

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 HÓA**

Chuyên ngành: Hải dương học

Mã số: 9440228.01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ HẢI DƯƠNG HỌC

Hà Nội - 2026

Công trình được hoàn thành tại: Bộ môn Khoa học và Công nghệ Biển,
Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa
học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội.

Người hướng dẫn khoa học: 1. PGS. TS. Nguyễn Bá Thủy
2. PGS. TS. Nguyễn Kim Cương

Phản biện: PGS. TS. Vũ Thanh Ca
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội

Phản biện: PGS. TS. Nguyễn Viết Thanh
Trường đại học Giao thông vận tải

Phản biện: PGS. TS. Dương Hồng Sơn
Viên Khoa học Tài nguyên nước

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ họp tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên - ĐHQGHN vào hồi 14 giờ ngày 17 tháng 7 năm 2026.

Có thể tìm hiểu luân án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam;
- Trung tâm Thư viện và Tri thức số, Đại học Quốc gia Hà Nội

MỞ ĐẦU

1. Lý do lựa chọn đề tài

Ngập lụt ven biển là một trong những thiên tai nghiêm trọng, gây thiệt hại lớn về con người, tài sản và môi trường ở vùng ven biển. Những thiệt hại do nước dâng do bão và ngập lụt ở vùng ven biển gây ra bởi các cơn bão Katrina (2005) và Helene (9/2024) tại Mỹ, bão Damrey (2005), Doksuri (2017), Kajiki (2025) và Bualoi (2025) tại Việt Nam cho thấy sự cần thiết phải có các nghiên cứu về nước dâng do bão và ngập lụt ven biển. 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. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu về ngập lụt vùng ven biển do nước dâng 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, sẽ tập trung làm sáng tỏ thêm về tương tác giữa các yếu tố thủy động lực tại ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và ngập lụt tại ven biển tỉnh Thanh Hóa. 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 nghiên cứu

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:

(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.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

4.1. 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 Hóa 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 cảnh mực nước biển dâng do biến đổi khí hậu tại khu vực.

4.2. Ý nghĩa thực tiễn

Một trong những hệ quả nguy hiểm của bão là mực nước biển dâng cao gây ngập lụt vùng ven biển, chính vì vậy hiểu rõ nguyên nhân, cơ chế và lượng hoá vai trò của từng yếu tố tác động cũng như đánh giá nguy cơ ngập 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.

5. Những 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 20 m) 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 Thanh Hóa trong trường hợp bão Doksuri (2017) và đánh giá nguy cơ ngập tại khu vực ở hiện tại và tương lai có xét tới mực nước biển trung bình dâng do biến đổi khí hậu.

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

1.1. Các nghiên cứu nước ngoài

Trên thế giới, nghiên cứu về ngập lụt ven biển chủ yếu được thực hiện theo phương pháp phân tích thống kê (1) và phương pháp mô hình hóa (2). Trong đó, theo hướng thứ hai phổ biến hơn. 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. Những tiến bộ trong mô hình tính toán đã cho phép kết nối hai chiều giữa các mô hình thủy động lực với các mô hình sóng trong các ứng dụng ven biển. Mô hình kết hợp đã nâng cao đáng kể độ chính xác trong các tính toán liên quan đến nước dâng do bão và ngập lụt ven biển.

2.2. Các nghiên cứu trong nước

Các nghiên cứu về ngập lụt ven biển do bão ở Việt Nam còn rất hạn chế. Nhưng nước dâng do bão là chủ đề được quan tâm và nghiên cứu từ rất sớm ở Việt Nam. Các nghiên cứu được phát triển từ phương pháp đơn giản như giản đồ đến sử dụng mô hình số. Từ mô phỏng độc lập đến xem xét thêm các yếu tố ảnh hưởng đến nước dâng do bão như thủy triều và sóng.

Nhìn chung, mặc dù đã có nhiều tiến bộ, nhưng các nghiên cứu vẫn tồn tại một số khoảng trống: (1) Tương tác giữa thủy triều, nước

dâng và sóng vẫn cần được hiểu đầy đủ hơn, 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 thay đổi như thế nào ứng với các cấp bão đổ bộ vào các pha thủy triều khác nhau, nhất là tại khu vực có biên độ thủy triều lớn; (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?

Để giải quyết các vấn đề nêu trên, luận án ứng dụng mô hình số trị tích hợp thủy 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 tương tác 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 đê biển tới ngập lụt khu vực ven biển Thanh Hóa.

