TẠP CHÍ
KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN

Check for updates

Bài báo khoa học

Kết quả ban đầu về mô phỏng ngập lụt vùng ven biển Thanh hoá do nước dâng bão

Phạm Văn Tiến[1], Trần Thị Thuỳ Linh[2,4], Phạm Khánh Ngọc[2], Bùi Mạnh Hà[3], Nguyễn Bá Thủy[2]*

[1] Viện Khoa học Khí tượng Thuỷ văn và Biến đổi khí hậu; phamvantienbn@gmail.com
[2] Trung tâm Dự báo khí tượng thủy văn quốc gia; nguyentranlinh99@gmail.com; ngocpkchibo@gmail.com; thuybanguyen@gmail.com
[3] Trung tâm Hải văn; manhhamhc@gmail.com
[4] Khoa Các khoa học liên ngành - Đại học Quốc gia Hà Nội

*Tác giả liên hệ: thuybanguyen@gmail.com; Tel.: +84–975853471

Ban Biên tập nhận bài: 15/6/2023; Ngày phản biện xong: 17/8/2023; Ngày đăng bài: 25/8/2023

Tóm tắt: Trong nghiên cứu này, nguy cơ ngập lụt do nước dâng bão tại ven biển Thanh Hoá cho một số kịch bản về bão đổ bộ vào khu vực với độ cao thuỷ triều ở mức trung bình được mô phỏng bằng mô hình số trị tích hợp thuỷ triều, sóng biển và nước dâng do bão (mô hình SuWAT). Trong đó, mô hình SuWAT được phát triển thuật toán biên di động để mô phỏng ngập lụt do nước dâng bão. Kết quả mô phỏng cho thấy với bão cấp 12 và thời gian mô phỏng 90 giờ kể từ khi bão hình thành thì tại thời điểm 71 giờ, mực nước tại ven biển Thanh Hoá bắt đầu dâng, thời điểm sau 73 giờ nước dâng đã bắt đầu gây ngập tại một số khu vực trũng ven biển và dọc theo lưu vực các sông, tại thời điểm 79 giờ hầu hết các khu vực có nước dâng đã ngập sâu nhất. Khu vực có diện tích ngập rộng và sâu nhất là ven biển huyện Hậu Lộc, quanh lưu vực sông Yên, sông Mã, sông Trường Giang và sông Lèn. Với trường hợp bão cấp 15 đổ bộ, tổng diện tích ngập tại ven biển Thanh Hoá lên tơi 153,2 km^2. Đây là những kết quả nghiên cứu ban đầu về ngập lụt ven biển do nước dâng bão, làm cơ sở để tiếp tục phát triển mô hình cũng như thực hiện trong nhiều kịch bản khác nhau về địa hình và cấp bão đổ bộ.

Từ khóa: Bão; Nước dâng do bão; Ngập lụt ven biển; Mô hình tích hợp.

1. Mở đầu

Bão là thiên tai có nguồn gốc khí tượng thủy văn (KTTV) nguy hiểm mà hệ quả là hiện tượng ngập lụt vùng ven bờ, xói lở bờ và xâm nhập mặn do nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn, nhất là trong bối cảnh biến đổi khí hậu, được nhận định sẽ có nhiều bão mạnh/siêu bão với diễn biến bất thường có thể ảnh hưởng tới đất liền Việt Nam. Trên thế giới, lịch sử đã chứng kiến nhiều cơn bão gây nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn làm ngập vùng ven bờ trên diện rộng: Bão Katrina đổ bộ vào bang New Orleans Mỹ tháng 8 năm 2005 gây nước dâng tới 6,0 m làm khoảng 1800 người chết, thiệt hại 81,2 tỷ đô la với nguyên nhân chủ yếu do ngập lụt bởi nước dâng cao; Bão Nargis đổ bộ vào Myanmar tháng 5 năm 2008, là cơn bão gây thương vong về người nhiều nhất trong lịch sử Myanmar, số người chết tới 90.000 và hơn 56.000 người mất tích, ước tính thiệt hại khoảng 10 tỷ đô la; Siêu bão Haiyan với cấp 17 tràn vào Phillipine đã làm chết hơn 7000 người, trong đó chủ yếu bởi ngập lụt do nước dâng bão cao tới 5m đúng vào thời điểm thủy triều cao [1]. Tại Việt Nam, lịch sử đã ghi nhận nhiều cơn bão gây nước biển dâng cao kèm theo sóng lớn làm tràn, vỡ đê, gây ngập lụt trên diện rộng. Riêng giai đoạn từ năm 2005 đến nay đã có một loạt cơn bão đổ bộ vào thời điểm

triều cường với nước dâng bão cao từ 1-2 m làm vỡ đê, gây ngập úng nghiêm trọng (bão Washi năm 2005 tại Hải Phòng; bão Damrey năm 2005 tại Nam Định; bão Xangsane năm 2006 và bão Ketsana năm 2009 tại Huế và Đà Nẵng, bão Kalmaegy năm 2014 tại Quảng Ninh, bão Doksuri năm 2017 tại Nghệ An-Hà Tĩnh, bão Vamco năm 2020 tại Quảng Bình-Quảng Trị) [1–5]. Bão Damrey (9/2005) với cấp gió 10-11 đổ bộ trực tiếp vào ven Biển Nam Định đúng vào kỳ triều cường gây nước dâng và sóng lớn làm vỡ đê, ngập nhiều khu vực sâu trong đê [1]. Bão Doksuri (7/2017) đổ bộ vào ven biển Nghệ An-Hà Tĩnh đúng thời điểm ven biển Bắc Bộ đang kỳ triều cao đã gây nước dâng tràn ngập nhiều tuyến đê biển từ Hải Phòng tới Hà Tĩnh làm ngập úng nhiều khu vực trũng Hình 1 [6].

