c), tại thời điểm này mực nước đang rút và nhiều khu vực không còn ngập hoặc vẫn ngập nhưng độ sâu ngập đã giảm; Lúc 21h ngày 15/9/2017 (hình 3.27d), thời điểm mực nước khu vực đã rút xuống thấp nhất dẫn tới không còn khu vực bị ngập.



Hình 3.27. Phân bố mực nước tại thời điểm: (a) Triều trung bình, (b) Mực nước tổng hợp cao nhất, (c) Mực nước đang xuống và (d) Mực nước xuống thấp nhất.

3.3.3. Ảnh hưởng của pha thủy triều tới ngập lụt ven biển Thanh Hóa

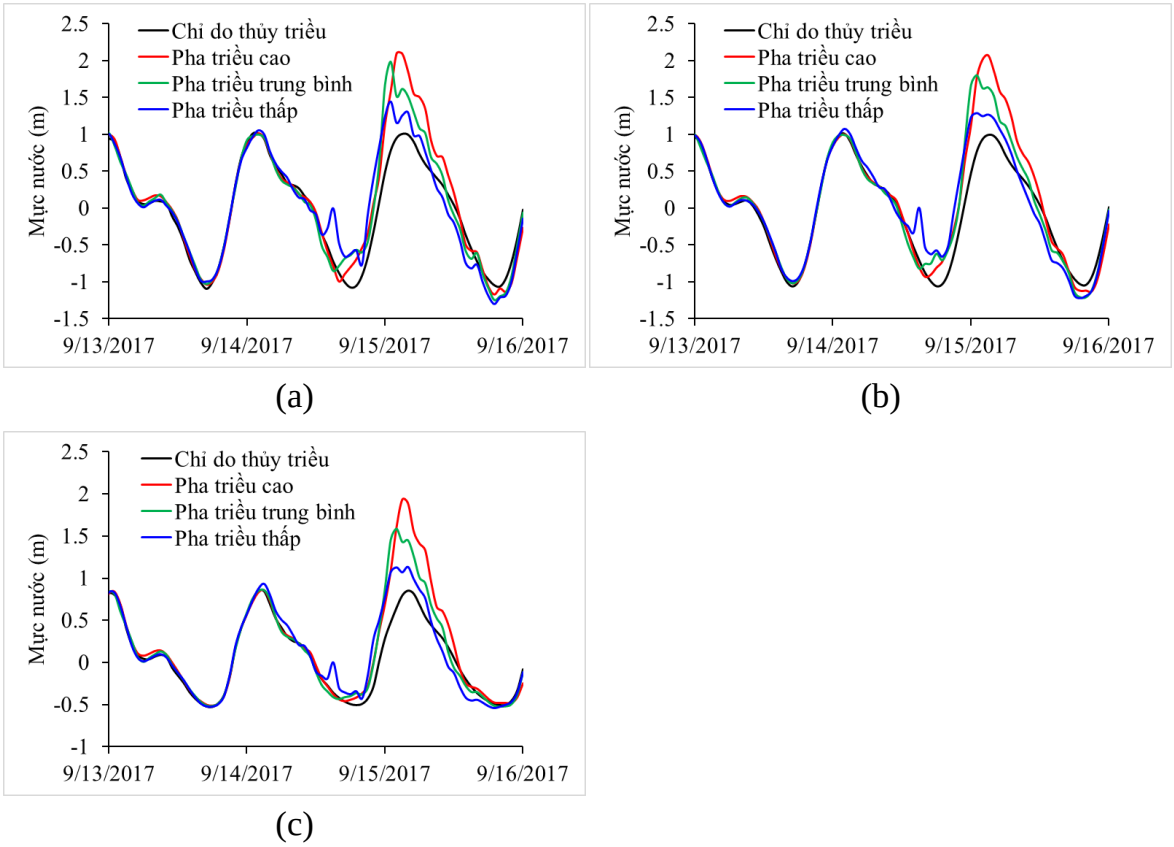
Để đánh giá ảnh hưởng của pha thủy triều tới ngập lụt ven biển Thanh Hóa, trong nghiên cứu này thực hiện các mô phỏng với trường hợp bão Doksuri (9/2017) được giả định đổ bộ vào 03 pha thủy triều khác nhau, pha thủy triều cao nhất, pha thủy triều trung bình và pha thủy triều thấp nhất như minh hoạ trên hình 3.28. Trên thực tế, bão Doksuri đã đổ bộ vào pha thủy cao, do vậy với phương án bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp và trung bình, số liệu các tham số bão ở các ốp sẽ đồng loạt được dịch tịnh tiến lùi thời gian tương ứng khoảng 12 giờ (pha triều thấp) và 6 giờ (pha triều trung bình). Nghiên cứu tại Mục 3.2.2 đã đánh giá ảnh hưởng của pha thủy triều tới độ lớn nước dâng do bão trong bão Doksuri (9/2017) tại vùng biển ven bờ tây vịnh Bắc Bộ, kết quả cho thấy nước dâng do bão cao nhất với trường hợp bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp và thấp nhất khi bão đổ bộ vào pha thủy triều cao. Tuy nhiên, chưa thực hiện đánh giá về mực nước tổng hợp (thủy triều và nước dâng do bão) và ngập lụt ven biển tại khu vực nghiên cứu với 03 trường hợp của pha thủy triều nêu trên. Trong trường hợp này, phương án tính được lựa chọn sẽ không xét tới ảnh hưởng của sóng dòng chảy sông có nghĩa là nước dâng do bão chỉ xét tới tác động của ứng suất gió và độ giảm khí áp (NDDB).



Hình 3.28. Minh hoạ thời điểm bão Doksuri (9/2017) đổ bộ vào 3 pha thủy triều trong mô phỏng ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa

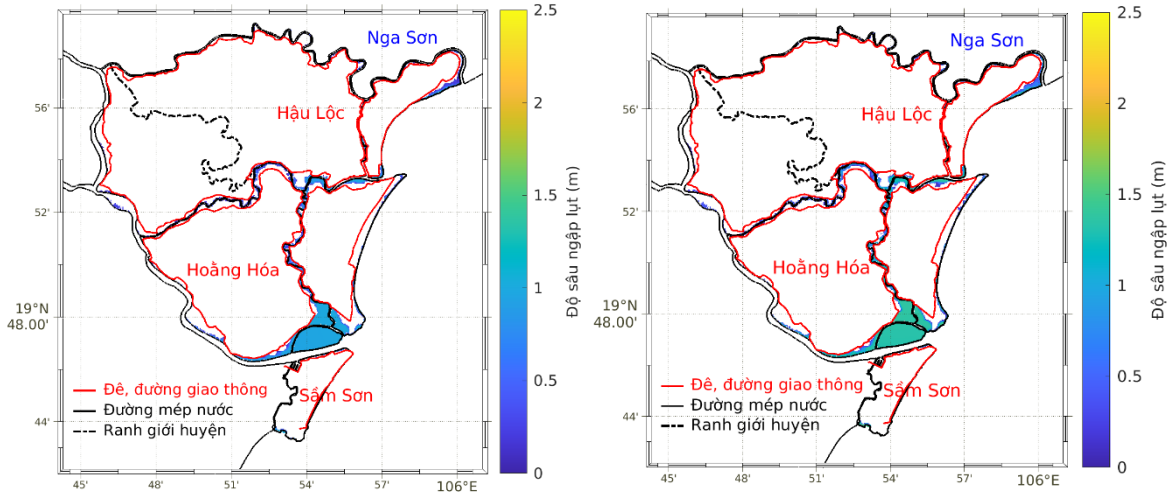
Trên hình 3.29.a-c thể hiện kết quả mô phỏng dao động mực nước tổng hợp tại ven biển Hậu Lộc (HL01-hình 3.29a), Sầm Sơn (SS01-hình 3.29b) và vị trí trạm Quảng Châu (QC) trên sông Mã (hình 3.29c) cho trường hợp chỉ tính với thủy triều

(không có tác động của bão) và các trường hợp bão đổ bộ vào 03 pha thủy triều, thấp, trung bình và cao. Có thể thấy rằng, tại 03 vị trí lựa chọn phân tích, trường hợp bão đổ bộ vào pha triều cường cho đỉnh mực nước tổng hợp cao nhất, tiếp đến là tại pha triều trung bình. Với pha thủy triều thấp cho kết quả mực nước cao hơn với trường hợp mô phỏng chỉ có thủy triều, nguyên nhân bởi có đóng góp của nước dâng do bão. Do ở vị trí nằm sâu trong sông (cách cửa biển khoảng 4 km) nên mực nước tổng hợp tại trạm Quảng Châu thấp hơn và thời gian đạt đỉnh muộn hơn so với hai vị trí ven biển là Hậu Lộc và Sầm Sơn. So với pha thủy triều cao, mặc dù nước dâng do bão cao hơn khi bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp, tuy nhiên do biên độ thủy triều tại khu vực lớn hơn so với độ cao nước dâng do bão nên dẫn tới mực nước tổng hợp trong trường hợp pha thủy triều cao vẫn cao hơn.

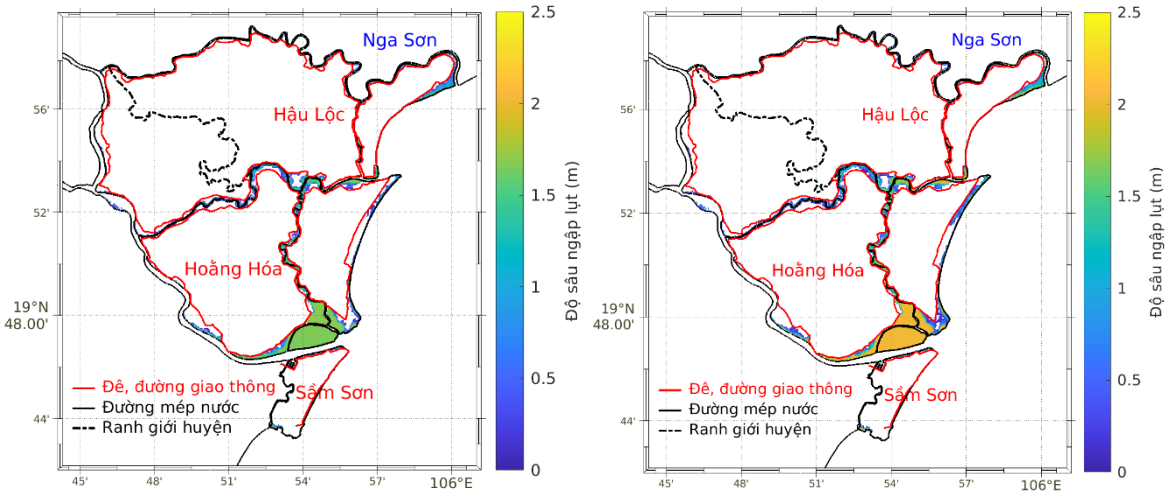


Hình 3.29. Dao động mực nước tổng hợp trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản mô phỏng tại các vị trí: (a) Ven biển Hậu Lộc (HL01), (b) Ven biển Sầm Sơn (SS01) và (c) Trạm Quảng Châu (QC).

Mức độ ngập ven biển (diện tích và độ sâu ngập) phụ thuộc vào độ cao của mực nước tổng hợp, do vậy, với bão đổ bộ vào các pha thủy triều khác nhau sẽ dẫn tới mức độ ngập khác nhau. Phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất cho 04 trường hợp mô phỏng: Chỉ do thủy triều (ngập tại thời điểm đỉnh triều), bão đổ bộ vào các pha thủy triều thấp, trung bình và cao thể hiện trên hình 3.30 và thống kê tổng diện tích ngập cho thể hiện trên hình 3.31. Có thể thấy rằng do khu vực nghiên cứu được che chắn bởi đê biển nên các khu vực bị ngập tập trung chính ở vùng đất trũng ngoài đê khu vực Hậu Lộc và xung quanh lưu vực phía biển sông Mã và sông Cung (hình 2.1b). Kết quả cho thấy, phạm vi và độ sâu ngập (Hình 3.30) và tổng diện tích ngập (Hình 3.31) có sự khác nhau giữa các trường hợp. Trường hợp bão đổ bộ vào pha thủy triều cao có tổng diện tích ngập lớn nhất, khoảng 28,3 km^2, tại pha thủy triều trung bình và pha thủy triều thấp tổng diện tích ngập tương ứng khoảng 27,2 km^2 và 22,1 km^2, giảm tương ứng 3,9% và 21,9% so với tại pha triều cao. So với trường hợp ngập chỉ do đỉnh triều (khoảng 21,5 km^2), khi bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp diện tích ngập lớn hơn nhưng không có chênh lệch nhiều, khi bão đổ bộ vào pha thủy triều cao diện tích ngập tăng lên 28,1%. Cần lưu ý rằng, đây là tổng diện tích ngập lớn nhất trong toàn bộ khoảng thời gian mô phỏng, chứ không phải ở tại thời điểm bão đổ bộ. Chính vì vậy, chênh lệch diện tích ngập giữa trường hợp bão đổ bộ vào pha triều cao và triều thấp là không lớn.

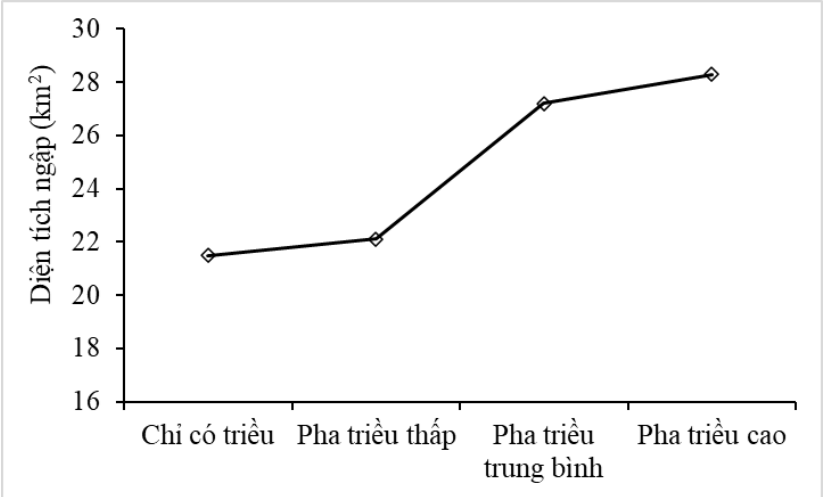


(a) (b)



(c) (d)

Hình 3.30. Phân bố ngập lụt trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản mô phỏng: (a) chỉ do đỉnh triều, (b) bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp, (c) bão đổ bộ vào pha thủy triều trung bình và (c) bão đổ bộ vào pha thủy triều cao.



Hình 3.31. Tổng diện tích ngập do bão Doksuri (9/2017) với các phương án mô phỏng

3.3.4. Ảnh hưởng của sóng biển tới ngập lụt ven biển Thanh Hóa

Ảnh hưởng của sóng (NDDS) tới ngập lụt ven biển được hiểu là kết quả khác nhau về phạm vi ngập và độ sâu ngập giữa phương án mô phỏng từ mô hình có và không tích hợp với sóng biển, tức là giữa trường hợp mô phỏng ngập lụt chỉ xét tới tác động của gió và khí áp (TT+NDDB) với trường hợp đồng thời cả gió, khí áp và

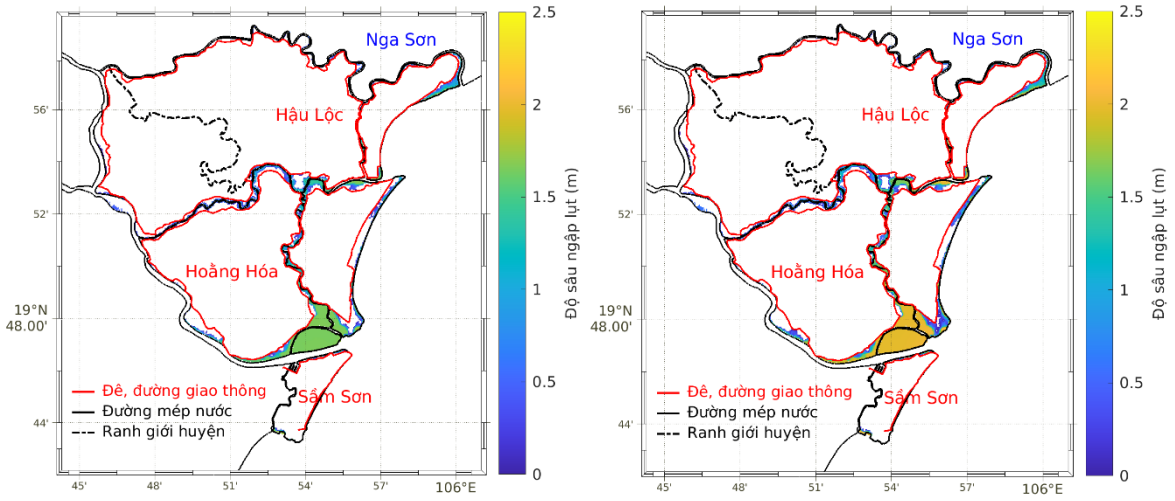
sóng trong bão (TT+NDDB+NDDS). Trong nghiên cứu tại Mục 3.2.3, đã đánh giá ảnh hưởng của sóng tới nước dâng do bão trong bão Doksuri (9/2017) và cho kết quả nước dâng do sóng chiếm khoảng 10-15% tại trạm Hòn Dấu và Hòn Ngư. Tuy nhiên, tại Mục 3.2.3 chưa đánh giá ảnh hưởng của sóng tới ngập lụt vùng ven biển tại khu vực nghiên cứu.

Để đánh giá ảnh hưởng của sóng biển tới ngập lụt vùng ven biển do bão, phương án bão Doksuri (9/2017) đổ bộ vào pha thủy triều cao được lựa chọn mô phỏng. Phân bố ngập độ sâu ngập lớn nhất cho phương án có và không xét tới ảnh hưởng của sóng thể hiện trên hình 3.32, trong đó hình 3.32a là phương án không xét tới ảnh hưởng của sóng và hình 3.32b là trường hợp có xét tới ảnh hưởng của sóng. Sự khác nhau giữa kết quả của 2 phương án mô phỏng thể hiện rõ ở bờ phía bắc lưu vực của sông Mã, với phương án tính có xét tới ảnh hưởng của sóng cho phạm vi ngập rộng hơn và tại cùng một vị trí độ sâu ngập cũng lớn hơn.

Kết quả thống kê diện tích ngập lụt theo các khoảng độ sâu ngập thể hiện trên bảng 3.4 cho thấy, phương án có xét tới ảnh hưởng của sóng cho diện tích ngập lụt khoảng 30,5 km^2, tăng khoảng 7,8% so với phương án tính không xét tới ảnh hưởng của sóng. Thống kê diện tích ngập trên bảng 3.4 cũng cho thấy, các khu vực có độ sâu ngập từ 1,5-2,0 m chiếm diện tích nhiều nhất. Phương án có xét tới ảnh hưởng của sóng cho kết quả có khoảng diện tích 2,7 km^2 có độ sâu ngập từ 2,0-2,5 m, trong đó phương án không xét tới sóng độ sâu ngập lụt lớn nhất chỉ tới 2,0 m.