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

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

2.1. Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu này tập chung vào khu vực ven bờ tây vịnh Bắc Bộ và chi tiết cho ven biển tỉnh Thanh Hóa. Trong đó, ảnh hưởng của

Hòn Ngur và Quảng Châu trong thời gian có bão Doksuri (2017) và đã được quy về mức quốc gia; Số liệu chiều cao sóng quan trắc tại trạm Hòn Ngur và phao trôi SIO do Trung tâm nghiên cứu và phát triển quan trắc ven biển (CORDC), Viện Hải dương học Scripps, Đại học California quan trắc từ ngày 23/8/2017 đến ngày 20/12/2017.

c. Số liệu trường gió, áp, quỹ đạo bão: Số liệu gió, áp suất không khí tái phân tích ERA5 trong các cơn bão Doksuri (2017) để kiểm nghiệm các mô hình; Số liệu bão d4PDF, mô hình MRI-AGCM3, kịch bản RCP 8.5, để đánh giá nguy cơ ngập lụt ven biển Thanh Hóa ở tương lai trong điều kiện biến đổi khí hậu và nước biển dâng.

d. Số liệu sử dụng đất: Nghiên cứu sử dụng số liệu sử dụng đất (LULC) năm 2017 của Dự án khoa học ALOS/ALOS-2 của EORC thuộc JAXA, để tính hệ số Manning (n) trong các mô phỏng ngập lụt.

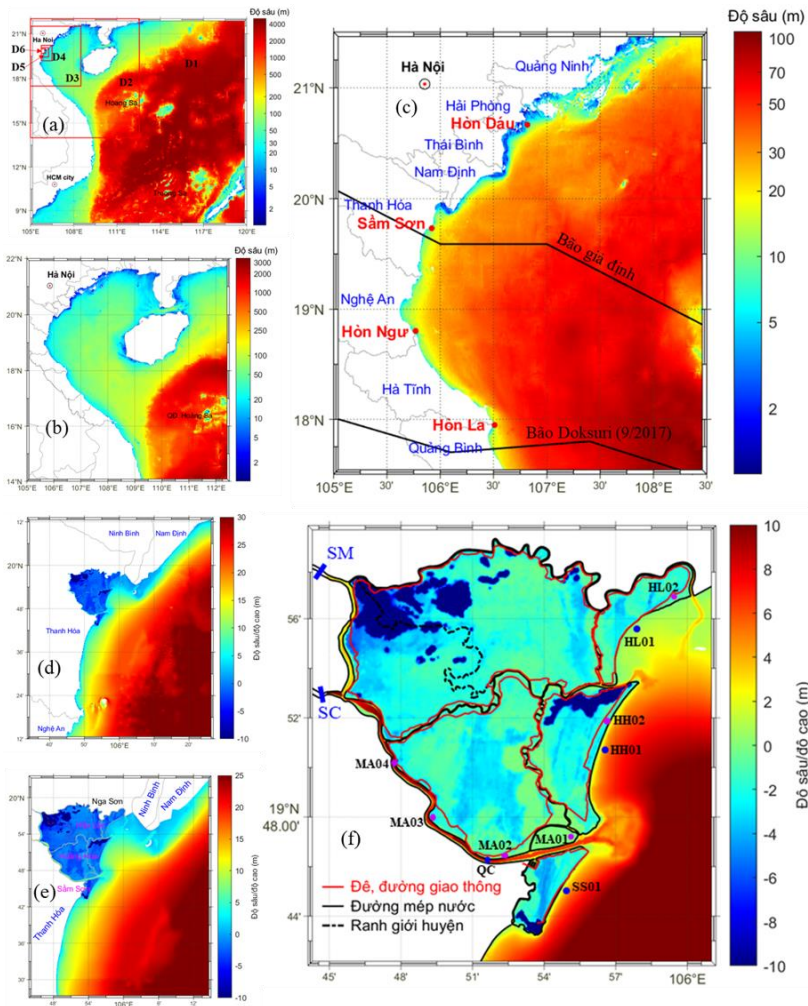
2.3. Phương pháp nghiên cứu

Để đạt được mục tiêu đề ra, Luận án sử dụng hai phương pháp nghiên cứu chính gồm: (1) Phương pháp mô hình số trị (mô hình tích hợp SuWAT): Mô phỏng các yếu tố thủy động lực và ngập lụt ven biển; (2) Phương pháp phân tích thống kê: Tính sai số, các đặc trưng của kết quả tính toán, mô phỏng.