Hình 1. Ngập lụt ven bờ do nước dâng và sóng trong bão tại ven biển Thanh Hóa trong bão Duksuri tháng 9/2017: (a) Tại ven biển Sầm Sơn; (b) Tại đê biển Hậu Lộc [6].

Chính vì sự tàn khốc của bão nên nghiên cứu về bão và nước dâng đã được thực hiện theo nhiều hướng tiếp cận khác nhau để phục vụ dự báo, cảnh báo cũng như phục vụ quy hoạch và thiết kế các công trình trên biển, ven biển. Do hạn chế về năng lực tính toán nên tới thời điểm hiện tại các nghiên cứu về nước dâng bão chủ yếu tập trung đánh giá cũng như xây dựng công nghệ dự báo, cảnh báo độ cao nước dâng ở mép nước, chưa có nhiều nghiên cứu về ngập lụt ven biển do nước dâng bão, nhất là hướng nghiên cứu bằng mô hình số trị.

Trên thế giới, gần đây xu hướng xây dựng mô hình số trị để mô phỏng ngập lụt do nước dâng bão ngày càng được phát triển do đáp ứng được năng lực tính toán. Các nghiên cứu ban đầu được thực hiện dựa trên phát triển mô hình nước nông 2 chiều với nước dâng do tác động của gió và khí áp [7–11]. Gần đây, ảnh hưởng của thuỷ triều và sóng đối với mô phỏng nước dâng và ngập lụt ven biển đã được xem xét trong nhiều nghiên cứu gần đây [12–16].

Tại Việt Nam có thể điểm qua vài công trình nghiên cứu về ngập lụt ven biển do nước dâng bão: Trong năm 2012, [17] 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 bão ứng với tần suất 1%, 2%, 5%, 10% và 20% và nước biển dâng do biến đổi khí hậu 0 c m, 30 cm và 75 cm và xây dựng phần mềm trợ giúp ra quyết định. Trong năm 2016, sau sự kiện cơn bão Haiyan (11/2013) gây ngập lụt do nước biển dâng và sóng trong bão trên diện rộng tại Philippines, Tổng cục Phòng, chống thiên tai, Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn đã xây dựng bản đồ nguy cơ ngập ven biển cho tình huống bão mạnh/siêu bão đổ bộ vào ven biển Việt Nam, trong đó có khu vực ven biển tỉnh Thanh Hóa [18]. Tuy nhiên, dự án này chỉ tập trung xây dựng bản đồ ngập ven biển cho một số kịch bản xác định của vi trí bão đổ bộ với cấp bão mạnh tới siêu bão (cấp 12-16) tại một số pha thủy triều. Ảnh hưởng của thủy triều và sóng đến ngập lụt do nước dâng do bão tại một số khu vực Miền Trung cũng được nghiên cứu bằng các mô hình tích hợp [19–21].

Theo yêu cầu thực tế hiện nay, thông tin dự báo về ngập lụt vùng ven biển khi bão ảnh hưởng cần được cung cấp thường xuyên theo ca dự báo tới các cơ quan phòng chống thiên tai để phục vụ xây dựng phương án ứng phó đối với tất cả các cơn bão có khả năng gây ngập chứ không chỉ với bão mạnh/siêu bão vì trên thực tế hiện tượng ngập lụt vùng ven biển do