Để thấy rõ hơn vai trò của sóng biển tới ngập lụt vùng ven biển khi bão đổ bộ, kết quả mô phỏng diễn biến theo thời gian của mực nước tổng hợp tại 04 vị trí (hình 2.8f) thể hiện trên hình 3.33 với các phương án tính: Chỉ có thủy triều (TT), thủy triều và nước dâng do bão (TT+NDDB) và thủy triều, nước dâng do bão và nước dâng do sóng (TT+NDDB+NDDS). Trong đó, vị trí Hậu Lộc 01 (HL01), Hoằng Hóa 01 (HH01), Sầm Sơn 01 (SS01) là các điểm dưới nước có độ sâu xấp xỉ nhau, khoảng 2,0 m, điểm Sông Mã 01 (MA01) là điểm ngay sát mép nước với độ sâu nông, khoảng 0,02 m. Ảnh hưởng của sóng tới mực nước tổng cộng được hiểu là chênh lệch giữa phương án tính có sóng (TT+NDDB+NDDS) và không có sóng (TT+NDDB). Có thể

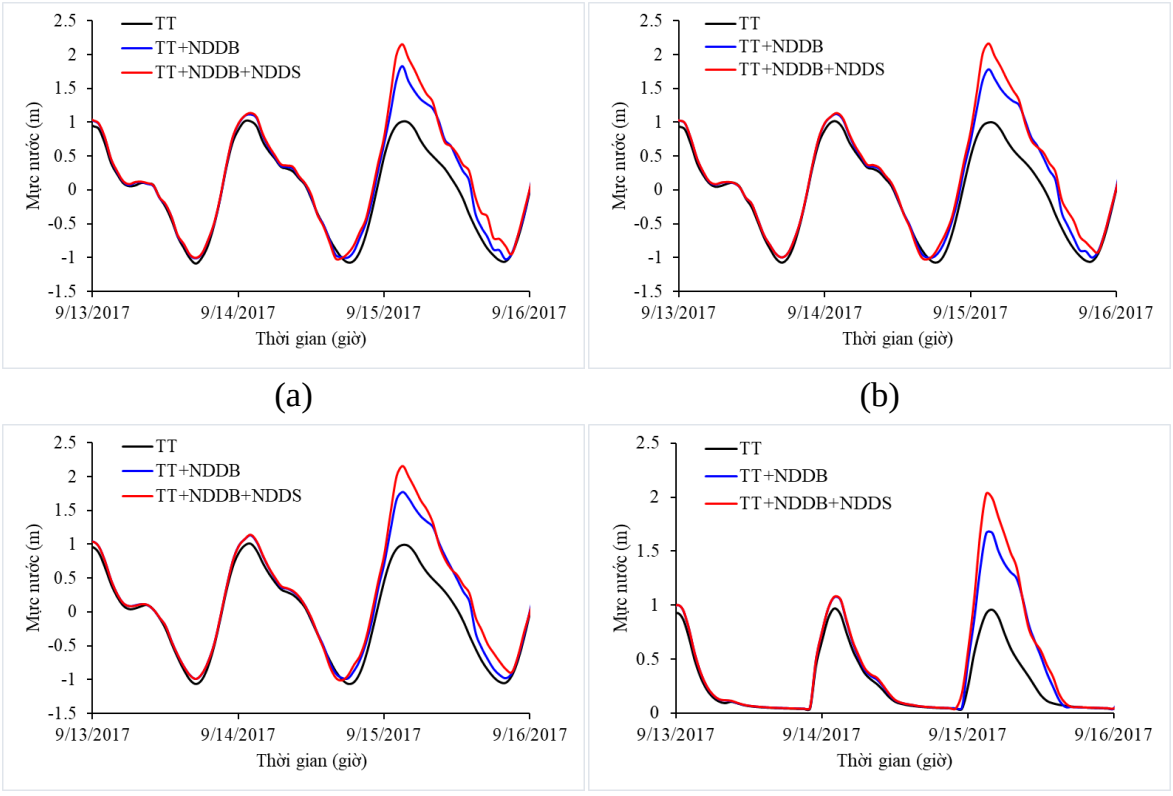
thấy rằng, so với phương án mô phỏng không xét tới sóng biển, ở tất cả các vị trí, phương án mô phỏng có sóng biển cho mực nước tổng hợp cao hơn và nước dâng do sóng chiếm khoảng 27,8% (tại HL01), 32,7% (tại HH01) và 33,4% (tại SS01). Với 03 vị trí dưới nước (HL01, HH01, SS01), mặc dù ở xa vị trí bão ảnh hưởng nhưng HL01 có nước dâng do bão (chênh lệch giữa phương án "TT+NDDB" và "TT") lớn hơn tại HH01 và SS01, tương ứng là 0,83 m (HL01), 0,78 m (HH01) và 0,77 m (SS01). Trong khi đó nước dâng do sóng (chênh lệch giữa phương án "TT+NDDB+NDDS" và "TT+NDDB+NDDS") tại HL01 (0,32 m) lại thấp hơn so với HH01 (0,38 m) và SS01 (0,39 m). So với SS01, tại MA01 có nước dâng do bão thấp hơn một chút (0,72 m), tuy nhiên nước dâng gây bởi sóng lại cao hơn (0,55 m), chiếm khoảng 43,3% nước dâng tổng cộng, điều này cho thấy hiệu ứng nước dâng gây bởi sóng ở khu vực càng nông sẽ càng nhỏ, ngược lại nước dâng do bão ở khu vực càng nông sẽ càng lớn. Các kết quả này phù hợp với nghiên cứu của [Funakoshi và cộng sự, 2008] và [Dietrich và cộng sự, 2010], khi chỉ ra rằng địa hình vịnh kín (như Hậu Lộc) có thể tăng cường nước dâng do bão do hiệu ứng "phễu" nhưng giảm năng lượng sóng do độ sâu nông, dẫn đến đóng góp của nước dâng do sóng thấp hơn.



Hình 3.32. Phân bố ngập lụt trong bão Doksuri (9/2017), trường hợp mô phỏng (a) không và (b) có xét tới ảnh hưởng của sóng biển

Bảng 3.4. Thống kê diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với trường hợp mô phỏng có và không xét tới ảnh hưởng của sóng biển

Khoảng độ sâu ngập (m)	Diện tích bị ngập (km^2)	
	Phương án không xét tới sóng	Phương án có xét tới sóng
<0,5 m	5,0	5,3
0,5 m - 1,0 m	5,2	5,4
1,0 m - 1,5 m	6,8	4,7
1,5 m - 2,0 m	11,3	12,5
2,0 m - 2,5 m	0,0	2,7
2,5 m - 3,0 m	0,0	0,0
Tổng	28,3	30,5

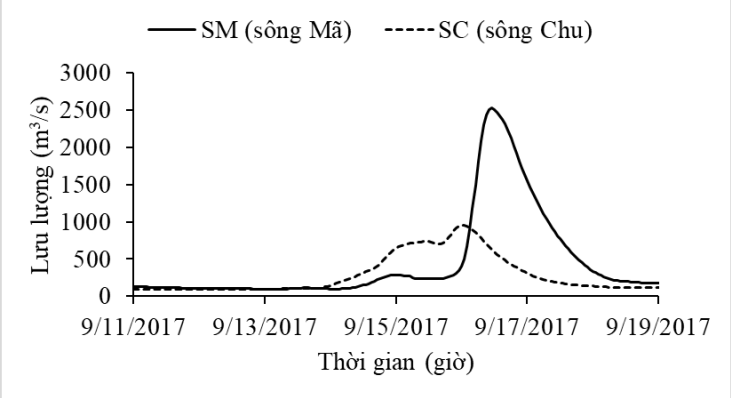


Hình 3.33. Dao động mực nước tổng hợp trong bão với phương án tính có và không xét tới ảnh hưởng của sóng biển tại các vị trí: (a) HL01, (b) HH01, (c) SS01, (d) MA01

3.3.5. Ảnh hưởng của dòng chảy sông đến ngập lụt ven biển Thanh Hóa

Ảnh hưởng của dòng chảy sông tới ngập lụt tại ven biển khu vực nghiên cứu được đánh giá thông qua so sánh kết quả mô phỏng ngập lụt với trường hợp có xét tới mực nước và lưu lượng trên hệ thống sông ở khu vực nghiên cứu trong khoảng thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng. Trong trường hợp này, phương án mô phỏng có xét tới dòng chảy sông được tích hợp và so với kết quả mô phỏng với ba trường hợp: (1) chỉ với thủy triều, (2) thủy triều kết hợp với nước dâng do bão và (3) thủy triều kết hợp với nước dâng do bão và nước dâng do sóng.

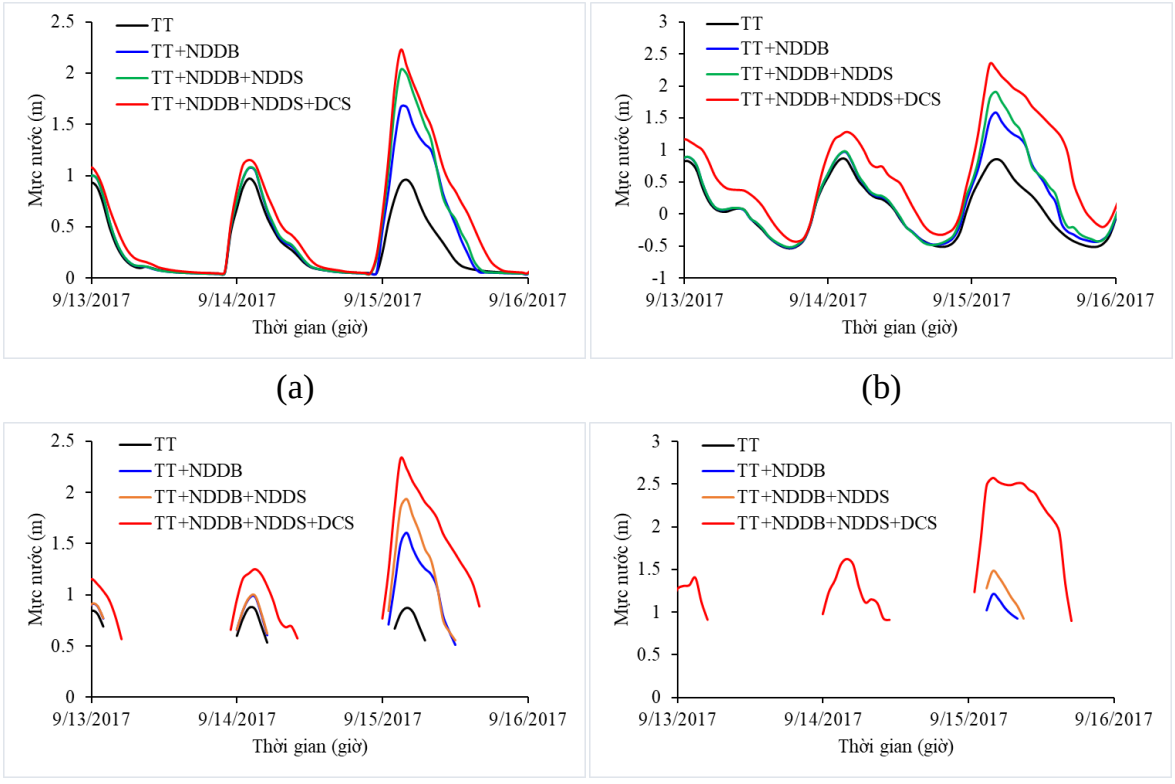
Kết quả mô phỏng lưu lượng nước bằng mô hình MIKE 11 (như đã giới thiệu tại Mục 2.3.4 và Mục 3.1) tại vị trí SM trên sông Mã và SC trên sông Chu (hình 2.8f) được sử dụng làm biên sông cho mô hình SuWAT mô phỏng ngập lụt trong bão Doksuri (9/2017) thể hiện trên hình 3.34.



Hình 3.34. Biến thiên lưu lượng nước tại SM và SC làm biên sông cho mô hình SuWAT

Trên hình 3.35 là so sánh dao động mực nước tại các vị trí dọc theo sông Mã, gồm Sông Mã 01 (MA01), trạm thủy văn Quảng Châu (QC), Sông Mã 02 (MA02) và Sông Mã 03 (MA03), là các vị trí ảnh hưởng trực tiếp của đồng thời thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông, với bốn phương án tính: Chỉ do thủy triều (TT), do thủy triều và nước dâng do bão (TT+NDDB), thủy triều, nước dâng do bão và nước dâng do sóng (TT+NDDB+ NDDS) và kết hợp thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông (TT+NDDB+ NDDS+ DCS). Trong đó, tại Quảng Châu mực nước lớn nhất ứng với các kịch bản là: 0,89 m (TT),

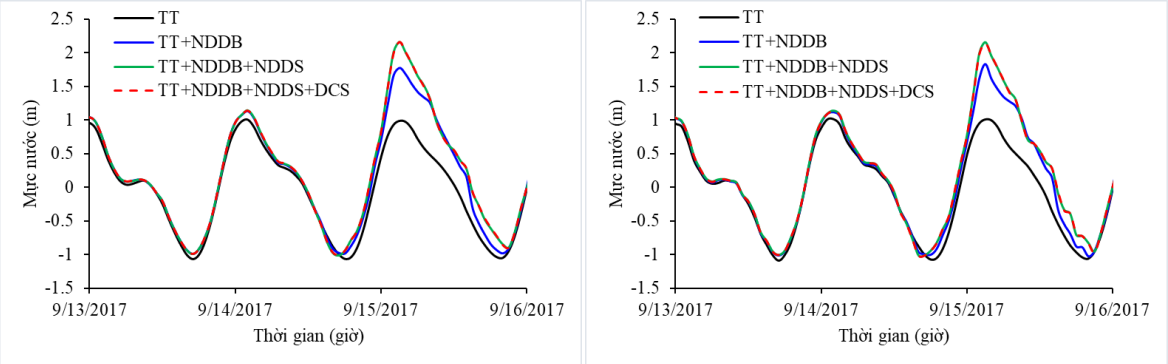
1,58 m (TT+NDDB), 1,91 m (TT+NDDB+ NDDS) và 2,35 m (TT+NDDB+NDDS+DCS). Trong đó, kịch bản xem xét đồng thời của sóng và dòng chảy sông cho kết quả mực nước gần sát với giá trị quan trắc nhất (2,35 m, quan trắc là 2,54 m) như đã thể hiện trên hình 3.6c (Mục 3.1), đã khẳng định vai trò quan trọng của tương tác sông-biển trong việc khuếch đại mực nước tổng cộng trong bão kết hợp với lũ. Đánh giá vai trò của các yếu tố gây nước dâng cho thấy, càng vào sâu trong đất liền đỉnh mực nước tại các vị trí càng tăng do ảnh hưởng của lũ càng lớn. Chênh lệch kết quả tính giữa phương án có và không xét tới dòng chảy sông (phương án "TT+NDDB+NDDS+DCS" và "TT+NDDB+NDDS") của mực nước lớn nhất tại MA01, QC, MA02 và MA03, tương ứng là 0,19 m, 0,31 m, 0,4 m, 1,1 m. Trong đó, tại điểm MA03 (cao 0,89 m), do ở vị trí trên đất cao nên chỉ ngập khi có nước dâng do bão và lũ (hình 3.35d).



Hình 3.35. Dao động mực nước tại các điểm MA01 (a), QC (b), MA02(c) và MA03(d) với 04 kịch bản tính toán trong bão Doksuri (9/2017)

Cũng tương tự cách đánh giá với các điểm dọc sông Mã, ảnh hưởng của dòng

chảy sông ở ven biển, xa cửa sông được phân tích tại HH01 và SS01. Dao động mực nước tại HH01 và SS01 thể hiện trên hình 3.36 cho thấy, do nằm xa cửa sông nên lũ trên sông hầu như không ảnh hưởng tới dao động mực nước biển, và những vị trí này chủ yếu chịu tác động của thủy triều, nước dâng do bão và nước dâng do sóng.

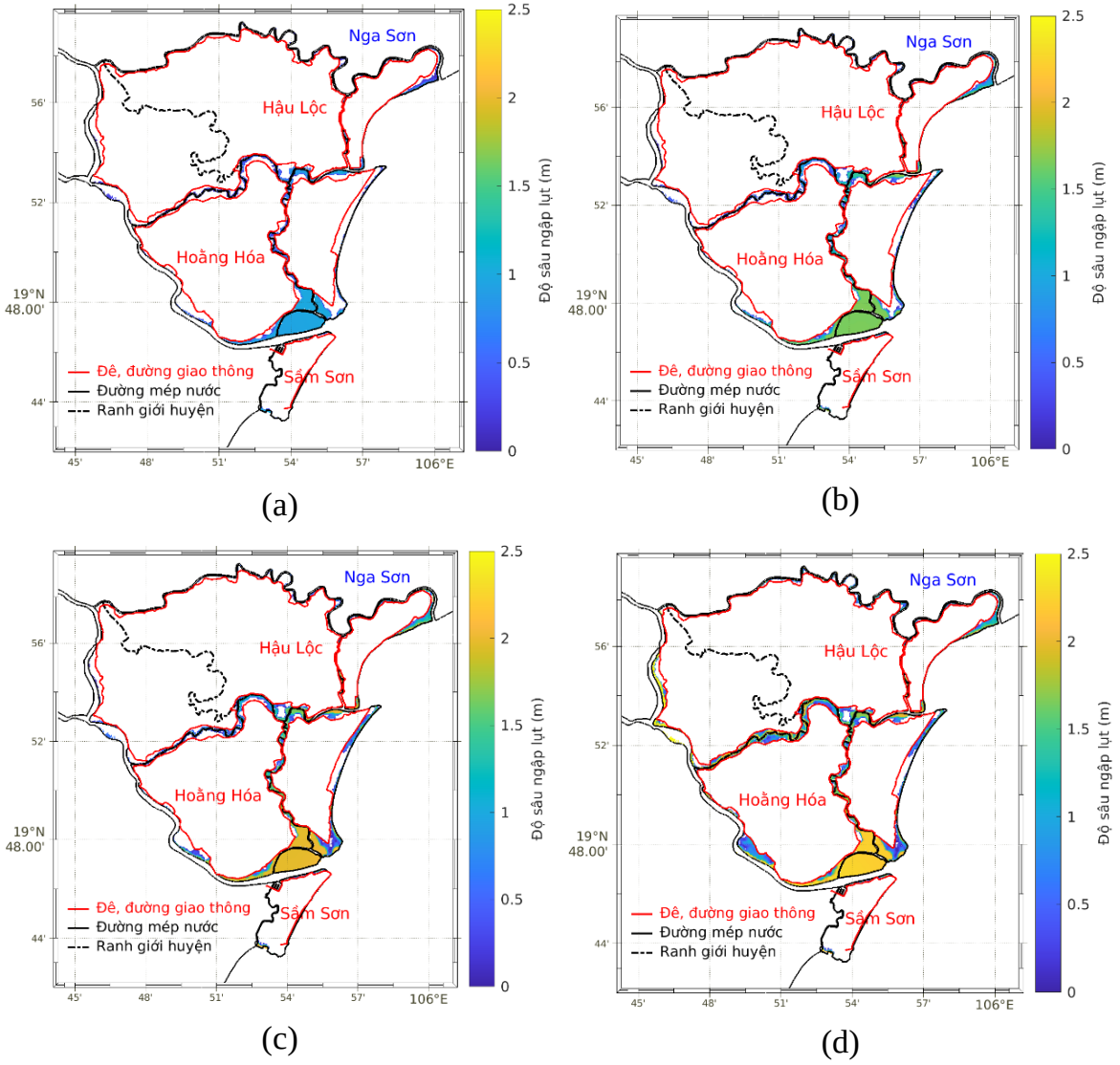


(a) (b)

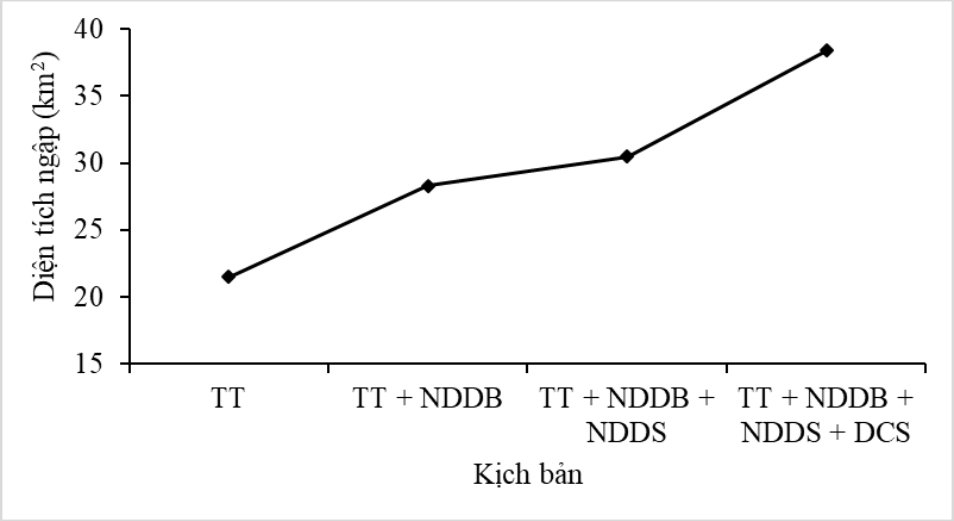
Hình 3.36. Dao động nước tại các điểm SS01 (a), và HH01(b) với 04 kịch bản tính toán trong bão Doksuri (9/2017)

Kết quả mô phỏng theo phương án có xét tới ảnh hưởng của dòng chảy sông đã làm gia tăng phạm vi và độ sâu ngập lụt tại khu vực nghiên cứu, thể hiện rõ trên các bản đồ phân bố ngập lụt và bảng thống kê diện tích ngập theo các phương án mô phỏng thể hiện trên hình 3.37, 3.38 và bảng 3.5. Có thể thấy rằng, ở phương án mô phỏng có xét tới lũ trên sông, phạm vi ngập lụt gia tăng chủ yếu ở các khu vực ven sông, nhiều khu vực ngập trên 2,0 m và đã xuất hiện vị trí ngập ở độ sâu 3,0-4,0 m. Tổng diện tích ngập lụt trong các kịch bản là TT (22,1 km^2), TT+NDDB (28,3 km^2), TT+NDDB+NDDS (30,5 km^2) và TT+NDDB+NDDS+DCS (38,4 km^2). Phương án mô phỏng có xét tới lũ trên sông làm gia tăng tổng diện tích ngập tới 25,9% so với trường hợp chỉ xét tới tác động của nước dâng do bão và nước dâng do sóng, trong đó diện tích ngập 2,0-2,5 m tăng từ 2,7 km^2 lên 12,4 km^2. Sự gia tăng của tổng diện tích ngập lụt lớn nhất trong kịch bản có xét tới dòng chảy sông phù hợp với nghiên cứu của Orton và cộng sự (2016), cho rằng các tác động kết hợp của nước dâng do bão, sóng và dòng chảy sông có thể làm tăng diện tích ngập lụt lên tới 41% ở các hệ thống sông ven biển so với các kịch bản chỉ xem xét nước dâng do bão, ở nghiên cứu

này là 35,7%. Việc tích hợp sóng và dòng chảy sông làm tăng phạm vi ngập lụt phi tuyến tính, đặc biệt ở các khu vực trũng [Wahl và cộng sự, 2015].