2.4. Thiết lập mô hình

2.4.1. Lưới tính

Trong luận án sử dụng lưới lồng sáu cấp (Hình 2.10), với miền trong cùng D6 (Hình 2.10f) tập trung vào vùng ven biển Hậu Lộc, Hoằng Hóa và Sầm Sơn tỉnh Thanh Hóa. Độ phân giải của các miền tính D1, D2, D3, D4, D5 và D6 lần lượt là 4500m, 1500m, 500m, 150m, 50m và 20m.

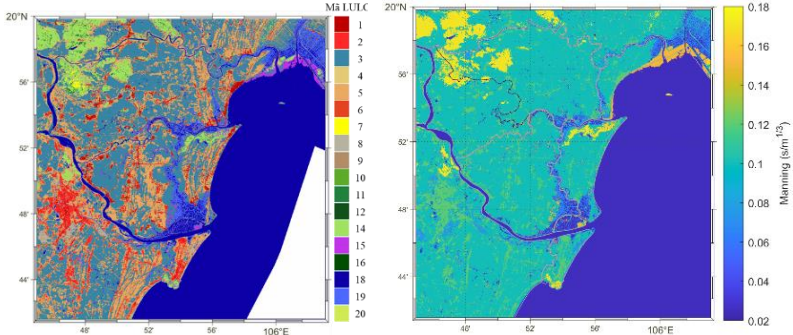


Hình 2.10. Miền tính ứng với 6 cấp lưới: (a) miền ngoài cùng, (b, c, d, e) các miền trung gian và (f) miền trong cùng tính ngập lụt

2.4.2. Ma sát đáy biển đổi theo không gian

Điểm mới của luận án so với các nghiên cứu trước đây là việc xây dựng trường hệ số nhám biến đổi theo không gian từ dữ liệu sử

dụng đất độ phân giải 30 m (Hình 2.12), thay vì sử dụng một giá trị hằng số. Điều này giúp nâng cao độ chính xác của kết quả mô phỏng ngập lụt ven biển.



(a) Mã sử dụng đất LULC

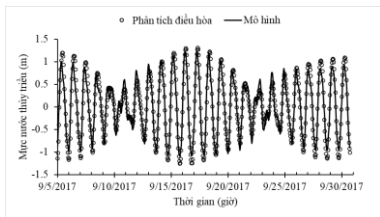
(b) Số Manning (n)

Hình 2.12. Phân bố mã LULC (a) và số Manning (b) cho miền D6

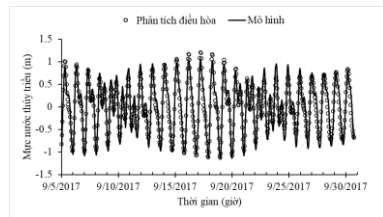
CHƯƠNG 3: ẢNH HƯỞNG CỦA TƯƠNG TÁC GIỮA CÁC YẾU TỐ THỦY ĐỘNG LỰC ĐẾN ĐỘ LỚN NƯỚC DÂNG, ĐỘ CAO SÓNG TẠI VEN BỜ TÂY VỊNH BẮC BỘ VÀ NGẬP LỤT TẠI VEN BIỂN TỈNH THANH HÓA

3.1. Kiểm nghiệm mô hình tại khu vực nghiên cứu

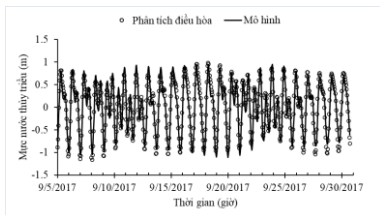
Do mô hình SuWAT đã được hiệu chỉnh và kiểm định trong nhiều nghiên cứu với một số miền tính tương đồng [Chiến, 2015], [Thủy và cộng sự, 2016], [Thủy và cộng sự, 2017] và [Thái và cộng sự, 2017]. Do vậy, Luận án chỉ chọn kiểm nghiệm mô hình với một cơn bão Doksuri (9/2017). Kết quả này cho thấy hiệu quả của mô hình tương đối tốt và có thể áp dụng vào các tính toán tiếp theo.