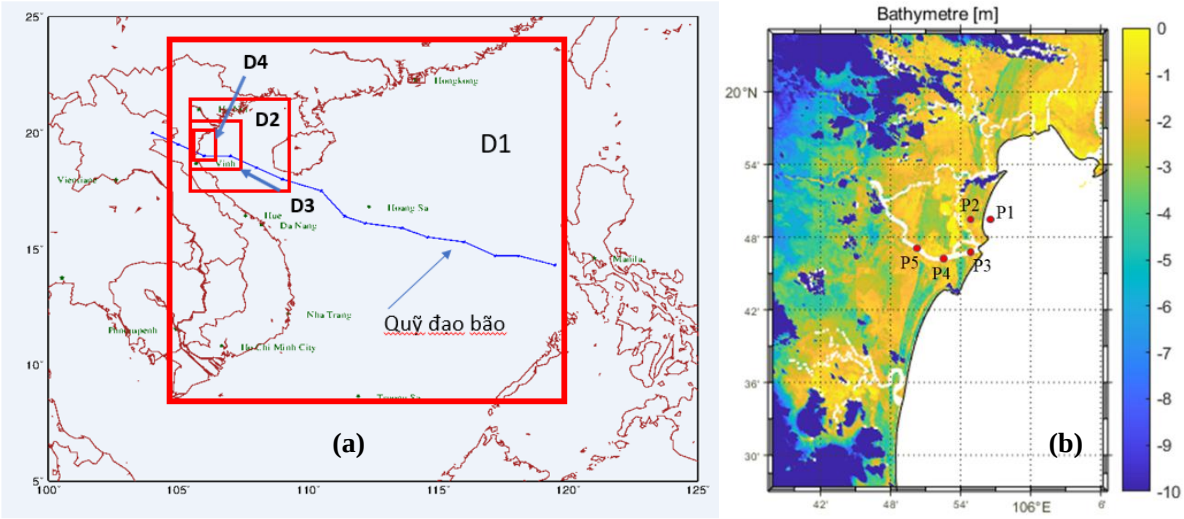
nước dâng và sóng lớn trong bão không chỉ xảy ra trong bão mạnh/siêu bão mà có nhiều trường hợp bão có cường độ không lớn nhưng đổ bộ vào thời điểm triều cường đã gây ngập úng tại nhiều khu vực trũng kể cả tại những khu vực có đê biển chắn như đã phân tích ở trên. Để dự báo ngập lụt có độ tin cậy cao cần đòi hỏi số liệu chi tiết về về địa hình và độ phân giải theo không gian của lưới tính. Tuy nhiên, đây là vấn đề khó khăn đối với bài toán trong dự báo nghiệp vụ vì phải đảm bảo thời gian phát thông tin dự báo, cảnh báo. Trong nghiên cứu này, mô hình tích hợp thuỷ triều, sóng biển và nước dâng do bão SuWAT được phát triển thuật toán biên di động để mô phỏng ngập lụt ven biển do nước dâng bão [12–14]. Kết quả về mô phỏng ngập lụt do một số cấp bão đổ bộ vào khu vực ven biển Thanh Hoá được phân tích.

2. Số liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Số liệu phục vụ nghiên cứu

Để mô phỏng ngập lụt do nước dâng do bão tại ven biển Thanh Hoá số liệu địa hình ven biển Thanh Hoá được thu thập từ bản đồ địa hình tỷ lệ 1/50.000 cho toàn bộ khu vực. Đây là nguồn dữ liệu được Tổng cục Phòng, chống thiên tai (nay là Cục Quản lý đê điều và Phòng chống thiên tai), Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn chuyển giao trong dự án "*Xây dựng bản đồ nguy cơ ngập ven biển cho tình huống bão mạnh, siêu bão đổ bộ vào ven biển Việt Nam*", trong đó có khu vực ven biển tỉnh Thanh Hóa [8]. Riêng với khu vực ven biển Sầm Sơn, số liệu địa hình đã được cập nhật từ bản đồ tỷ lệ 1/10.000 do Cục Biển và hải đảo Việt Nam thực hiện những năm gần đây. Trên hình 2b thể hiện phân bố độ cao địa hình khu vực ven biển Thanh Hoá ứng với miền tính D4. Có thể thấy rằng khu vực ven biển phía bắc của tỉnh thuộc địa danh huyện Hậu Lộc sẽ là nơi có nguy cơ ngập cao khi bão đổ bộ trong trường hợp không có đê biển che chắn, do đây là khu vực có địa hình trũng, thoải. Trong nghiên cứu này, do hạn chế về thời gian nên số liệu về đê biển chưa được cập nhật vào lưới tính của mô hình, đây cũng là hạn chế của nghiên cứu này.

Nguy cơ ngập lụt tại ven biển Thanh Hoá được tính với bão có quỹ đạo đổ bộ giả định theo hướng Tây Tây Bắc như trên hình 2a. Theo kết quả nghiên cứu [22], thông qua phân tích số liệu bão dự tính cho giai đoạn 2051-2110 từ mô hình MRI-CGCM3 thì đây là quỹ đạo bão với cường độ mạnh nhất đổ bộ vào khu vực và gây nước dâng lớn nhất tại ven biển Thanh Hoá. Do vậy, trong nghiên cứu này sẽ sử dụng quỹ đạo bão như trên hình 2a với cấp bão đổ bộ từ cấp 10 đến cấp 15 để tính ngập lụt tại ven biển Thanh Hoá. Thời gian tồn tại của bão là 90 giờ, các thông tin cơ bản của cấp bão được trình bầy trong Bảng 1.



Hình 2. (a) Miền tính và quỹ đạo bão sử dụng để mô phỏng; (b) Địa hình lưới tính chi tiết (D4) khu vực ven biển Thanh Hoá và vị trí điểm trích xuất.

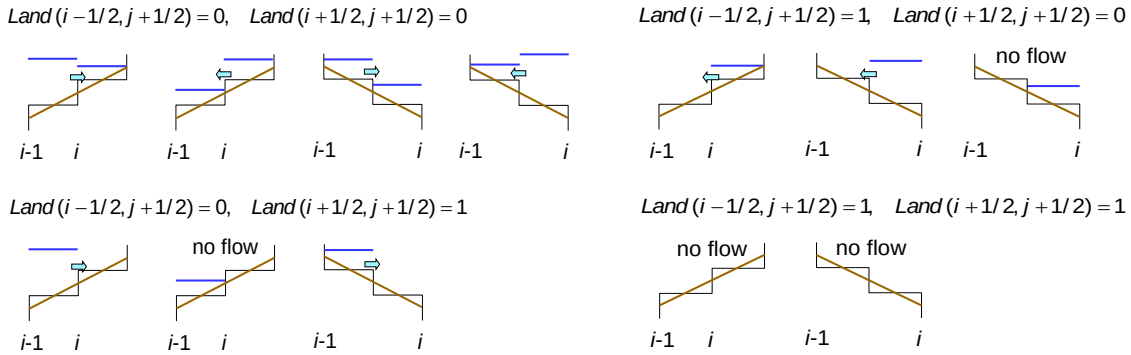
Bảng 1. Các thông số cơ bản của bão.