Hình 3.37. Phân bố ngập lụt lớn trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản mô phỏng: Chỉ với thủy triều (a), Thủy triều và nước dâng do bão (b), Thủy triều, nước dâng do bão và nước dâng do sóng (c), Thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông (d)



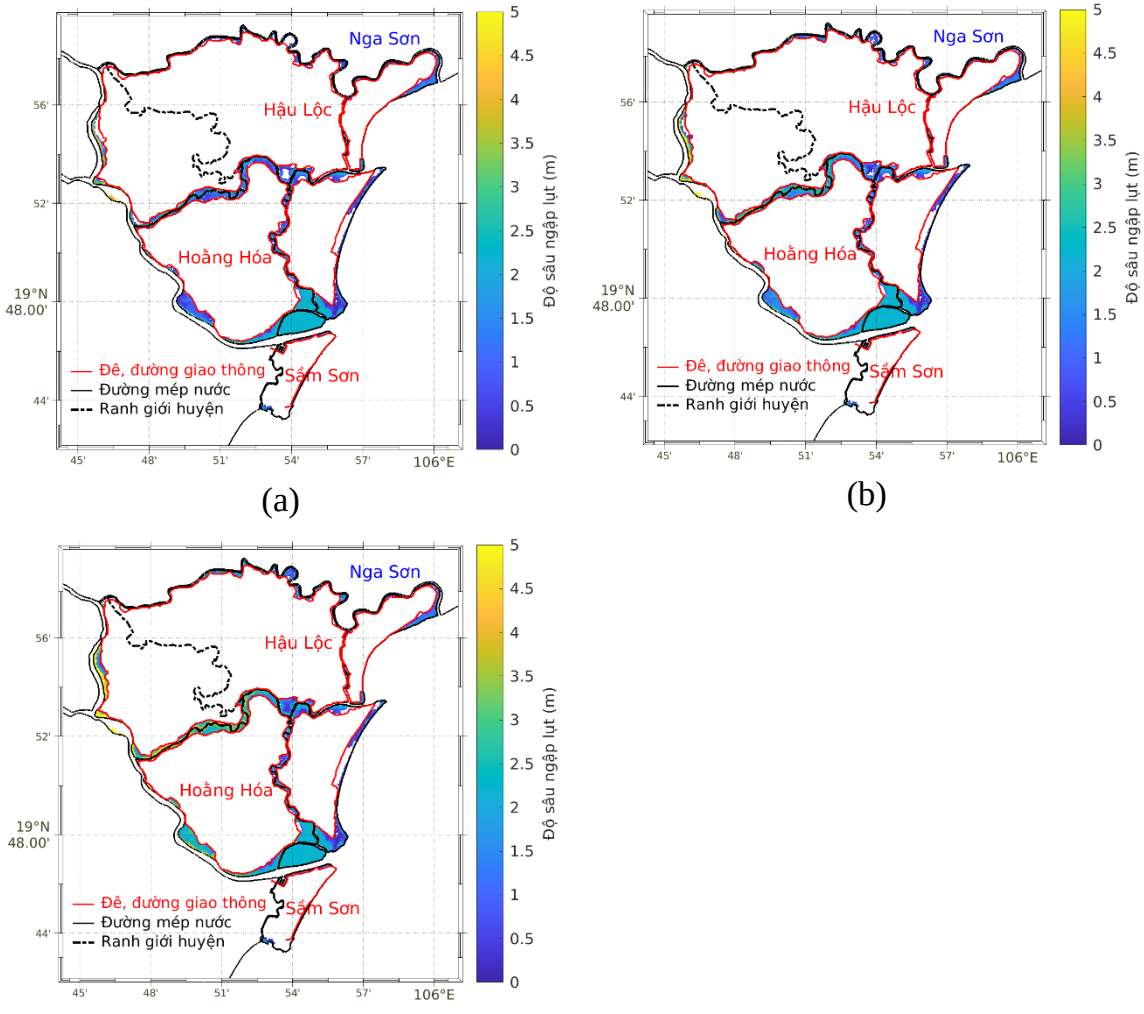
Hình 3.38. Tổng diện tích ngập do bão Doksuri (9/2017) với các phương án mô phỏng

Bảng 3.5. Thống kê diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với các kịch bản mô phỏng

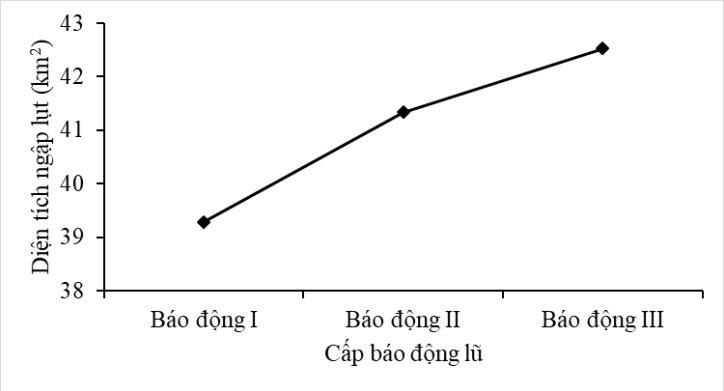
Khoảng độ sâu ngập (m)	**Diện tích bị ngập (km^2)**			
	TT	**TT+ NDDB**	**TT+ NDDB+NDDS**	**TT+ NDDB+NDDS+DCS**
<0,5 m	5,9	5,0	5,3	4,8
0,5 m - 1,0 m	14,5	5,2	5,4	6,2
1,0 m - 1,5 m	1,1	6,8	4,7	5,6
1,5 m - 2,0 m	0,0	11,3	12,5	7,4
2,0 m - 2,5 m	0,0	0,0	2,7	12,4
2,5 m - 3,0 m	0,0	0,0	0,0	0,8
3,0 m - 4,0 m	0,0	0,0	0,0	1,2
4,0 m - 5,0 m	0,0	0,0	0,0	0,0
Tổng	21,5	28,3	30.5	38,4

Để đánh giá ảnh hưởng của cấp lũ báo động trên hệ thống sông ở Thanh Hoá tới ngập lụt tại ven biển khu vực nghiên cứu, các mô phỏng được thực hiện với trường hợp bão Doksuri (9/2017) đổ bộ vào thời gian xuất hiện 03 kịch bản lũ khác nhau trên khu vực, đó là báo động I, II, III, tương ứng với mực nước tại trạm thuỷ văn Giàng

(hình 3.11) là 4,0 m (báo động I), 5,5 m (báo động II) và 6,5 m (báo động III). Phân bố ngập lụt với 03 kịch bản mô phỏng thể hiện trên hình 3.39, thống kê tổng diện tích ngập trên hình 3.40. Có thể thấy rằng, phạm vi và diện tích ngập tăng theo cấp bão động lũ, tuy nhiên, khác biệt chỉ thể hiện ở những khu vực quanh ven sông. Tổng diện tích ngập tương ứng với các cấp báo động lũ I, II và III tương ứng là 39,29 km^2, 41,34 km^2 và 42,53 km^2. Kết quả so sánh giữa trường hợp mô phỏng có và không xét tới ảnh hưởng của dòng chảy sông phân tích ở trên hình 3.36 - 3.38 cũng đã cho thấy, ảnh hưởng của dòng chảy sông tới ngập lụt là không đáng kể ở khu vực ven biển nằm xa cửa sông.

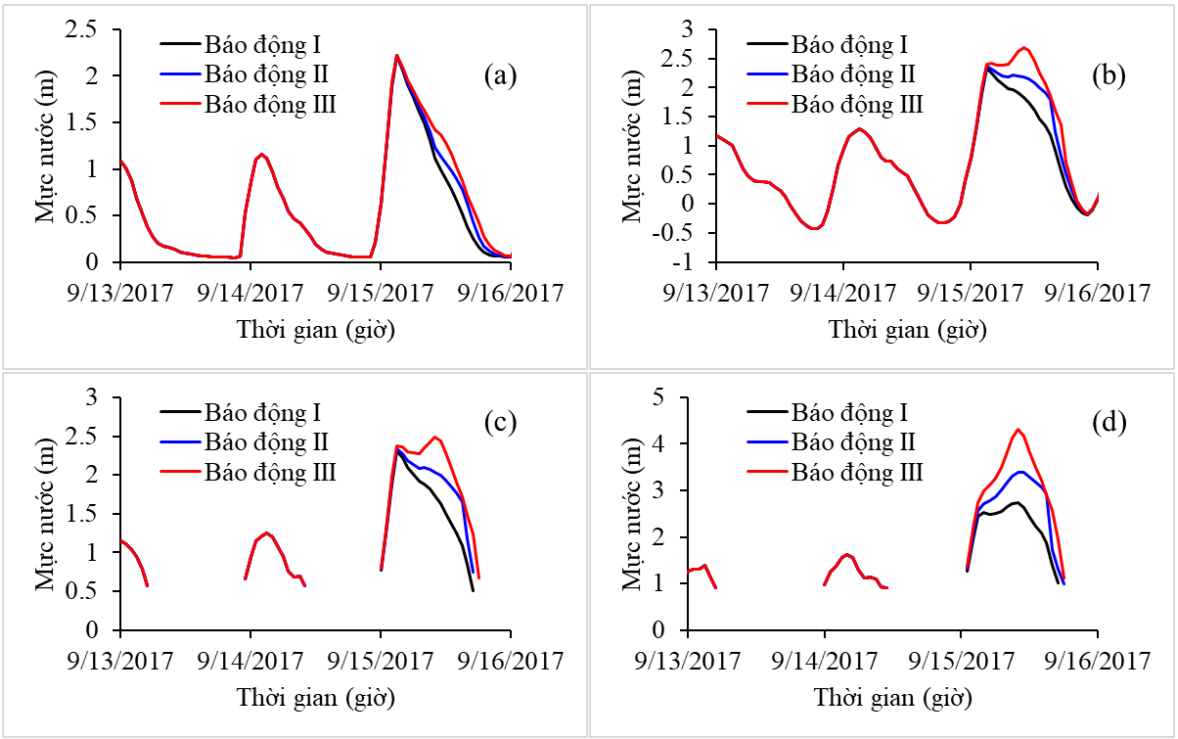


Hình 3.39. Phân bố ngập lụt lớn trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản mô phỏng về cấp lũ trên khu vực: (a) báo động I, (b) báo động II, (c) báo động III



Hình 3.40. Tổng diện tích ngập do bão Doksuri (9/2017) với các phương án mô phỏng về cấp lũ trên khu vực

Dao động mực nước trên hình 3.41 cho một số vị trí trên sông Mã theo thứ tự từ cửa biển vào MA01, MA02, QC và MA03 (hình 2.8f) cho thấy tại MA01 ảnh hưởng của lũ tới là không đáng kể, dao động mực nước tại đây chịu chi phối chính bởi thuỷ triều và nước dâng do bão. Càng vào sâu trong đất liền ảnh hưởng của cấp lũ càng rõ nét, thể hiện qua chênh lệch đỉnh mực nước, chênh lệch giữa lũ cấp báo động III và II tại MA02, QC và MA03 tương ứng là 0,15 m, 0,33 m và 0,92 m.



Hình 3.41. Dao động nước tại các MA01 (a), QC (b), MA02(c) và MA03 với kịch bản bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng khi với các cấp lũ trên khu vực

Các kết quả phân tích ở trên là cơ sở khoa học quan trọng để hiểu rõ hơn về quá trình tương tác giữa các yếu tố thuỷ động lực ở khu vực cửa sông ven biển. Đồng thời cũng cho thấy vai trò quan trọng của tương tác sông-biển đối với hiện tượng ngập lụt ven biển. Sự tương tác giữa các yếu tố thủy động lực ở đây là một quá trình phi tuyến phức tạp, quyết định trực tiếp đến mức độ ngập lụt. Các kết quả nghiên cứu này của luận án chứng minh sự cần thiết phải kết hợp đồng thời các quá trình sông-biển trong nghiên cứu mực nước cực đoan và ngập lụt khu vực cửa sông ven biển. Tuy nhiên, vẫn còn một số hạn chế cần được thảo luận ở đây để làm tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo, cụ thể như sau:

- Mặc dù đã được kiểm chứng gián tiếp thông qua yếu tố trực tiếp gây ngập như mực nước (thủy triều và nước dâng do bão), độ cao sóng (nước dâng do sóng), dòng chảy sông nhưng chưa thể hoàn toàn chứng minh được độ tin cậy của mô phỏng ngập lụt do thiếu dữ liệu mức độ ngập lụt thực tế (bản đồ phân bố độ sâu ngập và thời gian ngập) để kiểm chứng, đây là một hạn chế cần được triển khai kiểm chứng mô hình với những trường hợp có dữ liệu đầy đủ hơn.

- Việc sử dụng biên lưu lượng theo thời gian chỉ thể hiện được tác động một chiều của sông và đã bỏ qua phản hồi của biển trong tương tác sông - biển. Điều này cũng dẫn đến sai số trong quá trình truyền lũ sông, đồng thời dẫn đến sai số của đỉnh mực nước và thời gian đạt đỉnh. Hệ quả là dẫn đến sai số trong mô phỏng ngập lụt ven biển.

- Ngoài ra, nghiên cứu cũng chưa xem xét đến ảnh hưởng của một số yếu tố khác như lượng mưa cục bộ tại khu vực nghiên cứu và sóng tràn ngây ngập phía sau đê.

3.4. Tiểu kết Chương 3

Mô hình tích hợp SuWAT đã được thiết kế cho mô phỏng thuỷ triều, nước dâng do bão và sóng trên phạm vi ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và mô phỏng ngập lụt chi tiết cho khu vực ven biển Thanh Hoá (từ Hậu Lộc - Sầm Sơn). Mô hình đã được kiểm định với số liệu thuỷ triều, mực nước tổng hợp, nước dâng do bão và sóng trong

khoảng thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng và cho kết quả tin cậy. Bão Doksuri (9/2017) được lựa chọn để đánh giá tương tác giữa thuỷ triều, sóng và nước dâng do bão tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ với giả định quỹ đạo và các tham số bão khác giữ nguyên và tăng cấp bão tới cấp siêu bão. Đối với ngập lụt ven biển Thanh Hoá, ảnh hưởng của thuỷ triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông được phân tích cho trường hợp bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng. Những kết quả chính đạt được của Chương 3 có thể tóm tắt như sau:

Về tương tác giữa các yếu tố thủy triều, nước dâng và sóng tại khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ:

- Tương tác giữa thủy triều với nước dâng và sóng trong bão: Nước dâng do bão lớn nhất khi bão đổ bộ vào pha triều thấp và nhỏ nhất khi vào pha triều cao. Sự chênh lệch này càng lớn đối với các cơn bão càng mạnh, lên tới 0,32 m tại Hòn La trong trường hợp siêu bão. Ngược lại, sóng đạt độ cao lớn nhất khi bão đổ bộ vào pha thuỷ triều cao và nhỏ nhất khi vào pha thuỷ triều thấp. Mức chênh lệch độ cao sóng có thể lên tới 0,46 m trong trường hợp siêu bão.

- Tương tác sóng và nước dâng do bão đã làm gia tăng cả độ lớn nước dâng do bão và độ cao sóng ở vùng ven bờ biển, mức độ gia tăng của độ lớn nước dâng và độ cao sóng càng lớn khi bão càng mạnh và chênh lệch này thể hiện rõ hơn tại vị trí gần tâm bão. Ảnh hưởng của sóng đến nước dâng do bão mạnh nhất khi bão đổ bộ vào pha thuỷ triều thấp và nước dâng do sóng có thể lên tới 1,4 m (32,7%) trong trường hợp siêu bão. Ngược lại ảnh hưởng nước dâng do bão đến sóng lớn nhất ở pha triều cao, chênh lệch độ cao sóng khi xét tới nước dâng do bão có thể lên tới 0,95 m (24,4%) trong trường hợp siêu bão.

Về ảnh hưởng của các yếu tố thủy động lực đến ngập lụt ven biển Thanh Hóa trong trường hợp bão Doksuri (9/2017):

- Phạm vi và độ sâu ngập lụt phụ thuộc vào pha thuỷ triều tại thời điểm bão đổ bộ, mức độ ngập lụt lớn nhất khi bão đổ bộ vào pha thuỷ triều cao và nhỏ nhất trong pha thuỷ triều thấp, với chênh lệch giữa 2 trường hợp trên 28%.

- Việc xét đến sóng trong mô hình làm tăng tổng diện tích ngập khoảng 7,8% (tương đương hơn 2,2 km² diện tích ngập tăng thêm) và độ sâu ngập lụt tại vùng của sông và ven biển cũng lớn hơn so với trường hợp chỉ tính nước dâng do gió bão.

- Tương tác sông - biển: Dòng chảy lũ từ thượng nguồn sông Mã, sông Chu có vai trò quan trọng trong việc khuếch đại ngập lụt tại vùng cửa sông. Kết quả cho thấy sự kết hợp giữa nước dâng bão và lũ thượng nguồn làm mực nước tại trạm Quảng Châu tăng thêm đáng kể. Diện tích ngập lụt tăng lên 7,9 km^2 (25,9%) so với trường hợp không xét đến ảnh hưởng của dòng chảy sông. Sự kết hợp của sóng và dòng chảy sông có thể làm tăng diện tích ngập lụt lên thêm 10,1 km^2 (35,7%) so kịch bản chỉ xem xét nước dâng do bão. Điều này nhấn mạnh sự cần thiết và vai trò quan trọng của việc xem xét đầy đủ ảnh hưởng của sóng và dòng chảy sông khi tính toán, cũng như trong quy hoạch và ứng phó với ngập lụt ven biển.