(a)

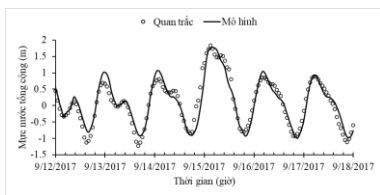


(b)

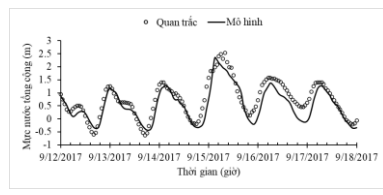


(c)

Hình 3.4. 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 Ngur (c) tháng 9/2017

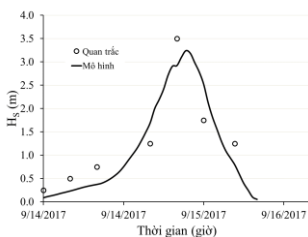


(a)

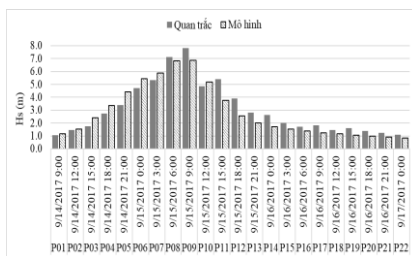


(b)

Hình 3.6. So sánh mực nước tổng hợp trong bão Doksuri (9/2017): (a) Hòn Hòn Ngur, (b) Quảng Châu



(a)



(b)

Hình 3.8. So sánh chiều cao sóng có nghĩa tính từ mô hình kết và quan trắc trong bão Doksuri 2017: (a) trạm Hòn Ngur, (b) Phao SIO.

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

3.2.1. Các kịch bản mô phỏng

Để nghiên cứu tác động của sự tương tác giữa nước dâng và sóng, 9 cơn bão lý tưởng được thiết kế từ cơn bão Doksuri (9/2017), tương ứng với các cấp bão trong Quyết định số 18/2021/QĐ-TTg (Bảng 3.2).

Bảng 3.2. Danh sách kịch bản bão trong các thí nghiệm số

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	33	33	33	33	33 (980)	33	33	33	33
2017/9/14/06:00	13	21	28	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: Bão Doksuri (9/2017)

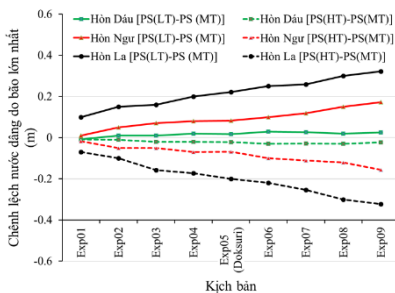
Chín kịch bản về cấp bão được sử dụng để mô phỏng nước dâng và sóng trong bão với phương án có và không xét đến tương tác giữa thủy triều, nước dâng do bão và sóng và kết hợp với 03 phương án về

pha thủy triều thấp, trung bình và cao.

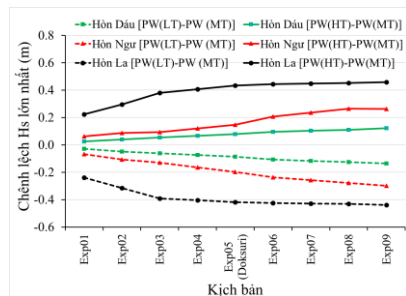
3.2.2. Ảnh hưởng của pha thủy triều đến nước dâng do bão và sóng

Kết quả cho thấy, so với pha triều trung bình, nước dâng do bão cao hơn ở pha triều thấp và thấp hơn ở pha triều cao. Tác động của pha thủy triều lên nước dâng do bão trở nên rõ ràng hơn khi bão mạnh lên và khi biên độ thủy triều cao hơn (Hình 3.14). Trong đó, “PS(HT)-PS(MT)” là hiệu của nước dâng trong pha triều cao và triều trung bình; “PS(LT)-PS(MT)” là hiệu của nước dâng trong pha triều thấp và trung bình. Tại Hòn La, với bão Exp09 “PS(HT)-PS(MT)” và “PS(LT)-PS(MT)” tương ứng là -0,32 m và 0,32 m.

Ảnh hưởng của pha thủy triều lên sóng ngược lại so với nước dâng do bão. Hình 3.17 cho thấy tại cả ba vị trí Hòn Dấu, Hòn Ngự và Hòn La, chênh lệch chiều cao sóng có nghĩa lớn nhất giữa pha triều cao và triều trung bình “PW(HT)-PW(MT)” có xu hướng tăng dần khi cường độ bão tăng, trong khi chênh lệch chiều cao sóng có nghĩa lớn nhất giữa pha triều thấp và triều trung bình “PW(LT)-PW(MT)” có xu hướng ngược lại. Tại Hòn La, chênh lệch độ cao sóng có nghĩa lớn nhất trong bão Exp09 đổ bộ vào pha triều cao và trung bình là 0,46 m.