TT	Cấp bão	Áp suất tại tâm (hPa)	Bán kính gió cực đại (km)	Tốc độ chi 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

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, mô hình tích hợp thủy triều, sóng biển và nước dâng do bão (*SuWAT-Surge Wave and Tide*) được sử dụng để tính nước dâng do bão trong một số nghiên cứu trước [12–14] đã được phát triển tính năng mô phỏng ngập lụt thông qua xây dựng thuật toán biên di động. Trên bảng 1 mô tả thuật toán biên di động của mô hình minh hoạ theo hương × (kinh tuyến) với chỉ số "*land*" là một biến trong mô hình. Trong đó chỉ "*land*" được xác định là ngập (hay kho) nếu "land = 0" và không ngập (ướt) nếu "land = 1". Trong suốt quá trình tính của mô hình, tại từng bước thời gian dao động mực nước tại từng điểm Z(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.

Bảng 2. Thuật toán mô tả biên di động trong mô hình SuWAT.



Để mô phỏng ngập lụt do nước dâng tại ven biển Thanh Hoá, mô hình SuWAT được thiết kế theo lưới vuông và lồng 04 lớp. Miền tính và độ phân giải của từng lưới tính thể hiện như trên hình 2a và bảng 3, thông tin cụ thể như sau:

- Lưới tính Biển Đông (lưới D1): Đây là lưới tính lớn nhất, bao phủ từ vĩ độ 8°-22°N, kinh độ 105° - 120°E với độ phân giải ngang 4 phút (khoảng 7400 m).
- Lưới D2: Độ phân giải 2000m trong phạm vi 18.0° - 22.0°N, 105.0° - 110.0°E.
- Lưới D3: Độ phân giải 1000m trong phạm vi 18.40° - 20.24°N, 105.5° - 107.0°E.
- Lưới D4 (chi tiết nhất cho ven biển Thanh Hoá): Độ phân giải 200 m trong phạm vi 19.450° - 20.086°N, 105.625° - 106.110°E.

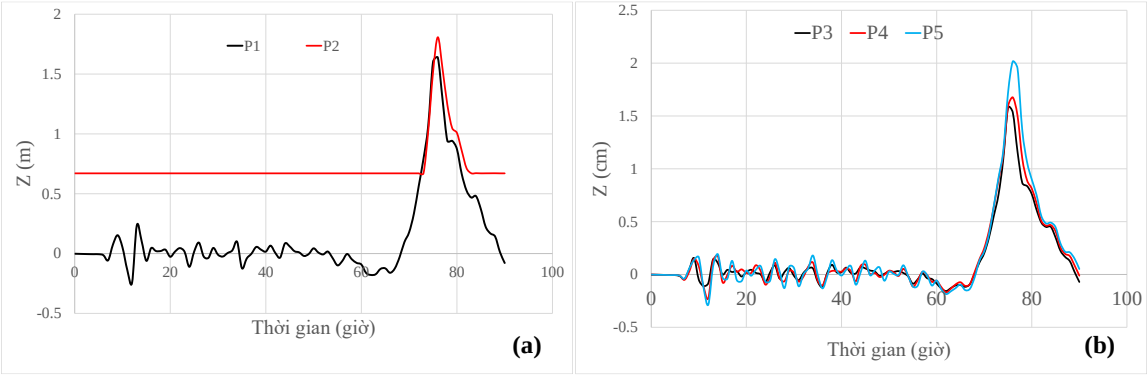
Bảng 3. Miền tính và độ phân giải các lưới tính của mô hình.

Lưới	Miền tính	Số điểm tính theo kinh & vĩ tuyến	Độ phân giải (m)
D1	105°- 120°E, 8-22°N	200 × 192	8000 × 8000
D2	105.0°- 110°E, 18.0°-22°N	274 × 214	2000 × 2000
D3	105.5°- 107°E, 18.0°-20.24°N	164 × 246	1000 × 1000
D4	105.625°- 106.11°E, 19.45°-20.086°N	264 × 350	200 × 200