CHƯƠNG 4: NGUY CƠ NGẬP LỤT TẠI VEN BIỂN THANH HÓA DO NƯỚC DÂNG DO BÃO TRONG BỐI CẢNH BIỂN ĐỔI KHÍ HẬU

Những năm gần đây, diễn biến thiên tai khí tượng thuỷ văn biển ngày càng trở bất thường và cực đoan dẫn tới nguy cơ ngập lụt vùng ven biển ngày càng trở nên phức tạp và khó lường hơn. Sự xuất hiện đồng thời của bão mạnh, triều cường và sóng lớn đang tạo ra những kỷ lục mực nước mới, đe dọa trực tiếp đến an toàn của hệ thống đê biển và sinh kế người dân. Trong bối cảnh mực nước biển dâng do biến đổi khí hậu, nền địa hình ven bờ thay đổi và cường độ bão có xu hướng mạnh lên, do vậy, câu hỏi đặt ra là các công trình bảo vệ ven biển hiện tại có đảm bảo an toàn cho khu vực ven biển không. Chính vì vậy, cần nghiên cứu đánh giá nguy cơ ngập lụt vùng ven biển theo kịch bản các cấp bão mạnh đổ bộ để có thông tin hỗ trợ công tác bảo vệ, quản lý, quy hoạch và phát triển bền vững vùng ven biển.

Trong Chương này, sẽ tập trung vào đánh giá nguy cơ ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa do nước dâng do bão ở giai đoạn khí hậu hiện tại (1951-2010) và tương lai (năm 2050 và 2100) có xét tới mực nước biển dâng do biến đổi khí hậu và sự thay đổi của cường độ bão. Trước khi thực hiện các mô phỏng và phân tích về nguy cơ ngập lụt tại khu vực nghiên cứu, bão trên vịnh Bắc Bộ và nước dâng do bão tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ được phân tích, đánh giá và so sánh trong hai giai đoạn khí hậu nêu trên để thấy được nguy cơ về ngập lụt do nước dâng do bão ở khu vực trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng. Trong đó, dữ liệu về bão ở hai giai đoạn được thu thập từ mô hình MRI–CGCM3 sử dụng kịch bản phát thải cao nhất (RCP 8.5) [Mizuta và cộng sự, 2017].

4.1. Xu thế hoạt động của bão trên vịnh Bắc Bộ và nước dâng do bão tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ ở giai đoạn khí hậu hiện tại và tương lai

Nghiên cứu, phân tích dữ liệu bão d4PDF cho thấy dữ liệu bão mô phỏng từ mô hình MRI–CGCM3 trên Biển Đông cho giai đoạn 1951–2010 khá tương đồng với dữ liệu từ JMA cả về tổng số cơn bão, quỹ đạo di chuyển, phân bố số lượng và cường độ bão theo không gian và thời gian [Nguyễn Phương Anh và cộng sự, 2022]. Cụ thể,

về số lượng bão trên Biển Đông, kết quả phân tích cho thấy số lượng cơn bão của từ dữ liệu MRI–CGCM3 là 681 cơn, khá sát với số lượng bão thực tế (từ JMA) là 683 cơn. Phân bố theo không gian số lượng bão trên phạm vi Biển Đông cũng khá đồng nhất, hình thành chủ yếu ở vĩ tuyến từ 5^{o}N - 25^{o}N và hoạt động chủ yếu trong phạm vi 10^{o}N - 40^{o}N; 110^{o}E -150^{o}E với hai dạng quỹ đạo chính là theo hướng Tây đến Tây Bắc và Đông Bắc. Ngoài ra, về xu thế hoạt động của bão trên Biển Đông, ở giai đoạn khí hậu tương lai, số lượng bão yếu và trung bình có xu thế giảm nhưng số lượng bão mạnh và rất mạnh có xu thế tăng so với giai đoạn khí hậu hiện tại. Kết của nghiên cứu về bão trên Biển Đông cũng tương đồng với các nghiên cứu phân tích dữ liệu bão từ mô hình MRI–CGCM3 ở hai giai đoạn này cho toàn bộ khu vực Tây Bắc Thái Bình Dương [Yoshida và cộng sự, 2017], [Ishii và Mori, 2020].

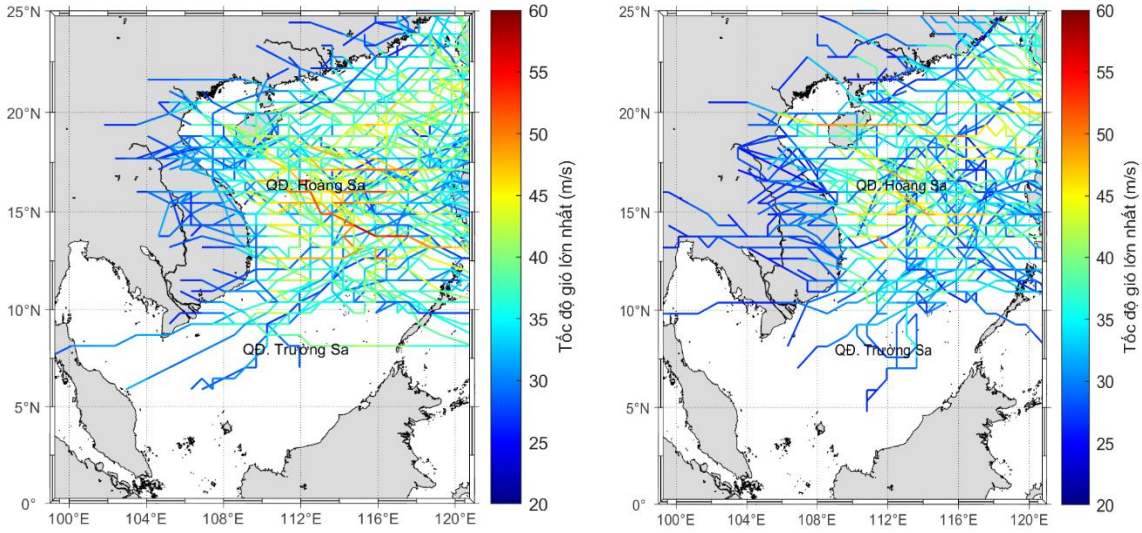
Trong nghiên cứu này sẽ tập trung phân tích chi tiết về xu thế hoạt động của bão trên phạm vi vịnh Bắc Bộ (105-109^{o}E, 17-20^{o}N) ở hai giai đoạn này để thấy được nguy cơ về nước dâng do bão và ngập lụt tại khu vực nghiên cứu.

Kết quả thống kê số liệu bão hoạt động trên phạm vi vịnh Bắc Bộ ở hai giai đoạn khí hậu và được chia theo khoảng các cấp bão thể hiện trên bảng 4.1. Kết quả thống kê trên bảng 4.1 cho thấy, so với giai đoạn khí hậu hiện tại, tổng số lượng bão cũng như số lượng bão từ cấp 8-11 ở giai đoạn khi hậu tương lai giảm, trong khi đó số lượng bão mạnh (từ cấp 12 trở lên) lại tăng.

Kết quả thống kê quỹ đạo cho bão từ cấp 12 trở lên trong phạm vi vịnh Bắc Bộ trong hai giai đoạn trên hình 4.1 cho thấy, so với giai đoạn khí hậu hiện tại, ở giai đoạn khí hậu tương lai bão mạnh có xu hướng tập trung xuống phía nam nhiều hơn.

Bảng 4.1. Số lượng bão hoạt động trên vịnh Bắc Bộ theo cấp bão trong giai đoạn khí hậu hiện tại (1951-2010) và tương lai (2051-2100). Số liệu của mô hình MRI–CGCM3.

Cấp bão	Giai đoạn 1951 – 2010	Giai đoạn 2051 – 2110
Cấp 8 - 11 (17,2 - 32,6 m/s)	78	41
Cấp 12 - 13 (32,7 - 41,4 m/s)	6	8
Trên cấp 13 (trên 41,4 m/s)	0	3

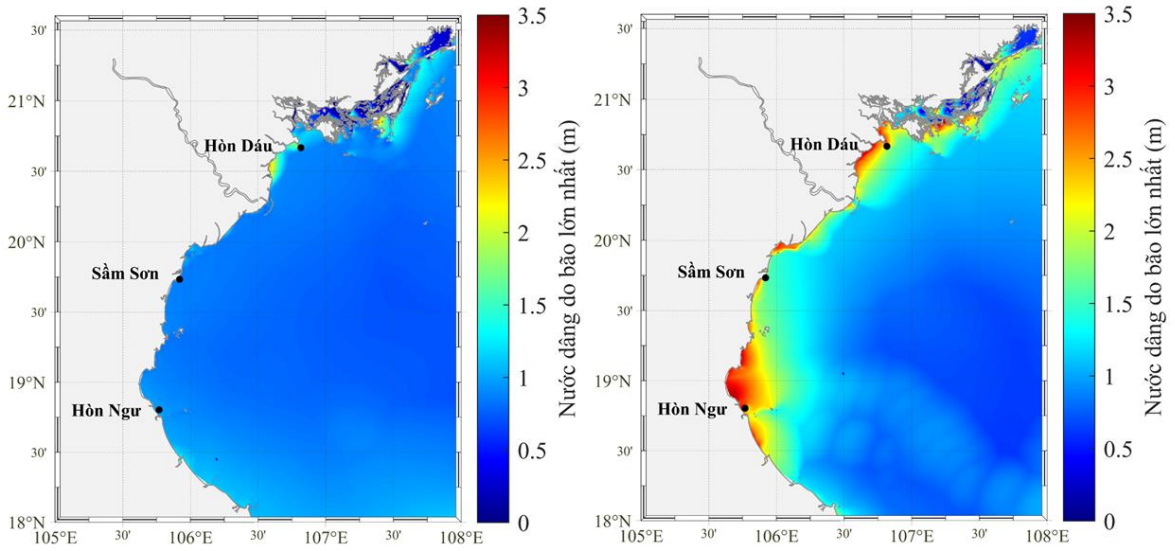


(a) Giai đoạn 1951 – 2010 (b) Giai đoạn 2051 – 2110

Hình 4.1. Quỹ đạo bão mạnh (từ cấp 12): (a) trong giai đoạn 1951–2010 và (b) giai đoạn 2051–2110. Số liệu của mô hình MRI–CGCM3

Để có được bức tranh về xu thế nước dâng do bão trên dải ven bờ tây vịnh Bắc Bộ trong 2 giai đoạn khí hậu hiện tại và tương lai, nghiên cứu này sử dụng mô hình SuWAT (đã đề cập tại Chương 2 và 3) để tính nước dâng do bão cho tất cả các cơn bão được mô phỏng từ mô hình MRI–CGCM3 đổ bộ vào khu vực trong 2 giai đoạn này. Trên hình 4.2 thể hiện phân bố nước dâng do bão lớn nhất trên vùng biển ven bờ tây vịnh Bắc Bộ trong hai giai đoạn này, giai đoạn khí hậu hiện tại (hình 4.2a) và giai đoạn khí hậu tương lai (Hình 4.2b). Có thể thấy rằng, trong giai đoạn khí hậu hiện tại, nước dâng do bão lớn tập trung ở phía bắc của vịnh Bắc Bộ (Quảng Ninh - Nam Định) với độ lớn nước dâng lớn nhất lên tới gần 3,0 m. Trên thực tế, trong giai đoạn này số liệu quan trắc tại trạm Hòn Dấu đã ghi nhận nhiều cơn bão gây nước dâng hơn 1,0 m như bão Frankie (7/1996) là 1,2 m, bão Niki (8/1996) 1,3 m, bão Damrey (9/2005) là 1,3 m. Nhiều vị trí khác trong khu vực có thể có nước dâng do bão tới gần 3,0 m nhưng đã không ghi nhận được do không có trạm đo. Kết quả mô phỏng nước dâng do bão lớn nhất giai đoạn khí hậu tương lai trên hình 4.2b cho thấy, nước dâng do bão lớn hơn tại hầu hết các vị trí trong khu vực và vùng có nước dâng lớn dịch xuống phía Nam (Nghệ An - Hà Tĩnh) với độ cao nước dâng lớn nhất tới gần 3,5 m. Ven bờ Nghệ

An - Hà Tĩnh trong giai đoạn 2051–2110 có nước dâng do bão cao do bởi trong giai đoạn này có nhiều bão mạnh đổ bộ, ngoài ra đây là vùng biển lõm, tạo thuận lợi gây nước dâng cao hơn so với khu vực ven bờ lân cận. Các kết quả này phù hợp các nghiên trước đây của [Shimura và Mori, 2023], cho rằng các sự kiện sóng lớn và nước dâng cực đoan tại khu vực Tây Bắc Thái Bình Dương có xu hướng gia tăng.



(a) Giai đoạn 1951 – 2010 (b) Giai đoạn 2051 – 2110

Hình 4.2. Phân bố nước dâng do bão lớn nhất tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ trong giai đoạn khí hậu hiện tại 1951–2010 (a) và tương lai 2051–2110 (b)

4.2. Nguy cơ ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa

Kịch bản ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa ở giai đoạn khí hậu hiện tại và tương lai được mô phỏng và đánh giá theo 06 cấp bão đổ bộ và gây nước dâng tại khu vực nghiên cứu, bao gồm: cấp 10, cấp 11, cấp 12, cấp 13, cấp 14 và cấp 15. Thông tin về kịch bản mô phỏng cho các cấp bão thể hiện trên bảng 4.2, trong đó cấp bão được xác định theo khí áp và mô hình bão giải tích của Fujii và Mitsuta (1986) (mục 2.2.7) mô tả mối liên hệ này. Do không có mối liên hệ chặt chẽ giữa cấp bão với tốc độ di chuyển và bán kính gió mạnh nhất, vì vậy để tiện lợi cho phân tích ảnh hưởng của cấp bão (thông qua khí áp) tới ngập lụt, các tham số bão khác được giữ nguyên và mô hình bão giải tích của Fujii và Mitsuta (1986) thực hiện mô phỏng trường gió và khí áp cho các kịch bản cấp bão. Lý do luận án chọn bão tới cấp 15 để mô phỏng ngập

lụt tại khu vực do bởi khu vực ven biển Bắc Trung Bộ có khả năng xuất hiện bão cấp 15 [Nguyễn Văn Hưởng, 2017]. Bên cạnh đó, dữ liệu bão từ mô hình MRI–CGCM3 cũng cho khí áp tâm bão ở giai đoạn khí hậu tương lai xuống tới 927 hPa, tương đương khí áp bão cấp 15-16. Về lựa chọn quỹ đạo đổ bộ, trên cơ sở phân tích về phân bố quỹ đạo bão ở giai đoạn khí hậu hiện tại và tương lai, cũng như đánh giá quỹ đạo bão có khả năng gây nước dâng do bão lớn nhất tại khu vực nghiên cứu, luận án lựa chọn quỹ đạo bão giả định như hình 2.8c (Chương 2) để mô phỏng. Do chưa có thông tin về quy hoạch nâng cấp đê biển tại khu vực nghiên cứu tới năm 2050 và 2100 cũng như những dự báo xa về sụt, lún địa hình và kịch bản lũ trên khu vực, vì vậy để có sự so sánh đồng nhất về xu thế ngập lụt ven biển với từng cấp bão đổ bộ và với kịch bản nước biển dâng đã được công bố, chính vì vậy, trong nội dung này sử dụng dữ liệu địa hình và công trình bảo vệ bờ biển ở giai đoạn hiện tại để mô phỏng cho tất cả các kịch bản. Chính vì vậy, các kết quả mô phỏng ngập lụt ở giai đoạn khí hậu tương lai sẽ có ý nghĩa định tính nhiều hơn. Ở giai đoạn khí hậu hiện tại, địa hình và các yếu tố khác như đê biển tại khu vực được xác định ở thời điểm năm 2023 như đã mô tả tại Chương 2.

Với giai đoạn khí hậu tương lai, các tính toán sẽ được thực hiện riêng cho năm 2050 và 2100, tương ứng với mực nước biển trung bình dâng 26 cm và 72 cm ứng với kịch bản phát thải cao RCP8.5, theo công bố trong Kịch bản biến đổi khí hậu, được Bộ Tài nguyên và Môi trường (nay là Bộ Nông nghiệp và Môi trường) công bố năm 2020 [Bộ TN&MT, 2020]. Do vậy, địa hình năm 2050 và 2100 sẽ được xác định đơn giản hoá bằng cách từ địa hình năm 2023 cộng thêm độ cao mực nước 26 cm và 72 cm, tương ứng cho năm 2050 và 2100, các yếu tố khác được giữ nguyên như điều kiện năm 2023. Như vậy, sẽ có tổng số 18 kịch bản được mô phỏng, gồm 6 kịch bản hiện trạng, 6 kịch bản vào năm 2050 và 6 kịch bản vào năm 2100. Mô hình tích hợp SuWAT có xét tới ảnh hưởng của sóng biển được ứng dụng để mô phỏng cho tất cả kịch bản cấp bão đổ bộ vào pha triều cường, ảnh hưởng của lũ và sóng tràn tại khu vực không được xem xét (như đã phân tích ở trên). Ở cả 03 giai đoạn mô phỏng, phần đất được xác định là ngập khi mực nước tổng cộng ở mỗi ô lưới cao hơn mực nước

biển trung bình ở giai đoạn hiện tại. Như vậy, ngay cả trường hợp không có bão ảnh hưởng, vào năm 2050 và 2100 một số khu vực trũng ven biển cũng được xác định là ngập do mực nước biển trung bình dâng lên.

Bảng 4.2. Bảng thông số của các cấp bão áp dụng trong tính toán nguy cơ ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa

TT	Cấp bão	Khí áp tại tâm bão (hPa)	Bán kính gió lớn nhất (km)	Tốc độ di chuyển (km/h)
1	10	984	50	15
2	11	980	50	15
3	12	976	50	15
4	13	954	50	15
5	14	948	50	15
6	15	940	50	15

Từ các kết quả mô phỏng về phân bố ngập lụt theo không gian và thống kê diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với từng cấp bão ở hiện tại, năm 2050 và năm 2100, tương ứng trên các hình 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 và các bảng 4.3, 4.3, 4.5 và 4.6, có thể đưa ra nhận xét, đánh giá về nguy cơ ngập tại khu vực như sau:

- Ở cả 3 giai đoạn (hiện tại, năm 2050, 2100), mức độ ngập lụt tại khu vực nghiên cứu tăng theo cấp bão. Ở giai đoạn hiện tại, cường độ bão nhỏ hơn cấp 13 chưa gây ngập bên trong các tuyến đê ở Hậu Lộc, Hoằng Hóa và Sầm Sơn. Với bão cấp 13, mực nước biển đã bắt đầu tràn đê ở Hoằng Hóa, trong khi đó tại Hậu Lộc và Sầm Sơn, mực nước vẫn thấp hơn cao trình đê. Với bão cấp 14, 15, mực nước biển tại Hậu Lộc và Sầm Sơn đã vượt cao trình đê và gây ngập phía sau đê. Nhận định trên có thể kiểm tra qua dao động mực nước tại 03 vị trí HL02, HH02 và SS01 với các cấp bão đổ bộ trên hình 4.7.