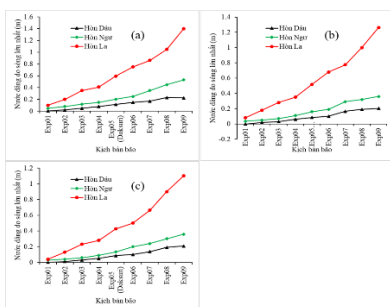
Hình 3.14. Chênh lệch nước dâng do bão lớn nhất trong các thí nghiệm



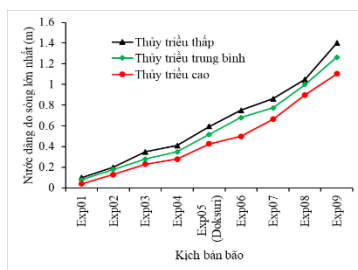
Hình 3.17. Chênh lệch chiều cao sóng có nghĩa lớn nhất trong các thí nghiệm

3.2.3. Ảnh hưởng của sóng đến nước dâng do bão

Tác động của sóng lên nước dâng do bão (nước dâng do sóng gây ra) được ước tính là hiệu của nước dâng do bão mô phỏng bằng mô hình kết hợp sóng trừ và mô hình không kết hợp sóng. Hình 3.20, 3.21 cho thấy, nước dâng lớn nhất do sóng gây ra tăng khi cường độ bão tăng lên từ Exp01 đến Exp09. Trong trường hợp siêu bão, nước dâng tại Hòn La (gần tâm bão đổ bộ) tăng 1,40 m (32,7%) khi xét đến tác động của sóng so với trường hợp không xét sóng. 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.



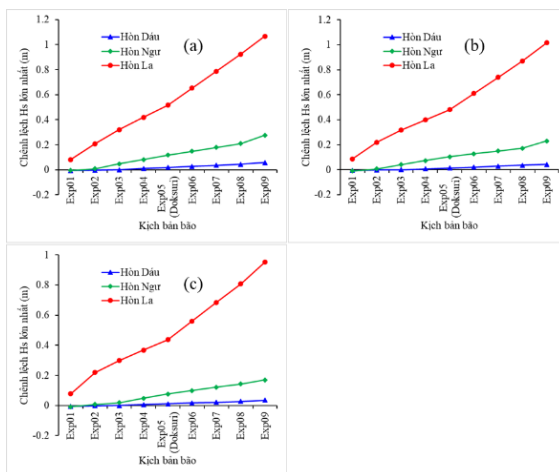
Hình 3.20. Nước dâng do sóng trong pha thủy triều thấp (a), trung bình (b) và cao (c).



Hình 3.21. 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 đến sóng

Kết quả trên hình 3.24 chỉ ra rằng ở khu vực ven biển, chiều cao sóng mô phỏng bằng mô hình kết hợp cao hơn so với mô phỏng bằng mô hình không kết hợp, đặc biệt là ở khu vực xung quanh Hòn La, gần tâm bão. Nhìn chung, nước dâng do bão làm tăng chiều cao sóng, đặc biệt trong các cơn bão mạnh. Tại Hòn La, chiều cao sóng tăng 0,95 m (24,4%) trong trường hợp siêu bão khi xét đến tác động của nước dâng.