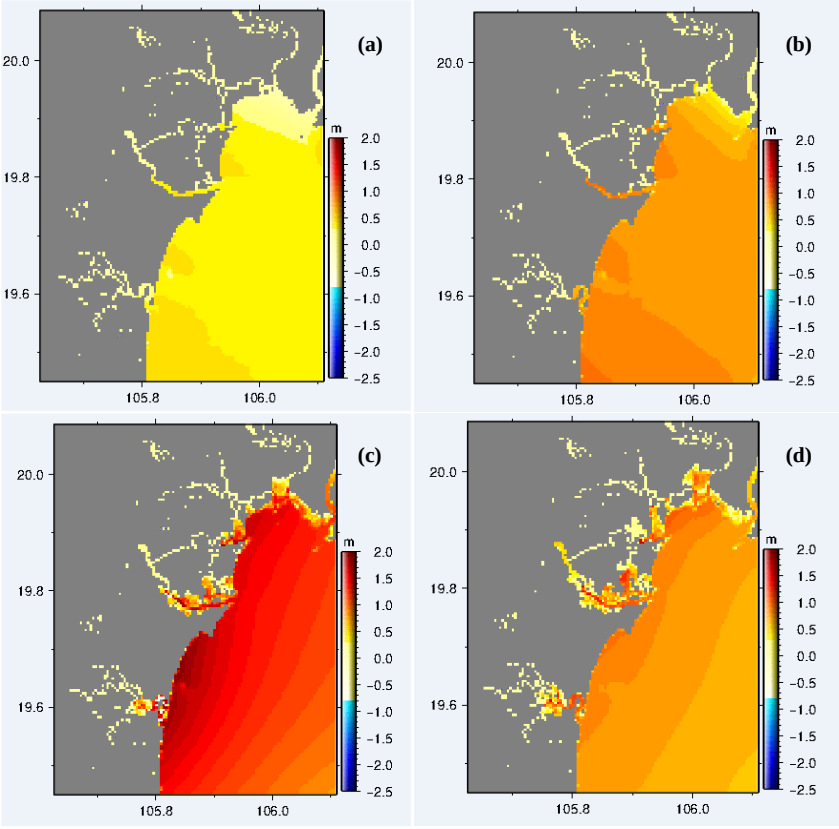
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Diễn biến ngập lụt do nước dâng bão tại ven biển Thanh Hoá

Trên hình 3 là dao động mực nước trên nền mực nước triều trung bình tại 05 vị trí điểm minh hoạ trên hình 2a. Đây là kết quả trường hợp mô phỏng ngập lụt ven biển Thanh Hoá với bão cấp 12 đổ bộ vào kỳ triều trung bình. Thời gian tính 90 giờ từ khi bão hình thành cho tới lúc đi sâu vào đất liền. Trong đó P_1 là vị trí ngoài biển, gần bờ có độ sâu 2,0 m, P_2 là vị trí trên đất liền có độ cao 0,67 m, các điểm P_3, P_4 và P_5 nằm dọc theo trên sông Mã. Kết quả phân tích cho thấy, tại vị trí P_1, sau 69 giờ nước biển bắt đầu dâng, nước dâng cao nhất là 1,54 m tại thời điểm 75 giờ và sau đó xuống dần. Tại điểm P_2 nước dâng muộn hơn, bắt đầu lúc 73 giờ và đạt đỉnh 1,81m lúc 76 giờ. Các điểm P_3, P_4 và P_5 nằm dọc trên sông Mã nên thời gian lan truyền nước dâng nhanh hơn, thời gian nước bắt đầu dâng tại 03 điểm gần như trùng nhau, nhưng thời gian nước dâng đạt đỉnh tại các điểm sâu bên trong muộn hơn, cụ thể tại P_3 sau 75 giờ, P_4 sau 76 giờ và P_5 sau 77 giờ. Độ cao nước dâng lớn nhất tại P_3, P_4, P_5 tương ứng là 1,57 m, 1,67 m và 2,10 m.

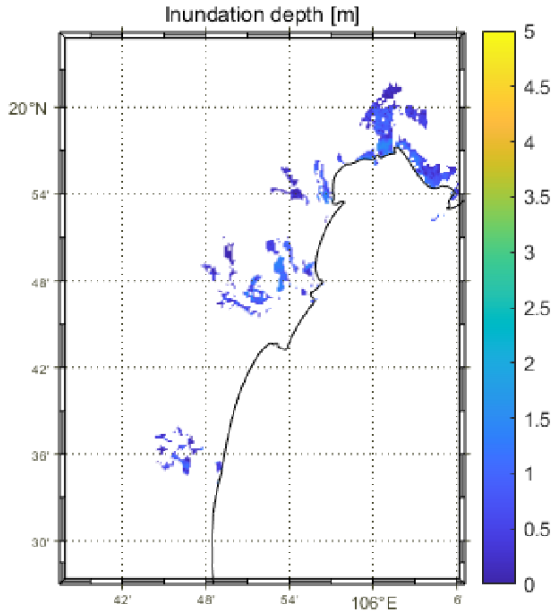


Hình 3. Dao động mực nước tại các vị trí với trường hợp bão cấp 12 đổ bộ kỳ triều trung bình.



Hình 4. Phân bố dao động mực nước sau: (a) 71 giờ, (b) 73 giờ, (c) 76 giờ và (d) 79 giờ.