- Với cùng một cấp bão đổ bộ, phạm vi và độ sâu ngập sẽ tăng theo giai đoạn: hiện tại, năm 2050 và năm 2100, do mực nước biển trung bình tăng, thủy triều kết hợp với nước dâng do bão và nước dâng do sóng sẽ lấn sâu hơn vào trong đất liền

(Hình 4.3, 4.4, 4.5, Bảng 4.6). Với cùng bão cấp 10 đổ bộ, so với ở thời điểm hiện tại, tổng diện tích ngập lụt năm 2050 và 2100 tăng tương ứng từ 36,6 km^2 lên 38,77 km^2 (1,06 lần) và 42,64 km^2 (1,17 lần) và tỷ lệ này tăng theo cấp bão, trong đó với bão cấp 15 tổng diện tích ngập hiện tại là 158,49 km^2, tăng lên 190,75 km^2 (1,20 lần) và 260,99 km^2 (1,65 lần), tương ứng cho năm 2050 và 2100 (Hình 4.6).

- Với bão cấp 10 đổ bộ, kể cả ở hiện tại và năm 2050 và 2100, phạm vi ngập chỉ ở vùng đất ngoài đê biển và phần đất ngoài đê dọc theo sông do mực nước tổng hợp (nước dâng do bão, thủy triều và mực nước dâng do biến đổi khí hậu) chưa vượt cao trình đê.

- Với bão cấp 11, đã xuất hiện ngập tại một số vị trí bên trong đê biển Hoằng Hóa trong trường hợp bão đổ bộ thời điểm năm 2100 (Hình 4.5b), do mực nước biển tại đây lớn hơn cao trình đê (Hình 4.8a). Khi cường độ bão cấp 12, mực nước biển tại Hoằng Hóa sẽ vượt cao trình đê kể cả ở giai đoạn hiện tại và phạm vi ngập lụt tăng theo ở các năm 2050 và năm 2100 (Hình 4.3c, 4.4c, 4.5c, 4.8b).

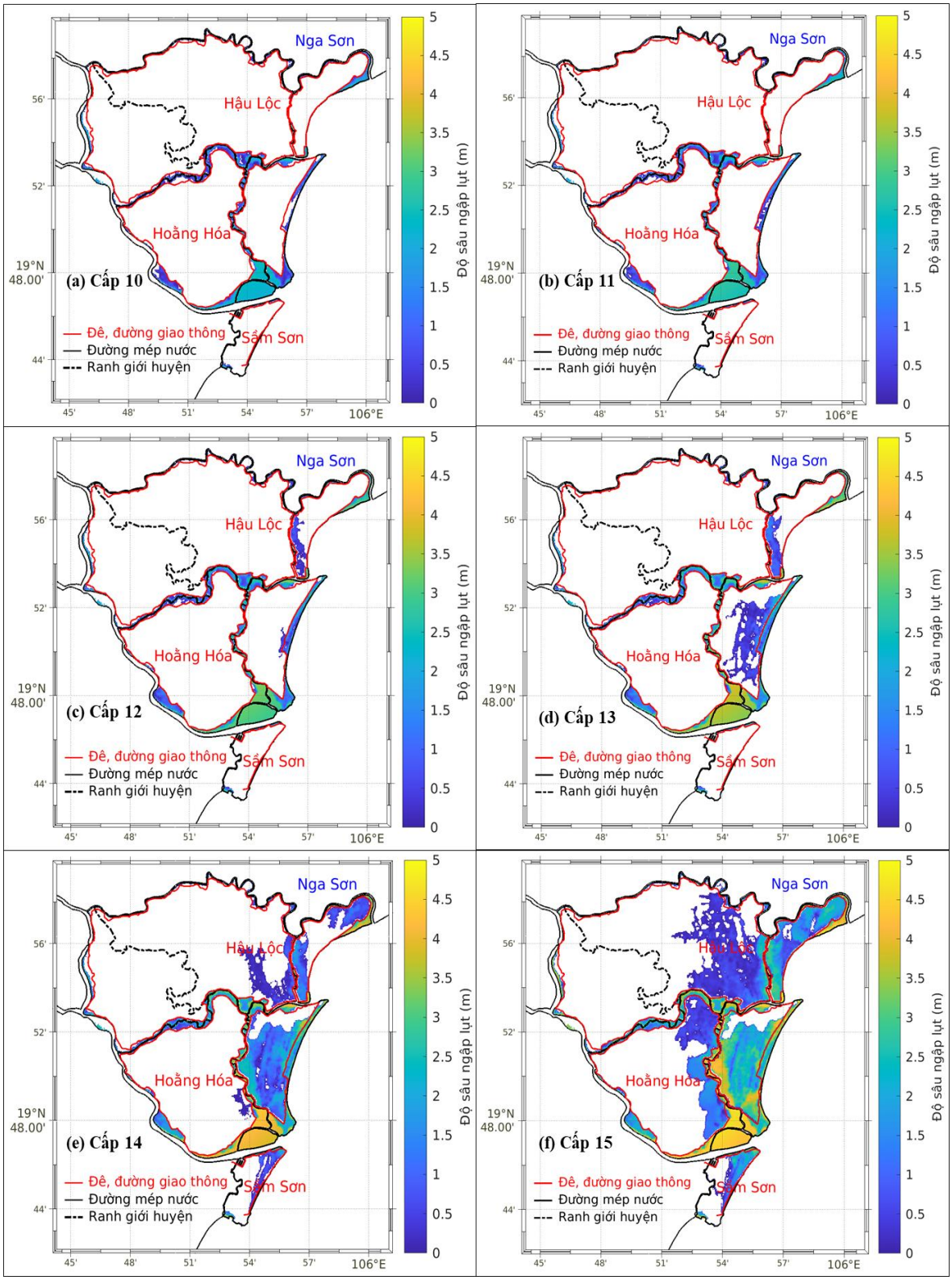
- Với bão cấp 13 đổ bộ vào năm 2100 sẽ gây ngập tại phía sau đê khu vực bắc Hậu Lộc và phần lớn sau đê biển Sầm Sơn (Hình 4.5d). Dao động mực nước tại Hậu Lộc 2 (HL02) và Sầm Sơn 1 (SS01) với trường hợp bão cấp 13 đổ bộ ở hiện tại, năm 2050 và 2100 trên hình 4.9 cho thấy mực nước biển đã vượt cao trình đê tại Hậu Lộc và Sầm Sơn.

- Với bão cấp 14, ở cả hiện tại và năm 2050 và 2100, bão sẽ gây ngập một số khu vực phía sau đê ở phía bắc Hậu Lộc và Sầm Sơn (Hình 4.3e, 4.4e và 4.5e). Dao động mực nước tại HL02 và SS01 với bão cấp 14 đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và 2100 trên hình 4.10 cho thấy mực nước biển đã vượt cao trình đê ở cả 3 giai đoạn tính toán.

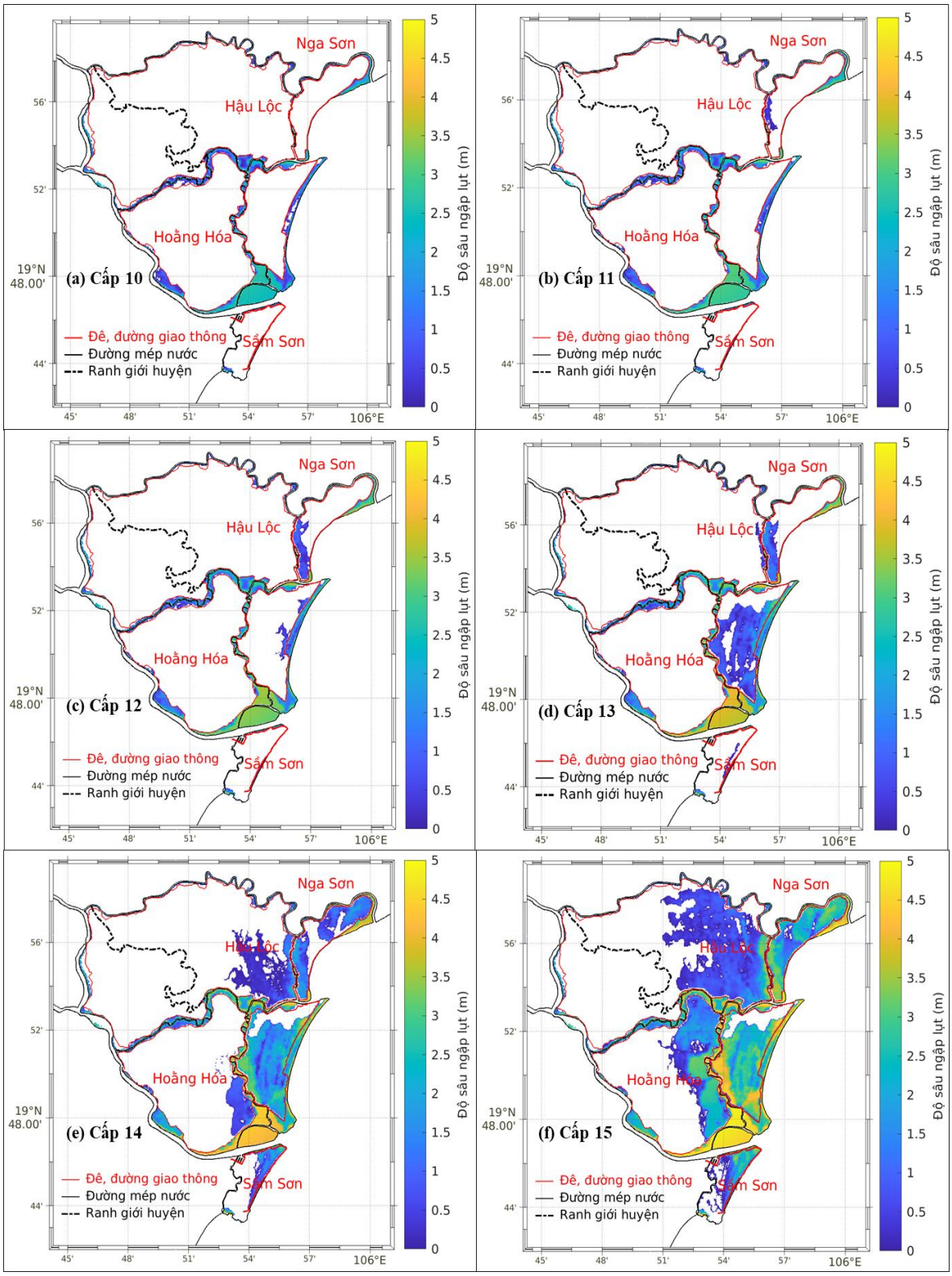
- Khi bão cấp 15 đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, khoảng hơn 1/3 diện tích của Hậu Lộc, Hoằng Hóa và Sầm Sơn sẽ bị ngập (Hình 4.3f). Nếu bão cấp 15 đổ bộ vào năm 2050 khoảng gần 1/2 diện tích các khu vực này sẽ ngập (Hình 4.4f). Vào năm 2100, nếu bão cấp 15 đổ bộ, hơn 50% diện tích Hậu Lộc, gần 80% diện tích Hoằng Hóa và Sầm Sơn sẽ bị ngập (Hình 4.5f).

- Về độ sâu ngập, phân bố ngập độ sâu lớn nhất ở cả 3 giai đoạn tính toán trên các hình 4.3, 4.4, 4.5 và kết quả thống kê trên các bảng 4.3, 4.4 và 4.5 cho thấy, các khu vực có ngập lụt sâu tập trung ở bên bờ phải của cửa sông Mã và lưu vực hai phía của nam sông Cung với độ sâu ngập khoảng 4,0-5,0 m. Kết quả kiểm tra tại hai vị trí, sông Mã 02 (MA02) và Hậu Lộc 02 (HL02) trên hình 4.11 cho thấy bão cấp 15 đã gây ngập tại MA02 và HL02 khoảng 3,5-4,0 m. Trong khi đó, chỉ bão cấp 14, 15 đổ bộ vào năm 2050 và 2100 mới gây ngập trên 5,0 m ở một số khu vực, nhưng diện tích không lớn (Bảng 4.3, 4.4, 4.5).

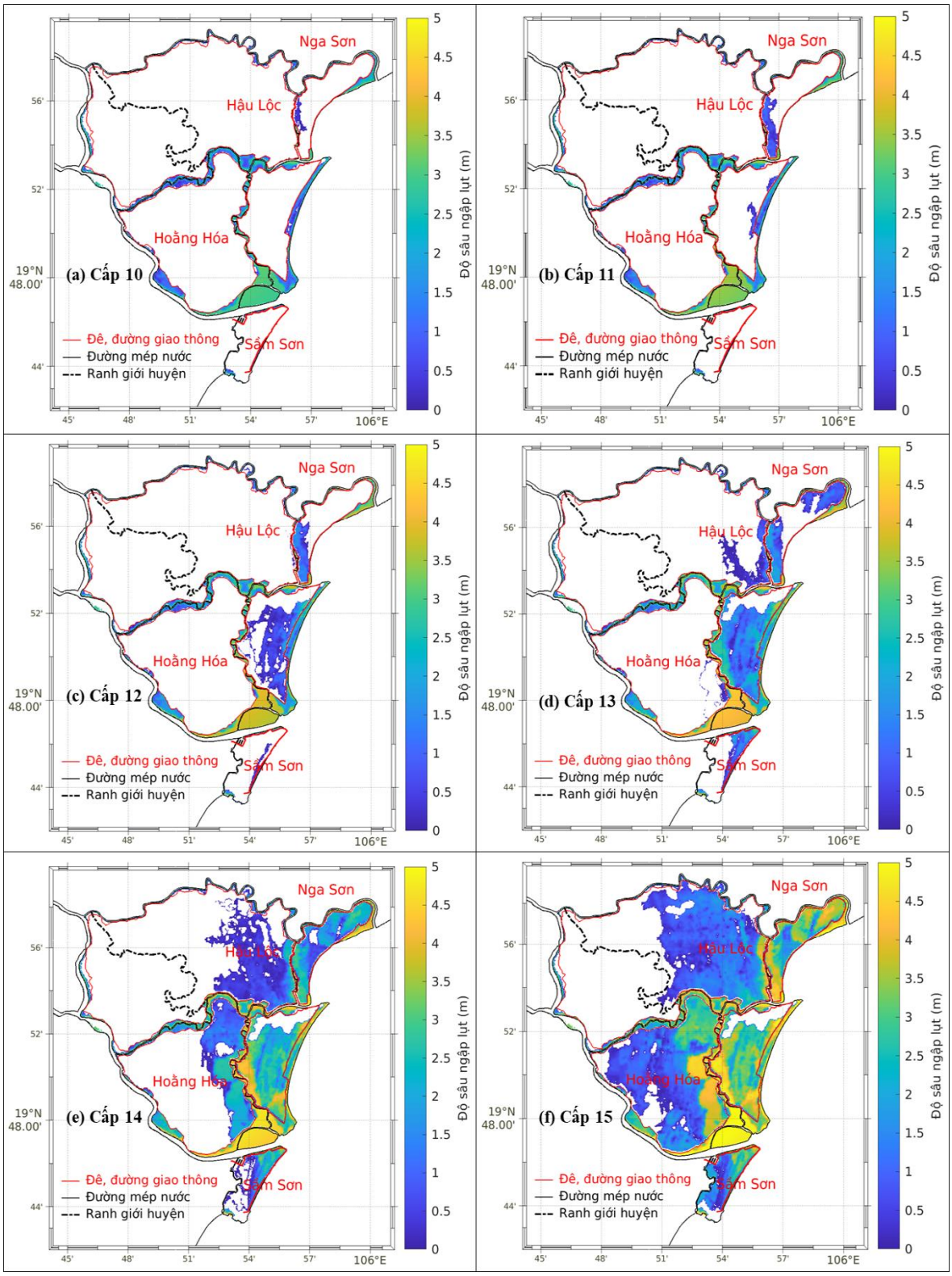
Như vây, với giả thiết là hệ thống đê biển và các công trình hạ tầng khác được giữ nguyên như hiện trạng năm 2023 cho các kịch bản tương lai (năm 2050 và 2100), đại diện cho kịch bản rủi ro cao nhất khi không có các biện pháp thích ứng về cơ sở hạ tầng được triển khai. Các kết quả ngập lụt dự báo trong các kịch bản này thể hiện mức độ nguy cơ tiềm tàng đối với khu vực ven biển tỉnh Thanh Hóa.



Hình 4.3. Phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất tại khu vực nghiên cứu với các cấp bão (cấp 10–15) đổ bộ ở giai đoạn hiện tại



Hình 4.4. Phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất tại khu vực nghiên cứu với các cấp bão (cấp 10–15) đổ bộ năm 2050



Hình 4.5. Phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất tại khu vực nghiên cứu với các cấp bão (cấp 10–15) đổ bộ năm 2100

Bảng 4.3. Diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với các cấp bão (cấp 10-15) đổ bộ ở giai đoạn hiện tại

Độ sâu ngập	**Diện tích ngập lụt theo cấp bão (km^2)**					
	Cấp 10	**Cấp 11**	**Cấp 12**	**Cấp 13**	**Cấp 14**	**Cấp 15**
< 0,5 m	5,90	4,07	5,31	12,63	19,33	38,80
0,5 m - 1,0 m	5,51	6,19	5,88	7,85	16,33	19,96
1,0 m - 1,5 m	5,39	5,60	6,48	7,62	14,42	14,65
1,5 m - 2,0 m	6,44	5,24	5,40	6,51	11,32	19,13
2,0 m - 2,5 m	12,87	5,83	4,64	5,28	9,60	17,98
2,5 m - 3,0 m	0,49	11,33	6,65	4,55	5,42	16,23
3,0 m - 4,0 m		0,47	9,45	14,58	10,95	15,89
4,0 m - 5,0 m				0,35	8,92	15,35
> 5,0 m						0,51
Tổng	**36,60**	**38,74**	**43,82**	**59,37**	**96,30**	**158,49**

Bảng 4.4. Diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với các cấp bão (cấp 10-15) đổ bộ ở năm 2050

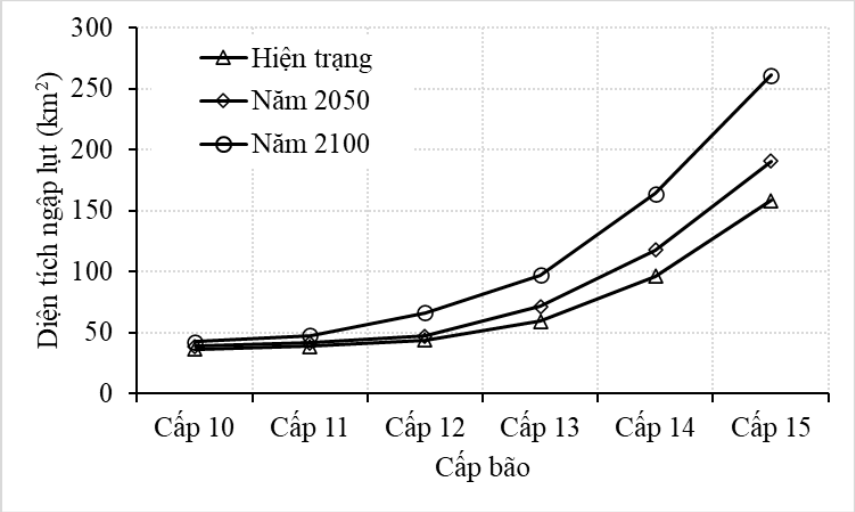
Độ sâu ngập	**Diện tích ngập lụt theo cấp bão (km^2)**					
	Cấp 10	**Cấp 11**	**Cấp 12**	**Cấp 13**	**Cấp 14**	**Cấp 15**
< 0,5 m	4,42	4,07	4,60	11,65	24,46	36,93
0,5 m - 1,0 m	6,19	5,56	6,63	15,13	15,54	32,26
1,0 m - 1,5 m	5,24	6,14	6,44	8,75	16,26	17,16
1,5 m - 2,0 m	5,80	5,52	5,83	7,65	18,05	15,93
2,0 m - 2,5 m	8,78	5,58	5,47	6,14	11,19	20,86
2,5 m - 3,0 m	8,34	10,58	4,96	4,46	8,42	23,84
3,0 m - 4,0 m		4,19	13,19	15,98	11,54	23,98
4,0 m - 5,0 m				1,73	12,07	18,71
> 5,0 m					0,11	1,09
Tổng	**38,77**	**41,64**	**47,12**	**71,48**	**117,62**	**190,75**