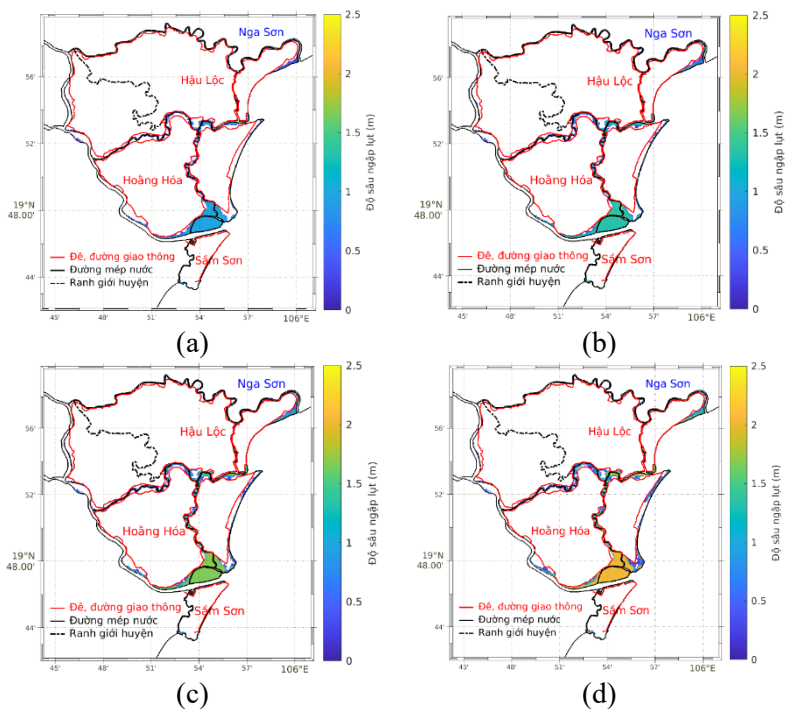


Hình 3.24. Chênh lệch của độ cao sóng có nghĩa lớn nhất tại Hòn Dấu, Hòn Ngự và Hòn La giữa trường hợp mô hình có và không tích hợp với nước dâng do bão. Bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp (a), trung bình (b) và cao (c).

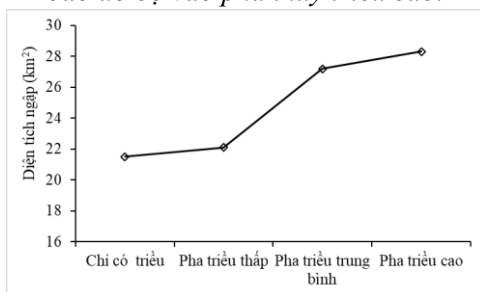
3.3. Ảnh hưởng của thủy triều, nước dâng do bão, nước dâng do sóng và dòng chảy sông tới ngập lụt ven biển tỉnh Thanh Hóa

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, bão Doksuri (9/2017) được giả định đổ bộ vào 03 pha triều cao, trung bình và thấp. Phân tích kết quả ngập lụt hình 3.28 và 3.29 cho thấy chênh lệch diện tích ngập trong 3 pha triều khác nhau không lớn mặc dù mực nước tổng hợp có sự chênh lệch lớn giữa các kịch bản, điều này là do bị giới hạn bởi các công trình bảo vệ bờ biển (đê), khi mực nước tổng hợp thấp hơn cao trình đê, vùng ngập chỉ xảy ra ở các khu vực ngoài đê. Tổng diện tích ngập lụt lớn nhất khi bão đổ bộ vào pha triều cao, trung bình và thấp tương ứng là 28,3 km², 27,2 km² và 22,1 km².



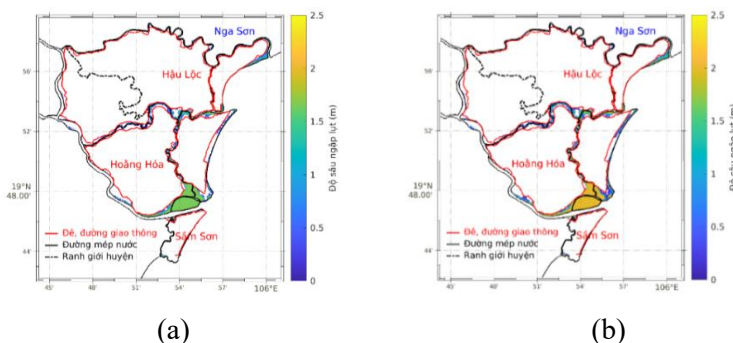
Hình 3.28. Phân bố ngập lụt trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản mô phỏng: (a) chỉ do đỉnh triều, (b) bão đổ bộ vào pha thủy triều thấp, (c) bão đổ bộ vào pha thủy triều trung bình và (d) bão đổ bộ vào pha thủy triều cao.