Phân bố độ cao mực nước trên nền mực nước biển tại các thời điểm sau 71 giờ, 73 giờ, 76 giờ và 79 giờ thể hiện trên hình 4. Đây là kết quả của miền tính chi tiết nhất (miền D_4). Trong đó, tại thời điểm 71 giờ, mực nước tại ven biển Thanh Hoá Bắt đầu dâng, thời điểm sau 73 nước dâng đã bắt đầu gây ngập tại một số khu vực trũng ven biển và dọc theo lưu vực các sông đổ ra biển Thanh Hoá. Tại thời điểm 76 giờ, nhiều khu vực bị ngập sâu nhất và sau đó nước bắt đầu rút. Tại thời điểm 79 giờ, mặc dù tại phần lớn khu vực bị ngập mực nước đã rút, tuy nhiên nhiều phần đất sâu trong đất liền vẫn tiếp tục bị ngập. Phân bố độ sâu ngập lớn nhất thể hiện trên hình 5, trong đó khu vực bị ngập nhiều nhất là phần ven biển phía bắc tỉnh thuộc huyện Hậu Lộc và quanh lưu vực sông Yên, sông Mã, sông Trường Giang và sông Lèn. Thống kê diện tính ngập theo khoảng độ cao nước dâng thể hiện trên bảng 3 cho thấy tổng diện tích bị ngập khoảng 14,9 km^2 và độ sâu ngập lớn nhất tới hơn 2,0 m. Mặc dù mô hình SuWAT đã được hiệu chỉnh và kiểm định với tính nước dâng do bão tại khu vực trong một số nghiên cứu trước [1, 22], tuy nhiêu, do thiếu số liệu quan trắc về ngập lụt nên kết quả mô phỏng ngập lụt chưa được đánh giá, đây cũng là hạn chế trong nghiên cứu này và sẽ được triển khai trong thời gian tới.



Hình 5. Phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất tại ven biển Thanh Hoá với bão cấp 12 đổ bộ kỳ triều trung bình.

Bảng 3. Diện tích ngập theo khoảng độ cao nước dâng do bão trường hợp bão cấp 12 đổ bộ kỳ triều trung bình.

Thứ tự	Khoảng nước dâng do bão (m)	Diện tích ngập (km^2)
1	0,0-0,5	7,3
2	>0,5-1,0	4,5
3	>1,0-1,5	2,9
4	>1,5-2,0	0,3
5	>2,0-2,5	0,1
6	>2,5-3,0	0

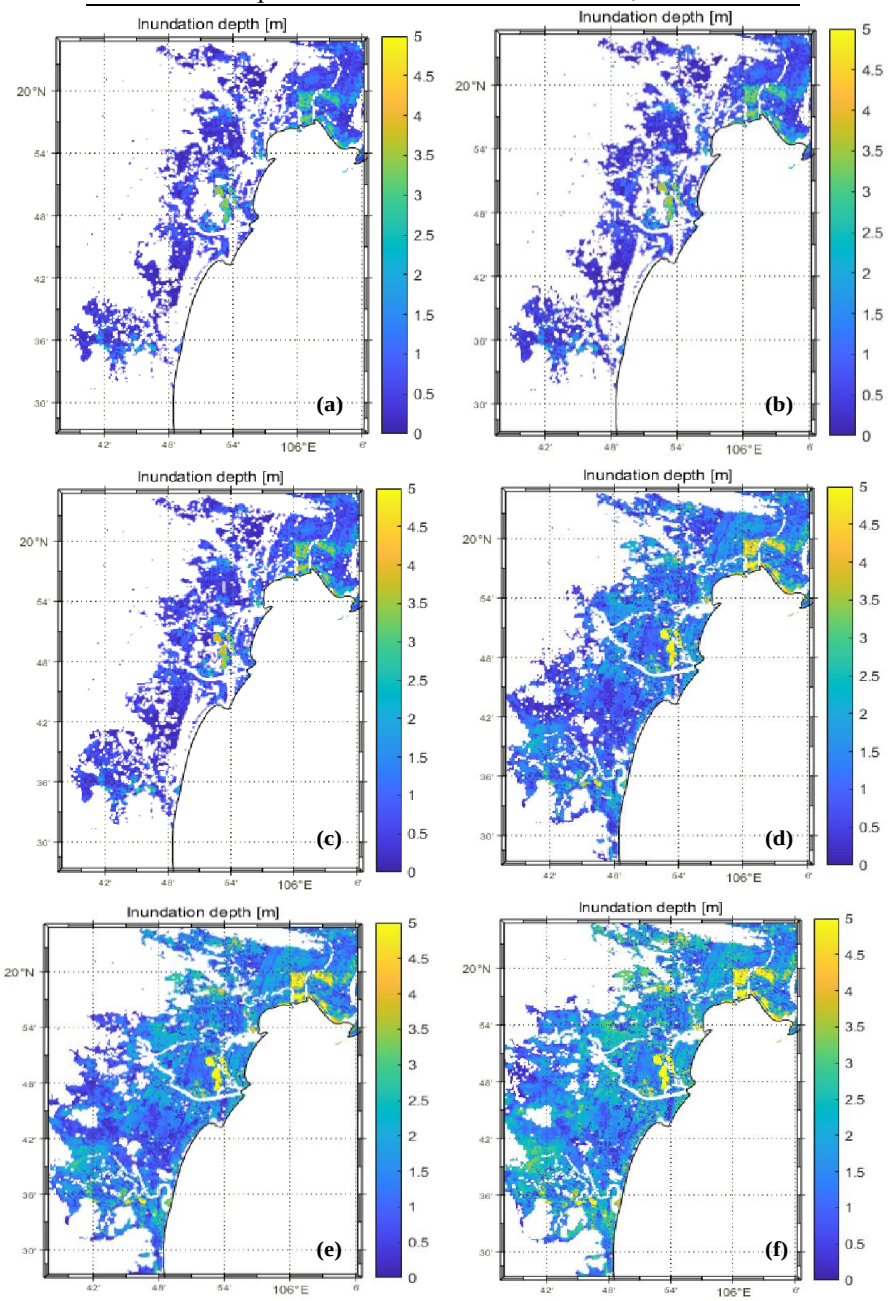
3.2. Kịch bản ngập lụt với các cấp bão đổ bộ lúc triều cường