Bảng 4.5. Diện tích ngập theo các khoảng độ sâu ngập với các cấp bão (cấp 10-15) đổ bộ năm 2100

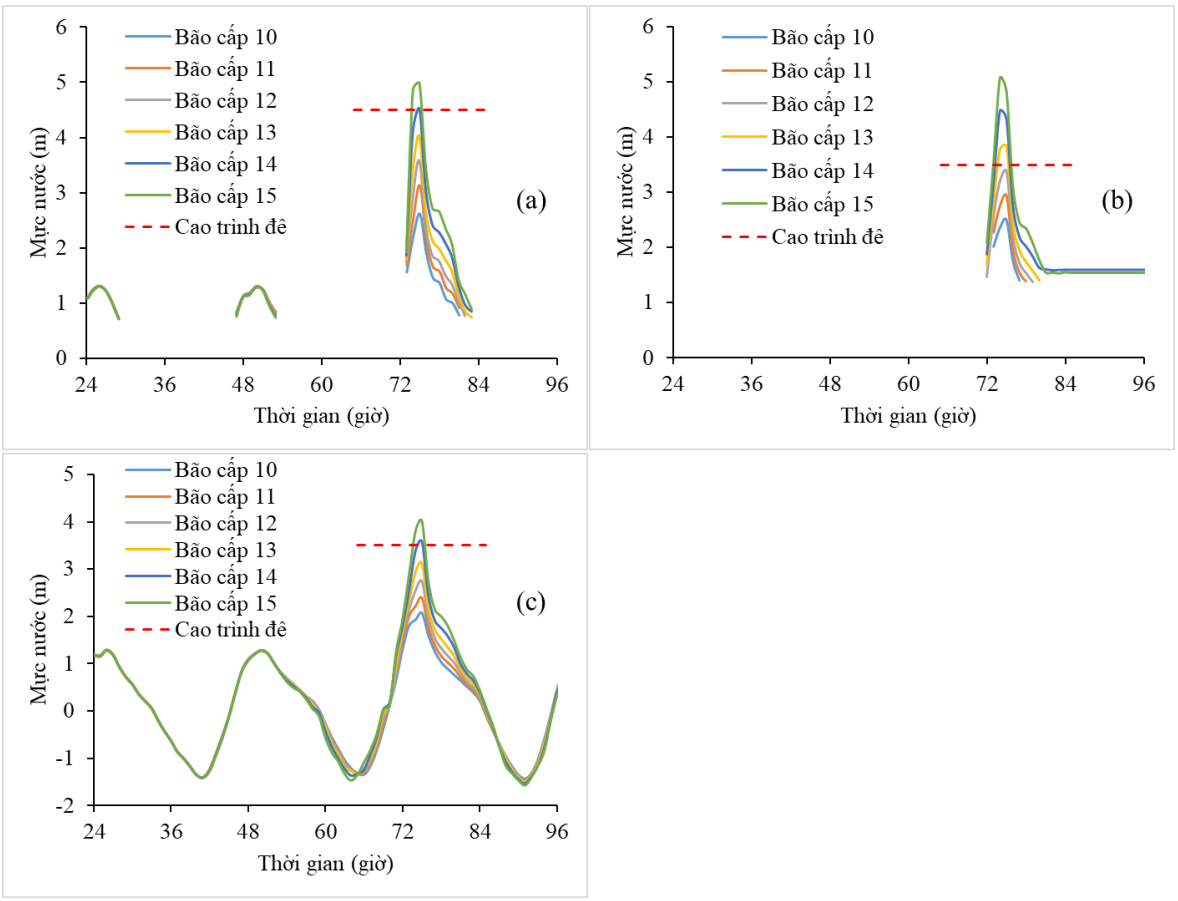
Độ sâu ngập	**Diện tích ngập lụt theo cấp bão (km^2)**					
	Cấp 10	**Cấp 11**	**Cấp 12**	**Cấp 13**	**Cấp 14**	**Cấp 15**
< 0,5 m	3,39	4,09	13,33	14,26	35,38	30,23
0,5 m - 1,0 m	4,87	5,93	8,68	12,91	18,76	47,85
1,0 m - 1,5 m	6,37	6,28	7,80	15,75	13,97	46,61
1,5 m - 2,0 m	5,21	5,92	7,34	13,50	14,61	21,09
2,0 m - 2,5 m	5,89	5,36	5,97	10,22	22,82	14,01
2,5 m - 3,0 m	10,43	6,22	5,59	8,86	22,76	23,31
3,0 m - 4,0 m	6,48	14,01	16,95	9,87	16,88	44,66
4,0 m - 5,0 m			0,86	11,70	17,93	27,30
> 5,0 m					0,68	5,92
Tổng	**42,64**	**47,82**	**66,51**	**97,08**	**163,78**	**260,99**

Bảng 4.6. Tỉ lệ gia tăng của tổng diện tích ngập theo các cấp bão (cấp 10-15) đổ bộ ở năm 2050 và năm 2100 so với hiện tại

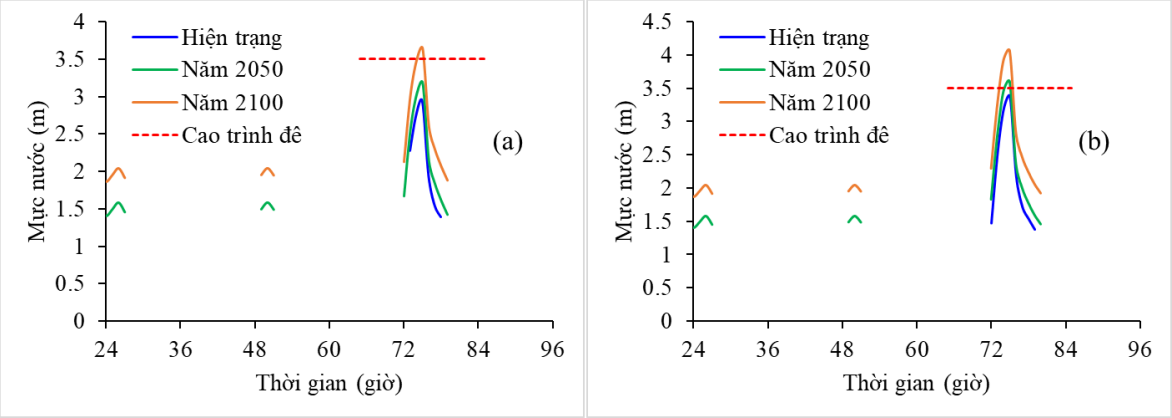
Năm (Nước biển dâng)	**Mức tăng diện tích ngập lụt do nước biển dâng so với hiện tại (%)**					
	Cấp 10	**Cấp 11**	**Cấp 12**	**Cấp 13**	**Cấp 14**	**Cấp 15**
2050 (26 cm)	5,9	7,5	7,5	20,4	22,1	20,4
2100 (72 cm)	16,5	23,4	51,8	63,5	70,1	64,7



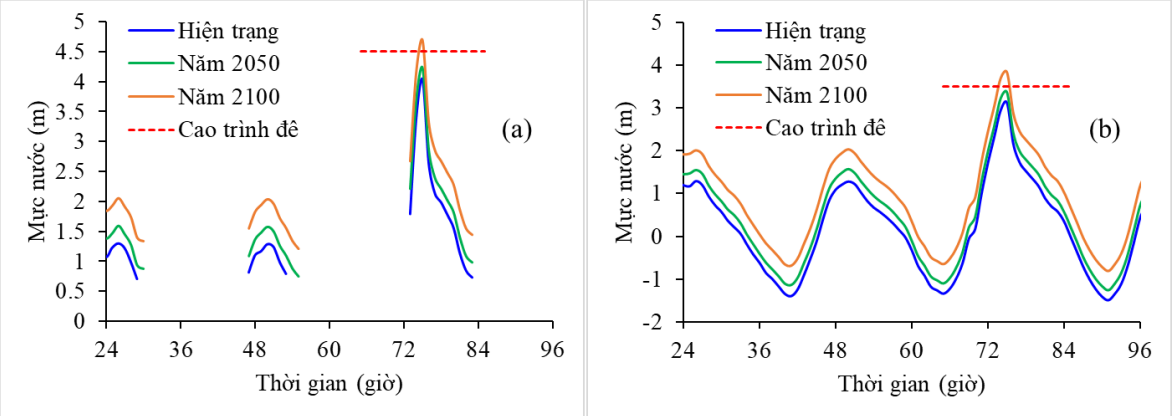
Hình 4.6. Tổng diện tích ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa với các cấp bão từ 10 đến 15, đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và năm 2100



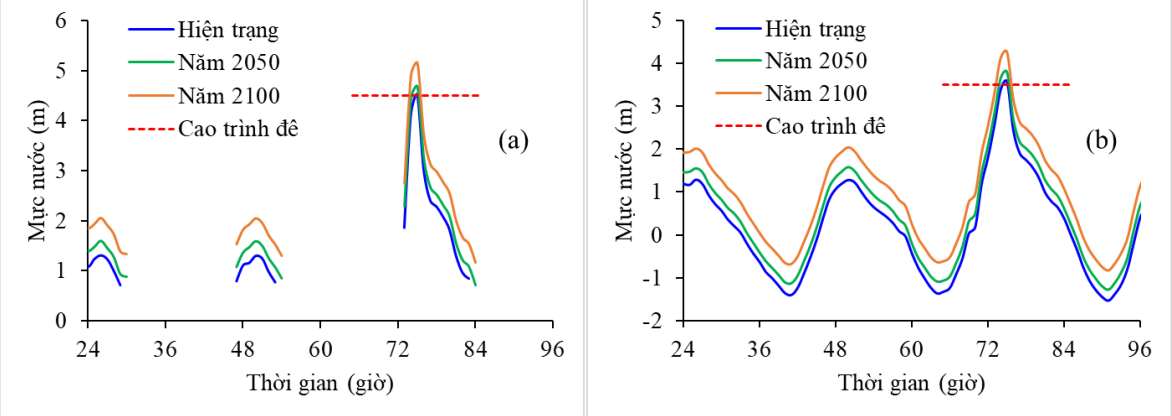
Hình 4.7. Dao động mực nước tại vị trí HL02, HH02 và SS01 với các cấp bão đổ bộ ở giai đoạn hiện tại



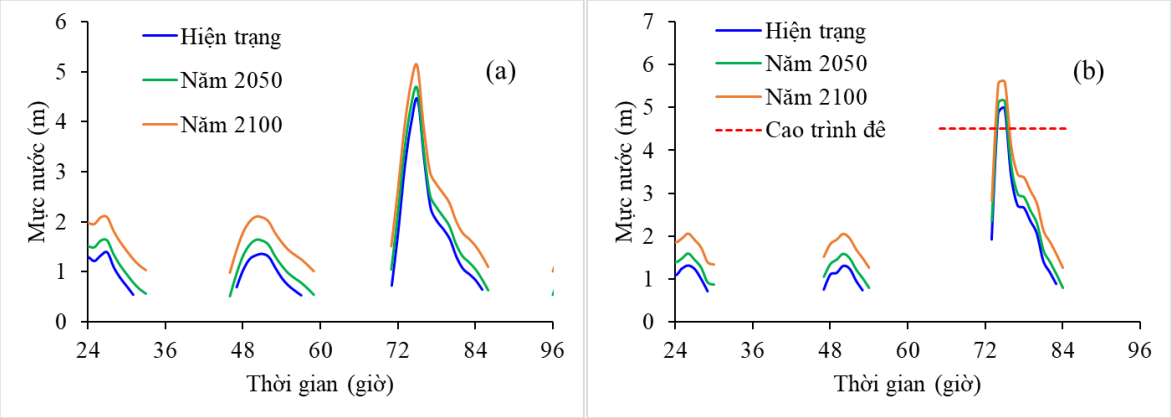
Hình 4.8. Dao động mực nước tại vị trí HH02 với bão cấp 11 (a) và cấp 12 (b) đổ bộ giai đoạn hiện tại, năm 2050 và 2100



Hình 4.9. Dao động mực nước với bão cấp 13 đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và 2100 tại HL02 (a) và SS01 (b)

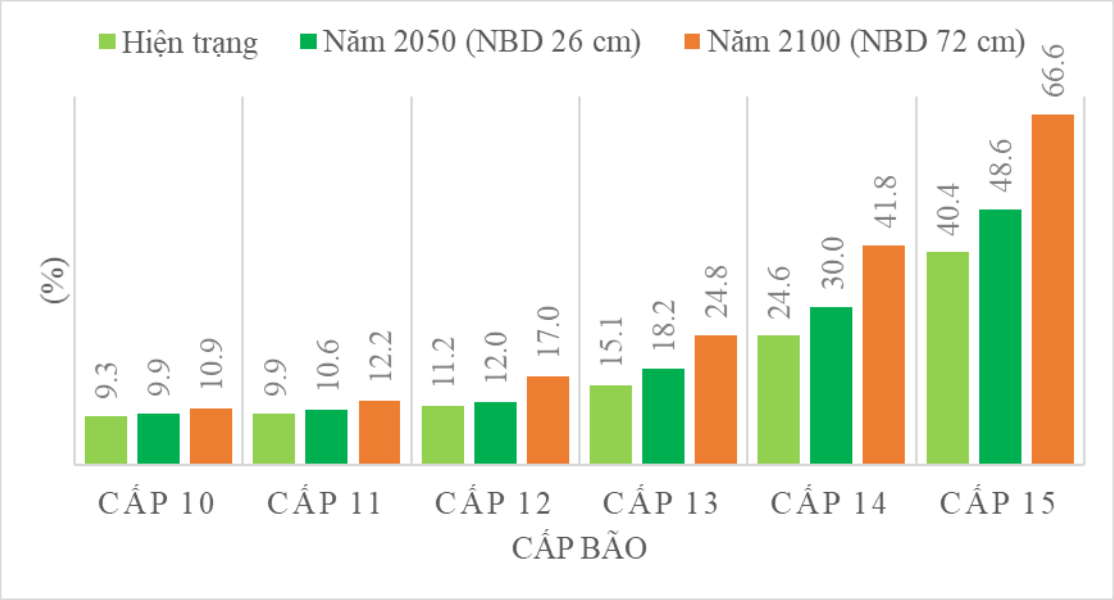


Hình 4.10. Dao động mực nước với bão cấp 14 đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và 2100 tại HL02 (a) SS01 (b)



Hình 4.11. Dao động mực nước với bão cấp 15 đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và 2100 tại MA02 (a) HL02 (b)

Kết quả mô phỏng nguy cơ ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa là cơ sở khoa học quan trọng đối với công tác quy hoạch và quản lý vùng ven biển. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, hệ thống đê biển hiện tại (tính đến năm 2023) chỉ có khả năng bảo vệ khu vực trước các cấp bão dưới cấp 12 và sẽ mất khả năng bảo vệ hoàn toàn trước các kịch bản bão mạnh trong tương lai khi mực nước biển trung bình dâng cao hơn so với hiện tại. Với giả thiết các công trình bảo vệ không được nâng cấp, khi bão cấp 15 đổ bộ vào năm 2050 và 2100, tỉ lệ tương ứng là hơn 48,6% và hơn 66% diện tích đất liền từ ven biển Hậu Lộc đến Sầm Sơn sẽ bị ngập do mực nước tổng cộng vượt quá cao trình đê (hình 4.12). Điều này đòi hỏi các nhà quản lý cần rà soát và điều chỉnh lại quy chuẩn thiết kế đê biển theo hướng có xét đến sự gia tăng của cường độ bão và nước biển dâng trong khu vực. Công tác quy hoạch sử dụng đất ven biển Thanh Hóa cần hạn chế việc bố trí các khu dân cư tập trung tại các vùng trũng có nguy cơ ngập sâu và cần thiết lập các hành lang an toàn hoặc rừng phòng hộ ven biển để giảm thiểu nguy cơ ngập lụt. Đồng thời cần thiết phải xây dựng hệ thống cảnh báo sớm ngập lụt ven biển, hệ thống này phải được cập nhật thường xuyên theo các kịch bản nước biển dâng mới nhất.



Hình 4.12. Tỉ lệ tổng diện tích ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa so với tổng diện tích đất liền của khu vực nghiên cứu ngập lụt với các cấp bão từ 10 đến 15, đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2050 và năm 2100

4.3. Tiểu kết Chương 4

Trong chương này, trước hết tập trung phân tích, so sánh xu thế hoạt động của bão trên vịnh Bắc Bộ và nước dâng do bão tại ven biển bờ tây vịnh Bắc Bộ ở giai đoạn hiện tại (1951-2010) và tương lai (2051-2110), tiếp đến nguy cơ ngập lụt vùng ven biển Thanh Hoá với các cấp bão đổ bộ ở giai đoạn hiện tại và tương lai (năm 2050, 2100) được mô phỏng và phân tích, những kết quả chính đạt được như sau:

- Theo kết quả của mô hình MRI–CGCM3, tại khu vực vịnh Bắc Bộ, số lượng bão từ cấp 8-11 ở giai đoạn khí hậu tương lai (2051-2110) giảm, trong khi đó số lượng bão mạnh từ cấp 12 trở lên lại tăng.

- So với giai đoạn khí hậu hiện tại, ở giai đoạn khí hậu tương lai bão mạnh có xu hướng tập trung xuống phía nam nhiều hơn.

- Trong giai đoạn khí hậu tương lai, nước dâng do bão lớn hơn tại hầu hết các vị trí trong khu vực bờ tây vịnh Bắc Bộ và vùng có nước dâng lớn nhất dịch xuống phía Nam (Nghệ An - Hà Tĩnh) với độ cao nước dâng lớn nhất tới gần 3,5 m.

- Mức độ ngập lụt tại ven biển khu vực nghiên cứu tăng theo cấp bão. Với các cấp bão mạnh (cấp 14-15), nước biển sẽ tràn qua hầu hết các tuyến đê hiện tại, gây ngập ở phần lớn vùng trũng ven biển Hậu Lộc, Hoằng Hóa, Sầm Sơn.

- Trong tương lai, nguy cơ ngập lụt gia tăng sẽ làm thay đổi ranh giới đất liền ven biển, hậu quả là các vùng có nguy cơ ngập lụt ven biển hiện tại trở thành vùng chuyển tiếp hoặc thậm chí thành vùng ngập lụt thường xuyên.

Các kết quả này đặt ra yêu cầu phải rà soát và nâng cấp quy hoạch các công trình phòng chống ngập lụt ven biển do bão cho khu vực.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận:

Trong luận án này, mô hình số trị tích hợp thủy triều, sóng biển và nước dâng do bão (mô hình SuWAT) được nghiên cứu và ứng dụng để mô phỏng và đánh giá tương tác giữa các yếu tố thủy động lực bao gồm thủy triều, sóng và nước dâng do bão tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và tác động của chúng và dòng chảy sông tới hiện tượng ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa. Mô hình đã được kiểm định trong mô phỏng thủy triều, nước dâng do bão, mực nước tổng hợp và sóng tại vùng ven bờ Thanh Hóa và khu vực lân cận trong thời gian bão Doksuri (9/2017) ảnh hưởng.