Hình 3.29. 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

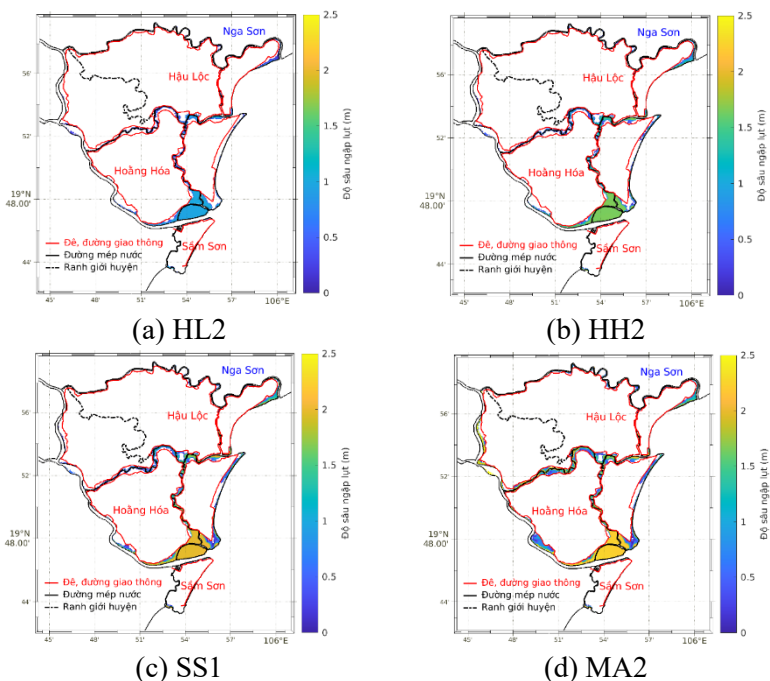
Khi xét đến ảnh hưởng của sóng, phân bố độ sâu ngập lớn nhất có sự khác nhau rõ rệt so với không xét tới ảnh hưởng của sóng (hình 3.30). Tổng diện tích ngập lụt khi có xét tới ảnh hưởng của sóng là 30,5 km², trong khi không xét đến ảnh hưởng của sóng là 27,2 km², nhỏ hơn 11% và độ sâu ngập lụt lớn nhất cũng nhỏ hơn 0,5 m.



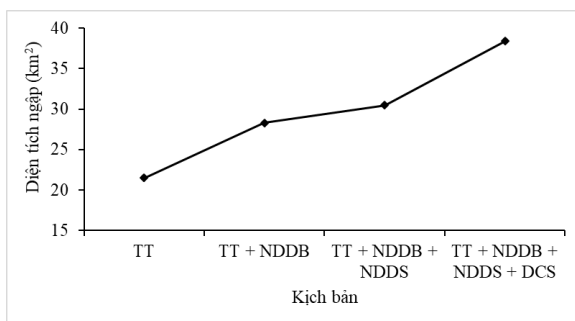
Hình 3.30. Phân bố ngập lụt trong bão Dokuri (9/2017), trường hợp mô phỏng (a) không và (b) có xét tới ảnh hưởng của sóng biển

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

Phân tích kết quả của các kịch bản cho thấy, khi xét tới ảnh hưởng của dòng chảy sông đã làm gia tăng phạm vi và độ sâu ngập lụt tại khu vực nghiên cứu, nhiều khu vực đã ngập trên 2,5 m (hình 3.35), đã khẳng định vai trò quan trọng của tương tác sông-biển trong việc khuếch đại mực nước tổng cộng và ngập lụt. Chênh lệch giữa phương án có và không xét tới dòng chảy sông của mực nước lớn nhất tại MA01, QC, MA02 và MA03, tương ứng là 0,19 m, 0,31 m, 0,4 m, 1,1m. Tổng diện tích ngập lụt trong các kịch bản là TT (21,5 km²), TT+NDDDB (28,3 km²), TT+NDDDB+NDDDS (30,5 km²) và TT+NDDDB+NDDDS+DCS (38,4 km²) (hình 3.36).



Hình 3.35. Phân bố ngập lụt lớn trong bão Doksuri (9/2017) với các kịch bản: 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 3.36. Tổng diện tích ngập do bão Doksuri (9/2017) với các phương án mô phỏng

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

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

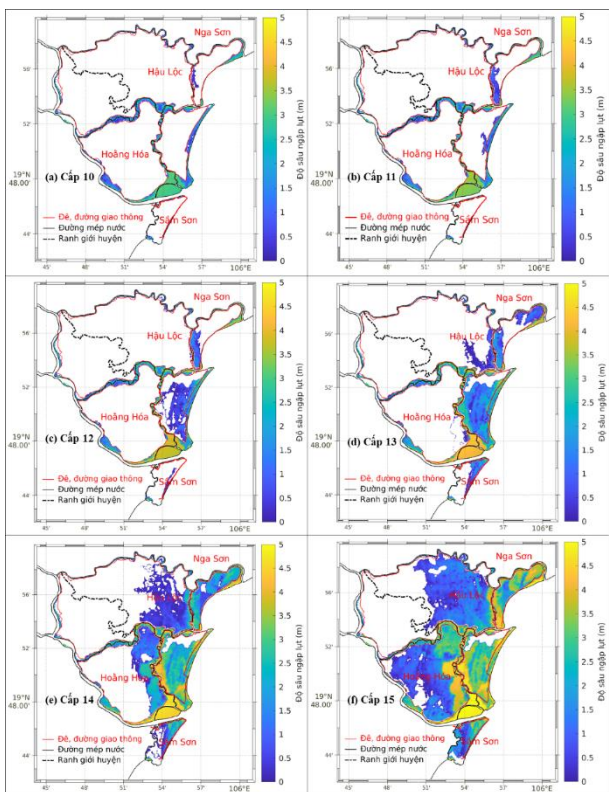
So với giai đoạn khí hậu hiện tại, tổng số lượng bão cũng như số lượng bão từ cấp 8-11 ở giai đoạn khí hậu tương lai giảm, trong khi đó số lượng bão mạnh (từ cấp 12 trở lên) lại tăng.