Khi bão đổ bộ vào kỳ triều cường luôn có nguy cơ cao về ngập lụt tại vùng ven biển do tổ hợp của thuỷ triều và nước dâng do bão. Mức độ ngập vùng ven biển Thanh Hoá do nước dâng bão với trường hợp bão với quỹ đạo như trên hình 2a và cấp 10-15 đổ bộ vào lúc triều cường được thống kê trên bảng 4, phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất thể hiện trên hình 6. Trong đó, bão cấp 14 và 15 được lựa chọn mô phỏng bởi nghiên cứu [19] cho thấy khu vực ven biển Bắc Bộ có thể có bão cấp 14-15 đổ bộ trong tương lai. Theo đó, các khu vực đất trũng ven

biển và quanh lưu vực sông có thể ngập với diện tích 93,9 km^2 trong trường hợp bão cấp 10 đổ bộ. Với bão cấp 15, diện tích ngập lên tới 153,2 km^2. So sánh với trường hợp bão cấp 12 đổ bộ vào lúc triều trung bình, diện tích ngập lụt khi bão đổ bộ vào lúc triều cường đã tăng 15,6 lần (Hình 5 và Hình 6c).

Bảng 4. Diện tích ngập với các cấp bão đổ bộ vào lúc triều cường.

Cấp bão	Diện tích ngập (km^2)
Cấp 10	93,9
Cấp 11	98,1
Cấp 12	103,3
Cấp 13	135,0
Cấp 14	143,8
Cấp 15	153,2



Hình 6. Phân bố độ sâu ngập lụt lớn nhất tại ven biển Thanh Hoá với bão cấp 10 (a), 11 (b), 12 (c), 13 (d), 14(e) và 15 (f) đổ bộ kỳ triều cường.

4. Kết luận và kiến nghị

Trong nghiên cứu này, mô hình số trị tích hợp thuỷ triều, sóng biển và nước dâng do bão (mô hình SuWAT) được phát triển thuật toán biên di động để mô phỏng ngập lụt do nước dâng bão tại ven biển Thanh Hoá. Mô hình đã được thử nghiệm mô phỏng ngập lụt tại ven biển Thanh Hoá với một số cấp bão mạnh đổ bộ vào khu vực. Các khu vực bị ngập nhiều nhất là phần ven biển phía bắc tỉnh thuộc huyện Hậu Lộc và quanh lưu vực sông Mã, sông Trường Giang, sông Lèn và sông Yên. Diện tích và độ sâu ngập tăng dần theo cấp bão. Diện tích ngập lụt khi bão đổ bộ vào lúc triều cường lơn hơn 15,6 lần so với khi đổ bộ vào lúc triều trung bình (trường hợp bão cấp 12). Mặc dù kết quả mô phỏng ngập lụt chưa được đánh giá với số liệu thực tế, tuy nhiên mô hình SuWAT đã được kiểm định với nước dâng do bão tại khu vực và xu thế của kết quả mô phỏng tương đối phù hợp với lan truyền nước dâng trong thực tế, đây là cơ sở để tiếp tục triển khai phát triển mô hình này. Kiểm định mô hình với số liệu thực tế, sử dụng số liệu địa hình chi tiết với các công trình ven biển trên khu vực như đê biển và xem xét ảnh hưởng của nước dâng do sóng cũng như dòng chảy sông tới ngập lụt ven biển khi bão ảnh hưởng sẽ là những hướng nghiên cứu tiếp theo.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: N.B.T., B.M.H., P.V.T.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: N.B.T., T.T.T.L., P.K.N.; Xử lý số liệu: T.T.T.L., P.K.N.; Phân tích mẫu: B.M.H., P.V.T., P.K.N.; Lấy mẫu: B.M.H., P.V.T., P.K.N.; Viết bản thảo bài báo: N.B.T., P.K.N.; Chỉnh sửa bài báo: N.B.T., P.V.T.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường, mã số TNMT.2022.06.04 và đề tài Độc lập cấp quốc gia mã số ĐTĐL.CN-46/22, tập thể tác giả xin chân thành cảm ơn.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Thủy, N.B. Nghiên cứu lựa chọn mô hình dự báo nước dâng do bão vào dự báo nghiệp vụ tại Việt Nam. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2017.
2. Chiến, Đ.Đ.; Thủy, N.B.; Sáo, N.T.; Thái, T.H.; Kim, S. Nghiên cứu tương tác sóng và nước dâng do bão bằng mô hình số trị. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2014**, *647*, 19–24.
3. Thủy, N.N. Nghiên cứu cơ chế gây nước dâng sau khi bão đổ bộ tại ven biển Bắc Bộ. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển* **2017**, *17(4B)*, 208–216.
4. Thuy, N.B.; Kim, S.; Dang, V.H.; Cuong, H.D.; Wettre, C.; Hole, L.R. Assessment of Storm Surge along the coast of Central Vietnam. *J. Coastal Res.* **2017**, *33*, 518–530.
5. Thuy, N.B.; Kim, S.; Anh, T.N.; Cuong, N.K.; Thuc, P.T.; Hole, L.H. The influence of moving speeds, wind speeds, and sea level pressures on after-runner storm surges in the Gulf of Tonkin, Vietnam. *Ocean Eng.* **2020**, *212*, 107613.
6. Trực tuyến: https://vtv.vn/trong-nuoc/bao-so-10-gay-mua-lon-tai-thanh-hoa-moi-tuyen-duong-ngap-trong-nuoc-20170915172525371.htm.
7. Brocchini, M.; Dodd, N. Nonlinear shallow water equation modelling for coastal engineering. *J. Waterway Port Coastal Ocean Eng.* **2008**, *134(2)*, 104–120.
8. Chen, X.; Ji, P.; Wu, Y.; Zhao, L. Coupling simulation of overland flooding and underground network drainage in a coastal nuclear power plant. *Nucl. Eng. Des.* **2017**, *325*, 129–134.