Trước tiên, tương tác giữa thủy triều, sóng và nước dâng do bão tới độ cao nước dâng và độ cao sóng tại vùng biển ven bờ tây vịnh Bắc Bộ được đánh giá với các kịch bản bão Doksuri (9/2017) được tăng/giảm cấp nhưng giữ nguyên quỹ đạo và các tham số khác. Tiếp đến, ảnh hưởng của pha thủy triều, sóng biển và dòng chảy sông tới phạm vi và độ sâu ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa được mô phỏng và phân tích với trường hợp bão Doksuri (9/2017). Cuối cùng, ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa do nước dâng do bão được đánh giá ở giai đoạn hiện tại và tương lai (năm 2050 và 2100) có xét tới kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng. Một số kết quả chính của nghiên cứu được tóm tắt như sau:

Về ảnh hưởng của tương tác thủy triều, sóng và nước dâng do bão tới độ lớn nước dâng và độ cao sóng tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ:

(1) So với ở pha thủy triều trung bình, nước dâng do bão cao hơn khi bão đổ bộ ở pha thủy triều thấp và thấp hơn ở thủy triều cao. Độ lớn chênh lệch giữa các đỉnh nước dâng do bão trong pha triều thấp và triều cao so với pha triều trung bình đều tăng dần khi cường độ bão tăng lên. Với quỹ đạo bão Doksuri (9/2017) và ở cấp siêu bão, chênh lệch nước dâng lớn nhất giữa kịch bản bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp và kịch bản bão đổ bộ vào pha thủy triều trung bình khoảng 0,33 m (8,1%) tại Hòn La, nơi gần tâm bão đổ bộ. Ngược lại so với nước dâng do bão, độ cao sóng có nghĩa cao hơn khi bão đổ bộ trong pha thủy triều cao. Chênh lệch về độ cao sóng có nghĩa

lớn nhất ở ba pha thủy triều cũng có xu thế tương tự như nước dâng do bão, đều tăng theo cấp bão. Độ cao sóng có nghĩa lớn nhất khi bão đổ bộ vào pha triều cao tăng khoảng 0,46 m (13,3%) tại Hòn La so với khi bão đổ bộ vào pha triều trung bình.

(2) Tác động của sóng làm gia tăng độ cao nước dâng do bão, nhất là tại khu vực xung quanh đường đi của bão. Với trường hợp cấp siêu bão cấp 17, nước dâng lớn nhất khi có xét tới tác động của sóng tại Hòn La, ở pha thủy triều thấp tăng khoảng 1,40 m (32,7%) so với trường hợp bỏ qua tác động của sóng.

(3) Giống như tác động của sóng tới nước dâng do bão, tác động của nước dâng do bão làm tăng độ cao sóng trong bão nhất là tại khu vực gần tâm bão. Với trường hợp cấp siêu bão, tại Hòn La trong pha thủy triều cao, chênh lệch độ cao sóng có nghĩa lớn nhất giữa phương án tính có và không xét tới tác động của nước dâng do bão khoảng 0,95 m (24,4%).

Về ảnh hưởng của thủy triều, sóng, dòng chảy sông tới ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa:

(4) Mực nước tổng hợp trong bão tại khu vực cửa sông được khuếch đại khi có tương tác giữa các yếu tố sông-biển (thủy triều, nước dâng, sóng và dòng chảy sông). Với trường hợp bão Doksuri (9/2017), nếu bão đổ bộ vào pha thủy triều cao, diện tích ngập lụt tăng khoảng 28% so với trường hợp bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp. Trong khi đó, khi xét tới ảnh hưởng của sóng biển, tổng diện tích ngập lụt tăng khoảng 7,8% so với trường hợp không xét tới ảnh hưởng của sóng. Khi xét tới lũ trên sông, tổng diện tích ngập lụt tăng khoảng 25,9% so với trường hợp không xét tới ảnh hưởng lũ trên sông. Đặc biệt, khi xét thêm đồng thời cả sóng và dòng chảy sông, diện tích ngập lụt lên tới 38,4 km2, tăng 35,7%.

Về nguy cơ ngập lụt ven biển Thanh Hóa do nước dâng do bão trong bối cảnh biến đổi khí hậu:

(5) So với giai đoạn hiện tại, ở giai đoạn tương lai (năm 2050 và 2100), khu vực ven biển Thanh Hóa sẽ có rủi ro nước dâng do bão cao hơn, nguyên nhân do bởi số lượng bão mạnh ảnh hưởng cao hơn do biển đổi khi hậu, dẫn tới nguy cơ ngập lụt

tại vùng ven biển cũng cao hơn.

(6) Mức độ ngập lụt tại ven biển khu vực nghiên cứu tăng theo cấp bão. Với cùng một cấp bão đổ bộ, phạm vi và độ sâu ngập sẽ tăng ở giai đoạn năm 2050 và 2100 do mực nước biển trung bình tăng dẫn tới thủy triều và nước dâng do bão sẽ lấn sâu hơn vào trong đất liền. Nguy cơ ngập lụt gia tăng sẽ làm thay đổi ranh giới đất liền ven biển, hậu quả là các vùng có nguy cơ ngập lụt ven biển hiện tại trở thành vùng chuyển tiếp hoặc thậm chí thành vùng ngập lụt thường xuyên.

(7) Với cùng bão cấp 10 đổ bộ, so với ở thời điểm hiện tại, tổng diện tích ngập lụt năm 2050 và 2100 tăng tương ứng là 1,06 và 1,17 lần và với bão cấp 15 tỷ lệ này tăng lên là 1,20 và 1,65 lần, tương ứng cho năm 2050 và 2100. Với cùng bão cấp 15 đổ bộ: ở giai đoạn hiện tại, khoảng hơn 1/3 diện tích của Hậu Lộc, Hoằng Hóa và Sầm Sơn sẽ bị ngập; Giai đoạn năm 2050 khoảng gần 1/2 diện tích các khu vực này sẽ ngập và năm 2100, sẽ có hơn 50% diện tích Hậu Lộc, gần 80% diện tích Hoằng Hóa và Sầm Sơn sẽ bị ngập; Các khu vực có ngập lụt sâu tập trung ở bên bờ phải cửa sông Mã và lưu vực hai phía của nam sông Cung với độ sâu ngập lớn nhất khoảng 4,0-5,0 m.

(8) Ở giai đoạn hiện tại, cao trình đê biển Thanh Hóa có thể ngăn nước dâng do bão dưới cấp 12, tuy nhiên đến năm 2100, bão cấp 11 đã gây mực nước vượt cao trình đê tại Hoằng Hóa gây ngập lụt phía trong đê.

2. Kiến nghị:

(1) Trong nghiên cứu này, hiện tượng ngập lụt ven biển chỉ được kiểm chứng gián tiếp thông qua yếu tố gây ngập như mực nước, độ cao sóng, dòng chảy sông và thông tin mô tả từ các báo cáo thực tế thu được mà chưa được kiểm chứng về diện và độ sâu ngập lụt do không có dữ liệu bản đồ ngập. Do vậy, hạn chế này cần được nghiên cứu tiếp với trường hợp có đủ dữ liệu về bản đồ ngập tại thời điểm bão ảnh hưởng.

(2) Ngập lụt ven biển là một quá trình tổng hợp, ngoài việc bị chi phối bởi các yếu tố thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông, những

yếu tố đã được Luận án phân tích và đánh giá chi tiết, thì yếu tố mưa và sóng tràn qua đê chưa được xem xét trong nghiên cứu này. Các nghiên cứu tiếp theo cần tích hợp thêm các mô hình thuỷ lực, thủy văn đô thị và mô hình sóng tràn để đánh giá chính xác hơn rủi ro ngập cho các khu vực nằm sau đê biển.

(3) Ở giai đoạn khí hậu tương lai (2050 và 2100), biến đổi khí hậu sẽ làm thay đổi mực nước biển trung bình, dẫn tới có thể thay đổi về cả biên độ thủy triều. Ngoài ra, mưa, lũ trên sông và sụt, lún vùng đất ven biển và quy hoạch về cao trình đê biển ở khu vực cũng có thể thay đổi. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, nguy cơ ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa mới chỉ xét tới tác động của mực nước biển trung bình dâng do biến đổi khí hậu, do vậy, những hạn chế này sẽ được bổ sung ở các nghiên cứu tiếp theo, trong đó cũng cần cập nhật thông tin về cao trình đê biển trong tương lai (khi có quy hoạch).

(4) Nước dâng do bão và hệ quả là ngập lụt vùng ven biển được coi là yếu tố hiểm hoạ. Tuy nhiên, mức độ rủi ro do thiên tai nước dâng do bão tại một khu vực không chỉ phụ thuộc vào yếu tố hiểm họa mà còn phụ thuộc vào đối tượng chịu tác động (yếu tố phơi lộ), tính dễ tổn thương và năng lực ứng phó của địa phương. Do vậy, cần triển khai đánh giá rủi ro do thiên tai nước dâng do bão tại khu vực để phục vụ quy hoạch và ứng phó với thiên tai này. Trong đó, các biện pháp thích ứng cho hệ thống đê biển (nâng cấp, gia cố đê, hoặc các giải pháp phi công trình) cần được xem xét trong quá trình đánh giá rủi ro.

(5) Trong nghiên cứu này tập trung đánh giá tương tác giữa các yếu tố thủy động lực biển tới ngập lụt tại ven biển Thanh Hóa, tuy nhiên, nhiều khu vực ven bờ biển khác tại Bắc Bộ và Bắc Trung Bộ của Việt Nam cũng có nguy cơ bão và nước dâng do bão cao, do vậy cần thiết đề xuất triển khai ở các nghiên cứu tiếp theo.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

Tạp chí quốc tế:

1. **Pham Van Tien**, Nguyen Ba Thuy, Sooyoul Kim, Nguyen Kim Cuong, Pham Khanh Ngoc, Mai Van Khiem, Lars Robert Hole (2025), "Impact of the interaction of surge, wave, and tide on the surge and wave on the northern coast of Vietnam for a marine storm surge and wave forecast system", *Regional Studies in Marine Science, Vol. 87, 104234*, https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104234.

2. Nguyen Ba Thuy, **Pham Van Tien**, Nguyen Kim Cuong, Pham Khanh Ngoc, Vu Hai Dang, Le Dinh Quyet, Sooyoul Kim, Cecilie Wettre, Lars Robert Hole (2025), "Numerical analysis of the abnormal water level rise phenomenon on the west coast of Ca Mau Peninsula, Vietnam", *Front. Built Environ. 11:1536113*, https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1536113.

Tạp chí trong nước:

3. Nguyễn Bá Thủy, **Phạm Văn Tiến**, Nguyễn Kim Cương, Vũ Hải Đăng, Bùi Mạnh Hà, Dương Ngọc Tiến (2025), "Quan trắc và mô phỏng số trị hiện tượng nước dâng do bão Kajiki (8/2025)", *Tạp chí Khoa học VNU: Khoa học Trái đất và Môi trường*, Tập 41, Số 1S (2025), tr. 16-27, https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5391.

4. **Pham Van Tien**, Nguyen Ba Thuy, Nguyen Kim Cuong, Vu Hai Dang, Bui Manh Ha, Nguyen Phuong Anh, Sooyoul Kim, Lars Robert Hole (2026), "Effects of tides, waves, and sea dikes on storm surge-induced coastal flooding in the Thanh Hoa region", *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 26(1), 21–34, https://doi.org/10.15625/1859-3097/23504 (Accepted: 6 September 2025).

5. **Phạm Văn Tiến**, Nguyễn Bá Thủy, Trần Thị Thuỳ Linh, Phạm Khánh Ngọc, Bùi Mạnh Hà (2023), "Kết quả ban đầu về mô phỏng ngập lụt vùng ven biển Thanh Hóa do nước dâng bão", *Tạp chí Khí tượng Thủy văn 2023*, 752, tr. 87-96, doi:10.36335/VNJHM.2023(752).87-96.

6. **Phạm Văn Tiến**, Phạm Khánh Ngọc, Phạm Quốc Hưng, Nguyễn Kim

Cương, Nguyễn Bá Thủy (2021), "Ảnh hưởng của sóng trong bão tới ngập lụt ven biển tỉnh Thái Bình", *Tạp chí Khí tượng Thủy văn 2021*, 724, tr. 72-81, 10.36335/VNJHM.2021(724).72-81.

Hội thảo quốc tế và trong nước:

7. **Pham Van Tien**, Nguyen Ba Thuy, Pham Khanh Ngoc, Bui Manh Ha, Vu Hai Dang, Nguyen Kim Cuong, Nguyen Viet Hang (2023), "Interaction of surge and wave on strong/super typhoon in the northern coastal area of Vietnam", *The international conference on earth and environmental sciences, mining for digital transformation, green development and response to global change - GREEN EME 2023*. December 29, 2023 in Ho Chi Minh City, pp. 292-320.

8. **Phạm Văn Tiến**, Nguyễn Bá Thủy, Nguyễn Kim Cương, Lê Quốc Huy (2023), Ảnh hưởng của tương tác giữa sóng và dòng chảy sông đến mực nước tổng cộng khu vực cửa sông Mã, *Hội thảo khoa học Quốc gia về Khí tượng, Thủy văn, Môi trường và Biến đổi khí hậu, Lần thứ XXV, 6/2023*, Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu, tr. 204-214.

9. **Phạm Văn Tiến**, Nguyễn Bá Thủy, Nguyễn Kim Cương (2022), "Mô phỏng nước dâng và sóng trong bão Doksuri 2017 bằng mô hình couple", *Tuyển tập Hội nghị quốc tế Biển Đông 9/2022*, Viện Hải dương học Nha Trang, tr. 756-762.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Bộ Tài nguyên và Môi trường (2020), *Kịch bản biến đổi khí hậu,* Nhà xuất bản Tài nguyên – Môi trường và Bản đồ Việt Nam.
2. Đinh Văn Mạnh và nnk (2014), *Tính toán cao độ mực nước biển phục vụ thiết kế công trình ven biển*, Nxb Khoa học tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội.
3. Đỗ Đình Chiến (2015), *Nghiên cứu cơ sở khoa học tính toán và đánh giá quy mô nước dâng bão ở vùng biển từ Quảng Bình đến Quảng Nam*, Luận án Tiến sĩ Hải dương học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQGHN.
4. Hoàng Trung Thành (2011), *Nghiên cứu đặc điểm biến thiên mực nước biển ven bờ Việt Nam*, Luận án Tiến sĩ Địa lý, Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Môi trường, Hà Nội.
5. Lê Trọng Đào (2009), *Nghiên cứu xây dựng hệ thống dự báo tác nghiệp khí tượng thủy văn biển (gồm dòng chảy, sóng và nước dâng do bão) vùng biển Đông và ven biển Việt Nam phục vụ xây dựng hệ thống dự báo tác nghiệp KTTV biển,* Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ, Bộ Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội.
6. Lương Hữu Dũng (2023), *Phân vùng rủi ro thiên tai và lập bản đồ cảnh báo lũ, ngập lụt*, Báo cáo tổng kết dự án cấp Bộ TN&MT, Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi Khí hậu.
7. Nguyễn Bá Thủy (2016), *Nghiên cứu lựa chọn mô hình dự báo nghiệp vụ nước dâng do bão vào dự báo nghiệp vụ tại Việt Nam*, Báo cáo tổng kết đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ.
8. Nguyễn Minh Huấn (2011), *Nghiên cứu phát triển và ứng dụng công nghệ dự báo ngắn hạn trường các yếu tố thủy văn biển khu vực Biển Đông*, Báo cáo tổng kết đề tài mã số KC.09.16/06-10 thuộc Chương trình Khoa học công nghệ cấp Nhà nước KC.09/06-10.
9. Nguyễn Phương Anh, Nguyễn Bá Thủy, Phạm Khánh Ngọc, Sooyoul Kim (2022), "Đánh giá bão trên Biển Đông và nước dâng do bão tại ven biển Bắc Bộ

trong bối cảnh biến đổi khí hậu", *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, Tập 737, Số 5, tr. 75-87.

10. Nguyễn Thị Việt Liên (2012), *Đánh giá mức độ rủi ro vùng bờ tỉnh thừa thiên - huế do nước biển dâng và xây dựng phần mềm trợ giúp ra quyết định*, Đề tài độc lập - hợp tác giữa Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam với UBND tỉnh Thừa Thiên Huế.
11. Nguyễn Văn Hưởng (2017), *nghiên cứu khả năng xuất hiện bão mạnh, siêu bão trên các khu vực khác nhau của việt nam và hệ quả mưa, gió mạnh, nước biển dâng phục vụ phương án ứng phó*, Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường.
12. Nguyễn Xuân Hiển (2013), *Nghiên cứu nước dâng do bão có tính đến ảnh hưởng của sóng và áp dụng cho vùng ven biển Hải Phòng*, Luận án Tiến sĩ Địa lý, Viện Khoa học Khí tượng thủy văn và Môi trường, Hà Nội.
13. Quyết định số 18/2021/QĐ-TTg ngày 22 tháng 4 năm 2021 của Thủ tướng Chính phủ: Quy định về dự báo, cảnh báo, truyền tin thiên tai và cấp độ rủi ro thiên tai.
14. Trần Tân Tiến (2010), *Xây dựng quy trình công nghệ dự báo liên hoàn bão, nước dâng và sóng thời hạn trước 03 ngày*, Báo cáo tổng kết đề tài cấp Nhà nước mã số KC.08.05/06-10.
15. Phạm Trí Thức, Đinh Văn Mạnh, Nguyễn Bá Thủy (2020), "Một số đặc điểm nước dâng do bão và gió mùa tại ven bờ vịnh Bắc Bộ", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ biển*, 20(4B), tr. 01-11.
16. Phạm Văn Huấn (2016), "Sơ đồ khối phân tích điều hòa thủy triều bằng phương pháp bình phương nhỏ nhất đối với chuỗi mực nước gián đoạn thời gian", *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN, Các khoa học Trái đất và Môi trường*, Tập 32, Số 3S (2016), tr. 83-88
17. Tổng cục Phòng, Chống thiên tai (2016), *Bản đồ nguy cơ ngập ven biển cho tình huống bão mạnh/siêu bão đổ bộ vào ven biển Việt Nam*.

18. Vũ Hải Đăng, Nguyễn Bá Thủy, Đỗ Đình Chiến, Sooyoul Kim (2016), "Nghiên cứu đánh giá định lượng các thành phần nước dâng trong bão bằng mô hình số trị", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ biển*, 16(3), tr. 201-210.
19. Vũ Như Hoán (1988), *Phương pháp thống kê dự báo nước dâng và mực nước ven biển miền bắc Việt Nam khi bão tới*, Luận án Tiến sĩ, Hà Nội.
20. Vũ Thanh Ca, Phùng Đăng Hiếu, Nguyễn Xuân Hiển, Nguyễn Xuân Đạo (2008), "Mô hình dự báo nước dâng do bão có tính đến thủy triều", *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, số 568, tr. 25-33.

Tiếng Anh

21. Andrew B.H., John P.C., Marc C., Laura A., and Sandy D. (2024), *National Hurricane Center Tropical Cyclone Report Hurricane Helene (AL092024), 24–27 September 2024*, 8 April 2025.
22. Banfi F., and De M.C. (2022), "Compound flood hazard at Lake Como, Italy, is driven by temporal clustering of rainfall events", *Commun. Earth Environ.*, 3, 234, doi.org/10.1038/s43247-022-00557-9.
23. Battjes J.A., Janssen J.P.F.M. (1978), "Energy loss and set-up due to breaking of random 894 waves". *In: Proceeding of 16th International Conference Coastal Engineering*. ASCE, pp. 569–587, doi.org/10.1061/9780872621909.034.
24. Bell B., Hersbach H., Simmons A., et al. (2021), "The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950", *Q. J. R. Meteorol.* Soc. 2021, 147, pp. 4186-4227, doi.org/10.1002/qj.4174.
25. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. (1999), "A third-generation wave model for coastal regions, part I, model description and validation", *J. Geophys. Res.* 104 (C4), pp. 7649-7666, doi.org/10.1029/98JC02622.
26. Bunya S., Dietrich J.C., Westerink J.J., Ebersole B.A., Smith J.M., et al. (2010), "A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave, and storm surge model for southern Louisiana and Mississippi. Part I: Model development and validation", *Monthly Weather Review*, Vol. 138: Issue 2, pp. 345-377, doi.org/10.1175/2009MWR2906.1.