Nước dâng do bão lớn nhất giai đoạn 1951-2010 tập trung ở phía Bắc vịnh Bắc Bộ (Quảng Ninh–Nam Định), đạt gần 3,0 m, trong khi ở giai đoạn 2051–2110 tăng lên và có sự dịch chuyển xuống phía nam, lớn nhất khoảng 3,5 m tại khu vực Nghệ An–Hà Tĩnh.

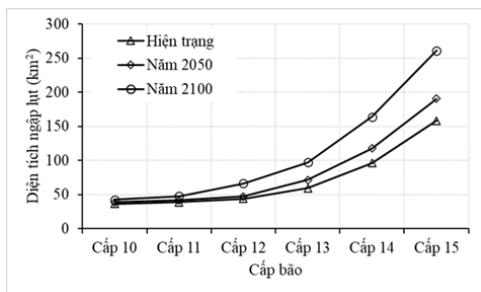
4.2. Nguy cơ ngập lụt ven biển Thanh Hóa

Ở hiện tại: Ngập lụt chủ yếu xảy ra ngoài đê biển đối với bão cấp 10–11, từ bão cấp 12 trở lên mực nước vượt đê và gây ngập trong đê. Diện tích ngập tăng từ 36,6 km² (bão cấp 10) đến 158,49 km² (bão cấp 15). Độ sâu ngập tăng theo cấp bão, các khu vực ngập sâu >3,0 m xuất hiện từ bão cấp 11, ngập sâu > 5 m chỉ xuất hiện trong bão cấp 15.

Trong tương lai (2051–2110), nguy cơ ngập lụt ven biển Thanh Hóa gia tăng. Năm 2065 (nước biển dâng 26 cm): ngập lụt trong đê xảy ra từ bão cấp 11, diện tích ngập tăng từ 38,77 km² (bão cấp 10) đến 190,75 km² (bão cấp 15). Độ sâu ngập tăng theo cấp bão, các khu vực ngập sâu > 5 m xuất hiện từ bão cấp 14. Đến năm 2110 (nước biển dâng 72cm): ngập lụt trong đê xảy ra ngay từ bão cấp 10, diện tích ngập tăng từ 42,64 km² (bão cấp 10) đến 260,99 km² (bão cấp 15).



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 2110



Hình 4.6. Tổng diện tích ngập lụt tại khu vực nghiên cứu với các cấp bão (cấp 10-15) đổ bộ ở giai đoạn hiện tại, năm 2065 và năm 2110

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 2065 và 2110) 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 cao nước dâng và độ cao sóng tại ven biển 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 độ cao mực nước tổng hợp và 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 2065 và 2110), 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 biến đổi khí 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 2065 và 2110 do mực nước biển trung bình tăng dần 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 2065 và 2110 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 2065 và 2110. 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 2065 khoảng gần 1/2 diện tích các khu vực

này sẽ ngập và năm 2110, 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 2110, 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 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 thủy 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 (2065 và 2110), biến đổi khí hậu sẽ làm thay đổi mực nước biển trung bình, dẫn tới có thể thay đổi về chế độ thủy động lực học vùng ven biển. 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 họa. 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 cho trường hợp bão Doksuri (9/2017), nghiên cứu trong tương lai nên xem xét các kịch bản bão có các đặc điểm khác nhau ảnh hưởng đến khu vực này. Hơn nữa, 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. **Phạm 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, **Phạm 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 Tiên (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), pp16-27.

4. **Phạm 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 Thuý 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.

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.

Hội thảo quốc tế và trong nước:

7. **Phạm 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, tr. 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.