27. Camus P., Haigh I.D., Nasr A.A., Wahl T., Darby S.E., and Nicholls R.J. (2021), "Regional analysis of multivariate compound coastal flooding potential around Europe and environs: sensitivity analysis and spatial patterns", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, pp. 2021–2040, doi.org/10.5194/nhess-21-2021-2021.
28. Camus P., Haigh I.D., Wahl T., Nasr A.A., Méndez F.J., Darby S.E., Nicholls R.J. (2022), "Daily synoptic conditions associated with occurrences of compound events in estuaries along North Atlantic coastlines", *Int. J. Climatol*., 42, pp. 5694–5713, doi.org/10.1002/joc.7556.
29. Cavaleri L., Malanotte-Rizzoli P. (1981), "Wind wave prediction in shallow water: theory and applications", *J. Geophys. Res*. 86 (Cll, 10), pp. 961–973, doi.org/10.1029/JC086iC11p10961.
30. Dasgupta S., Huq M., Khan Z.H., Ahmed M.M.Z., Mukherjee N., Khan M., Pandey K.D. (2010), *Vulnerability of Bangladesh to cyclones in a changing climate: Potential damages and adaptation cost*, World Bank Policy Research Working Paper.
31. Dietrich J.C., Bunya S., Westerink J.J., Ebersole B.A., Smith J.M., Atkinson J.H., et al. (2010) "A High Resolution Coupled Riverine Flow, Tide, Wind, Wind Wave and Storm Surge Model for Southern Louisiana and Mississippi: Part II – Synoptic Description and Analyses of Hurricanes Katrina and Rita", *Monthly Weather Review*, 138, pp. 378-404, doi.org/10.1175/2009MWR2907.
32. Dietrich J.C., Westerink J.J., Kennedy A.B., Smith J.M., Jensen R.E., et al. (2011), "Hurricane Gustav (2008) Waves and Storm Surge: Hindcast, Synoptic Analysis, and Validation in Southern Louisiana", *Monthly Weather Review*, Volume 139, pp. 2488-2522.
33. Etala P. (2009), "Dynamic issues in the SE South America storm surge modeling". *Nat Hazards* 51, pp. 79–95, doi.org/10.1007/s1106 9-009-9390-3
34. Fujii T., Mitsuta Y. (1986), "Synthesis of a stochastic typhoon model and simulation of typhoon winds", *In: Annuals Disaster Prevention Research Institute*, 29. Kyoto University, pp. 229–239 (B-1, in Japanese).

35. Funakoshi Y., Hagen S.C., Bacopoulos P. (2008), "Coupling of Hydrodynamic and Wave Models: Case Study for Hurricane Floyd (1999) Hindcast", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 134, pp. 321-335, doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2008)134:6(321), 2008.
36. George J.A., Verne R.S. (1989), *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains,* FHWA-IP-89-012. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.
37. Hallegatte S., Green C., Nicholls R.J., Corfee-Morlot J. (2013), "Future flood losses in major coastal cities", *Nat. Clim. Change*, 3, pp. 802–806, doi.org/10.1038/nclimate1979.
38. Hasselmann S., Hasselmann K., Allender J.H., Barnett T.P. (1985), "Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models", *J. Phys. Oceanogr*. 15 (11), pp. 1378–1391.
39. Hetzel Y., Janekovic I., Pattiaratchi C., Haigh I. (2024), "The role of wave setup on extreme water levels around Australia", *Ocean Engineering*, 308, 118340, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118340.
40. Holthuijsen L.H., Herman A., Booij N. (2003), "Phase-decoupled refraction diffraction for spectral wave models", *Coast. Eng*. 49 (4), pp. 291–305.
41. Honda T., Mitsuyasu H. (1980), "Experimental study of wind stress in the sea surface", *In: Annual Journal of Coastal Engineering*, 27. JSCE, pp. 90–93 (in Japanese).
42. Huang W., Ye F., Zhang Y.J., Park K., Du J., Moghimi S., Myers E., Pe'eri S., Calzada J. R., Yu H. C., Nunez K., Liu Z. (2021), "Compounding factors for extreme flooding around Galveston Bay during Hurricane Harvey", *Ocean Modelling*, 158, 101735, doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101735.
43. Huang P.C. (2022), "An effective alternative for predicting coastal floodplain inundation by considering rainfall, storm surge, and downstream topographic

characteristics", *Journal of Hydrology, Vol.* 607, April 2022, 127544, doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127544.

44. Idier D., Dumas F., Muller H., (2012), "Tide–surge interaction in the English channel", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,* 12, pp. 3709–3718, doi.org/10.5194/nhess -12-3709-2012
45. Imam B., Agung S., Mussadun M., David W., Yan L., Angrenggani P., Istiqomah T.D.P., (2018), "A predictive model to assess spatial planning in addressing hydro-meteorological hazards: A case study of Semarang City, Indonesia", *International Journal of Disaster Risk Reduction,* Vol. 27, March 2018, pp. 415-426, doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.11.003.
46. IPCC (2023), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
47. Ishii M. & N. Mori (2020), "d4PDF: large-ensemble and high-resolution climate simulations for global warming risk assessment" *Progress in Earth and Planetary Science*, 7, Article number: 58.
48. Janssen P.A.E.M. (1989), "Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves", *Journal of Physical Oceanography,* 19, pp. 745–754.
49. Janssen P.A.E.M. (1991), "Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting", *Journal of Physical Oceanography,* 21, pp. 1631–1642.
50. Janssen P.A.E.M. (1992), “Experimental evidence of the effect of surface waves on the air flow”, *Journal of Physical Oceanography*, (22), pp. 1600-1604.
51. Kew S.F., Selten F.M., Lenderink G., Hazeleger W. (2013), "The simultaneous occurrence of surge and discharge extremes for the Rhine delta, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 13, pp. 2017–2029, doi.org/10.5194/nhess-13-2017-2013.
52. Kim S. Y., Yasuda T., and Mase H. (2008), "Numerical analysis of effects of tidal variations on storm surges and waves", *Appl. Ocean. Res*. 30 (4), pp. 311–322, doi.org/10.1016/j.apor.2009.02.003.

53. Kim S.Y., Yasuda T., Mase H. (2010) "Wave set-up in the storm surge along open coasts during Typhoon Anita", *Coast. Eng. (ASCE)* 57, pp. 631–642, doi:10.1016/j.coastaleng.2010.02.004.
54. Kim S.Y., Mori N., Mase H., Yasuda T. (2015), "The role of sea surface drag in a coupled surge and wave model for Typhoon Haiyan 2013", *Ocean Model*, 96, pp. 65-84, doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.06.004.
55. Krien Y., Testut L., Islam A.K.M.S, Bertin X., Durand F., Mayet C., Tazkia A.R., Becker M., Calmant S., Papa F., Ballu V., Shum C.K., Khan Z.H. (2017), "Towards improved storm surge models in the northern Bay of Bengal", *Cont Shelf Res* 135, pp. 58–73, https ://doi.org/10.1016/j.csr.2017.01.014.
56. Lai Y., Li J., Gu X., Liu C., Chen Y. D. (2021a), "Global compound floods from precipitation and storm surge: Hazards and the roles of cyclones", *J. Climate*, 34, pp. 8319–8339, doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0050.1.
57. Lai Y., Li Q., Li J., Zhou Q., Zhang X., Wu G. (2021b), "Evolution of Frequency and Intensity of Concurrent Heavy Precipitation and Storm Surge at the Global Scale: Implications for Compound Floods", *Frontiers in Earth Science*, 9, 660359, doi.org/10.3389/feart.2021.660359.
58. Latif S., Mustafa F. (2020), "Copula-based multivariate flood probability construction: a review", *Arab. J. Geosci*., 13, 132, doi.org/10.1007/s12517-020-5077-6.
59. Latif S., Simonovic S.P. (2022), "Trivariate Joint Distribution Modelling of Compound Events Using the Nonparametric D-Vine Copula Developed Based on a Bernstein and Beta Kernel Copula Density Framework", *Hydrology*, 9, 221, doi.org/10.3390/hydrology9120221.
60. Lewis M.J., Palmer T., Hashemi R., Robins P., Saulter A., Lewis H., Neill S. (2019), "Wave-tide interaction modulates nearshore wave height", *Ocean Dyn*, 69, pp. 367–384, doi.org/10.1007/s10236-018-01245-z.
61. Li L., Yang J., Lin C.Y., Chua C.T., Wang Y., Zhao K., Wu Y.T., Liu P. L.F., Switzer A.D., Mok K.M., Wang P., Peng D. (2018), "Field survey of Typhoon

Hato (2017) and a comparison with storm surge modeling in Macau", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol. 18, issue 12, pp. 3167–3178, 2018, https://doi.org/10.5194/nhess-18-3167-2018.

62. Li A., Guan S., Mo D., Hou Y., Hong X., Liu Z. (2020), "Modeling wave effects on storm surge from different typhoon intensities and sizes in the South China Sea. Estuar", *Coast. Shelf Sci*. 235 (4), 106551, https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106551.
63. Li Z., Li A., Hu P., Feng F., Mo D., Li J. (2023), "Improving storm surge simulations by considering wave-steepness-dependent drag coefficient in the northern East China Sea", *Ocean Model*, 186, 102283, doi.org/10.1016/j.ocemod.2023.102283.
64. Liu Z., Wang H.V., Zhang Y., Magnusson L., Loftis J.D., and Forrest D. (2020), "Cross-scale modeling of storm surge, tide, and inundation in Mid-Atlantic Bight and New York City during Hurricane Sandy, 2012", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 233, 106540, doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106540.
65. Longuet-Higgins M.S., Stewart R.W. (1964), "Radiation stresses in water waves; a physical discussion with application", *Deep Sea Research and Oceanographic*, 11, 529-540, doi.org/10.1016/0011-7471(64)90001-4.
66. Lucia P.G., Marie-Noëlle B., Fabrice A., Florent L., Jean-Raymond B., et al. (2020), "Impact of wave-dependent stress on storm surge simulations in the North Sea: Ocean model evaluation against in situ and satellite observations", *Ocean Modelling*, Vol. 154, October 2020, 101694, doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101694
67. Luo Z., Huang B., Chen X., Tan C., Qiu J., Huang G. (2021), "Effects of wave–current interaction on storm surge in the pearl river estuary: a case study of super typhoon Mangkhut", *Front. Mar. Sci*. 8, 692359, doi.org/10.3389/fmars.2021.692359.

68. Lyard F.H., Allain D.J., Cancet M., Carrère L., Picot N. (2021), "FES2014 global ocean tide atlas: design and performance", *Ocean Sci.*, 17, pp. 615–649, doi.org/10.5194/os-17-615-2021.
69. Ma Y., Liu Z., Dong Z., Zhao B., Min W., An Y. (2024), "Wave-tide-surge interaction modulates storm waves in the Bohai sea", *J. Mar. Sci. Eng*. 12, 1932, doi.org/10.3390/jmse12111932.
70. Madsen O.S., Poon Y.K., Graber H.C. (1988), "Spectral wave attenuation by bottom friction: theory", *In: Proceeding of 21th International Conference Coastal Engineering. ASCE*, pp. 492–504, doi.org/10.1061/9780872626874.0.
71. Massey W.G., Gangai J.W., Drei-Horgan E., Slover K.J. (2007), "History of coastal inundation models", *Marine Technology Society Journal*, 41, pp. 7-17, doi.org/10.4031/002533207787442421.
72. Mizuta R., Murata A., Ishii M., et. al. (2017), "Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models", *Bull. Amer. Meteor. Soc*. July 2017, pp. 1383-1398, doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1.
73. Mo D., Wang N., Hu P., Hou Y. (2023), "The interaction between storm surge and concomitant waves in Shandong Peninsula", *J. Mar. Sci. Eng*. 11, 1759, doi.org/10.3390/jmse11091759.
74. Murty P. L. N., Rao A. D., Srinivas K. S., Rama E. P., Bhaskaran P. K. (2020), "Effect of Wave Radiation Stress in Storm Surge-Induced Inundation: A Case Study for the East Coast of India", *Pure and Applied Geophysics*, 177, pp. 2993–3012, doi.org/10.1007/s00024-019-02398-2.
75. Phan D.C., et al. (2020), "JAXA high-resolution land use/land cover map for Central Vietnam in 2007 and 2017", *Remote Sens*. 10, 1406 (2018), doi.org/10.3390/rs10091406.
76. Phan D.C., et al. (2021), "First comprehensive quantification of annual land use/cover from 1990 to 2020 across mainland Vietnam", *Sci. Rep*. 11, (2021), doi.org/10.1038/s41598-021-89034-5

77. Phan D.C., et al. (2021), "Ensemble learning updating classifier for accurate land cover assessment in tropical cloudy areas", *Geocarto Int*. 1?18, doi.org/10.1080/10106049.2021.1878292
78. Pasquier U., He Y., Hooton S., Goulden M., Hiscock K.M. (2019), "An integrated 1D–2D hydraulic modelling approach to assess the sensitivity of a coastal region to compound flooding hazard under climate change", *Nat. Hazards*, 98, pp. 915–937, doi.org/10.1007/s11069-018-3462-1.
79. Postacchini M., Lalli F., Memmola F., Bruschi A., Bellafiore D., Lisi I., Zitti G., Brocchini M. (2019), "A model chain approach for coastal inundation: Application to the bay of Alghero, Estuarine", *Coastal and Shelf Science*, 219, pp. 56-70, doi.org/10.1016/j.ecss.2019.01.024.
80. Ron K.H., Kathleen L., McInnes J.C.K., Rebecca J.M., John R.H., Scott G.S. (2013), "Widespread inundation of Pacific islands triggered by distant-source wind-waves", *Global and Planetary Change*, Vol. 108, pp. 128–138. doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.06.006.
81. Salvadori G., De M.C. (2004), "Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events", *Water Resour. Res*., 40, doi.org/10.1029/2004WR003133.
82. Salvadori G., De M.C. (2007), "On the Use of Copulas in Hydrology: Theory and Practice", *Journal of Hydrologic Engineering*, 12, pp. 369-380, doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:4(369).
83. Sampurno J., Vallaeys V., Ardianto R., Hanert E. (2022), "Integrated hydrodynamic and machine learning models for compound flooding prediction in a data-scarce estuarine delta", *Nonlinear Processes in Geophysics*, 29, pp. 301-315, doi.org/10.5194/npg-29-301-2022.
84. Santos V.M., Wahl T., Jane R., Misra S.K., White K.D. (2021a), "Assessing compound flooding potential with multivariate statistical models in a complex estuarine system under data constraints", *Journal of Flood Risk Management*, 14, doi.org/10.1111/jfr3.12749.

85. Santos V.M., Casas-Prat M., Poschlod B., Ragno E., Van D.H.B., Hao Z., Kalmár T., Zhu L., Najafi H. (2021b), "Statistical modelling and climate variability of compound surge and precipitation events in a managed water system: A case study in the Netherlands", *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, pp. 3595-3615, doi.org/10.5194/hess-25-3595-2021.
86. Schloemer R.W. (1954), "Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okechobee, Florida", *Hydromet*. Rep. No. 31, pp. 49.
87. Shimura T., Mori N. (2023), "Future Changes in Tropical Cyclone and Extratropical Cyclone Characteristics in High-Resolution Large-Ensemble Simulations", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 62(3), pp. 369-385, doi.org/10.1002/2017GL075058.
88. Thai T.H., Thuy N.B., Dang V.H., Kim S., Hole L.R. (2017), "Impact of the interaction of surge, wave and tide on a storm surge on the north coast of Vietnam", *Procedia IUTAM*, 25, pp. 82-91, doi.org/10.1016/j.piutam.2017.09.009.
89. Thuy N.B., Kim S., Chien D.D., Dang V.H., Cuong H.D., Wettre C., Hole L.R. (2017), "Assessment of Storm Surge along the Coast of Central Vietnam", *Journal of Coastal Research*, 33, pp. 518-530, doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00117.1.
90. Thuy N.B., Kim S., Anh T.N., Cuong N.K., Thuc P.T., Hole L.R. (2020), "The influence of moving speeds, wind speeds, and sea level pressures on after-runner storm surges in the Gulf of Tonkin, Vietnam", *Ocean Engineering*, 212, 107678, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107678.
91. Val S., Sarah G., Paul P., Ray C., Curtis B., Yuri, S. (2019), "Early Warnings of Coastal Inundation", *WMO*, https://wmo.int/media/magazine-article/early-warnings-of-coastal-inundation, truy cập ngày 12/12/2025 .
92. Vitousek S., Barnard P.L., Fletcher C.H., Frazer N., Erikson L., Storlazzi C.D., (2017), "Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise", *Sci. Rep.*, 7, pp. 1–9, 2017, doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7.

93. Ye F., Huang W., Zhang Y.J., Moghimi S., Myers E., Pe'eri S., Yu H.C. (2021), "A cross-scale study for compound flooding processes during Hurricane Florence", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 21, pp. 1703-1719, doi.org/10.5194/nhess-21-1703-2021.
94. Xu J.L., Zhang Y.H., Cao A.Z., Liu Q.L.X. (2016), "Effects of tide–surge interactions on storm surges along the coast of the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea", *Sci China Earth Sci* 59, pp. 1308–1316, doi.org/10.1007/s11430-015-5251-y
95. Zhao J., Cerrone A., Valseth E., Westerink L., Dawson C. (2025), "Storm Surge in Color: RGB-Encoded Physics-Aware Deep Learning for Storm Surge Forecasting", *arXiv preprint arXiv*:2506.21743, doi.org/10.48550/arXiv.2506.21743.
96. Zscheischler J., Westra S., Van D.H., Seneviratne S.I., Ward P.J., Pitman A., AghaKouchak A., Bresch D.N., Leonard M., Wahl T., Zhang X. (2018), "Future climate risk from compound events", *Nat. Clim. Change*, 8, pp. 469-477, doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3.
97. Zhang W.Z., Shi F., Hong H.S., Shang S.P., Kirby J.T. (2010), "Tide-surge interaction intensified by the Taiwan Strait", *J Geophys Res* 115:C06012, doi.org/10.1029/2009J C0057 62, doi.org/10.1029/2009JC005762.
98. Zhang Y.J., Ye F., Yu H., et al. (2020), "Simulating compound flooding events in a hurricane", *Ocean Dynamics*, Vol. 70, pp. 621-640, 2020, doi.org/10.1007/s10236-020-01351-x.
99. Wahl T., Jain S., Bender J., Meyers S.D., Luther M.E. (2015), "Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities, *Nature Climate Change*, 5(12), pp. 1093-1097, doi.org/10.1038/nclimate2736.
100. Wang H., Xuan Y., Tran T. V. T., Couasnon A., Scussolini P., Luu L. N., Nguyen H. Q., Reeve D. E. (2023), "Changes in seasonal compound floods in Vietnam revealed by a time-varying dependence structure of extreme rainfall and

high surge", *Coastal Engineering*, Vol. 183, 2023, 104330, ISSN 0378-3839, https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104330.

101. Wu G., Shi F., Kirby J.T., Liang B., Shi J. (2018), "Modeling Wave Effects on Storm Surge and Coastal Inundation", *Coastal Engineering*, Vol. 140, October 2018, pp. 371-382, doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.08.011.

102. Yang K., Paramygin V.A., Sheng Y.P. (2020), "A Rapid Forecasting and Mapping System of Storm Surge and Coastal Flooding", *weather and forecasting, American Meteorological Society*, Vol. 35, pp. 1663–1681, doi.org/10.1175/WAF-D-19-0150.1.

103. Yoshida K., Sugi M., Mizuta R., Murakami H., & Ishii M. (2017), "Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations", *Geophysical Research Letters*, 44, 9910–9917. https://doi.org/10.1002/2017GL075058

Website

104. https://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/

105. https://www.nguoiduatin.vn/anh-huong-cua-bao-so-10-cac-tinh-duyen-hai-bac-bo-ngap-lut-204339095.htm.

106. https://tienphong.vn/bao-so-10-can-quet-mien-trung-it-nhat-4-nguoi-chet-post976535.tpo.