9. Choi, J.W.; Jun, H.D. Inundation damage assessment for coastal urban area considering complex causes of inundation. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* **2018**, *18*, 283–290.
10. Dasgupta, S.; Huq, M.; Khan, Z.H.; Ahmed, M.M.Z.; Mukherjee, N.; Khan, M.; Pandey, K.D. Vulnerability of Bangladesh to cyclones in a changing climate: Potential damages and adaptation cost. World Bank Policy Research Working Paper, 2010.
11. Didier, D.; Bernatchez, P.; Boucher-Brossard, G.; Lambert, A.; Fraser, C.; Barnett, R.L.; Wierts, S.V. Coastal flood assessment based on field debris measurements and wave runup empirical model. *J. Mar. Sci.* **2015**, *3(3)*, 560–590.
12. Kim, S.; Mase, H.; Kawasaki, K.I.; Tuhi, M.; Mizutani, H.; Hiraishi, T. Surge-wave-tide prediction model including transient wave runup, overtopping and overflow modelling. *J. Jpn. Soc. Civil Eng. Ser B2 (Coastal Eng.)* **2018**, *74(2)*, I_547-I_552.
13. Kim, S.Y.; Yasuda, T.; Mase, H. Storm surge simulations occurred in Tosa Bay by using surge-wave-tide coupled model. *Annu. J. Coastal Eng.* **2008**, *55*, 321–325.
14. Kim, S.Y.; Yasuda, T.; Mase, H. Wave set-up in the storm surge along open coasts during Typhoon Anita. *Coastal Eng.* **2010**, *57*, 631–642.
15. Lee, S.; Kang, T.; Sun, D.; Park, J.J. Enhancing an analysis method of compound flooding in coastal areas by linking flow simulation models of coasts and watershed. *Sustainability* **2020**, *12*, 6572.
16. Leroy, S.; Pedreros, R.; Andre, C.; Paris, F.; Lecacheux, S.; Marche, F.; Vinchon, C Coastal flooding of urbanareas by overtopping: Dynamic modelling application to the Johanna storm (2008) in G âvres (France). *Nat. Hazard Earth Syst. Sci. Discuss.* **2014**, *2*, 4947–4985.
17. Liên, N.T.V. 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, 1996.
18. Tổng cục phòng, Chống thiên tai. Bản đồ nguy cơ ngập cho tình huống bão mạnh, siêu bão đổ bộ vào ven biển Việt Nam, 2016.
19. Thai, T.H.; Tri, D.Q.; Anh, N.X.; Hoa, V.V.; Nguyen, H.V.; Nhat, N.V.; Tuyet, Q.T.T.; Pham, H.T.T.; Chung, P.H.; Thang, V.V.; et al. Numerical Simulation of the Flood and Inundation Caused by Typhoon Noru Downstream from the Vu Gia-Thu Bon River Basin. *Sustainability* **2023**, *15*, 8203. https://doi.org/10.3390/su1510820.
20. Thái, T.H.; Trí, Đ.Q.; Hoàng, Đ.V. Nghiên cứu mô phỏng tác động của sóng và nước dâng bão khu vực ven biển miền Trung. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2018**, *687*, 1–14.
21. Tran, T.D.; Dinh, D.T.; Doan, Q.T.; Tran, Q.T. Applications of numerical modelling for the study on storm surge in typhoon Xangsane in the central coast of Vietnam. *Trop. Cyclone Res. Rev.* **2018**, *7(3)*, 179–192.
22. Anh, N.P.; Thuỷ, N.B.; Ngọc, P.K.; Kim, S. 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 Thuỷ văn* **2022**, *737*, 75–86.

Initial results of coastal inundation in Thanh Hoa coastal area due to storm surge

Pham Van Tien[1], Tran Thi Thuy Linh[2,4], Pham Khanh Ngoc[2], Bui Manh Ha[3], Nguyen Ba Thuy[2]*

[1] Vietnam Institute of Meteorology, Hydrology and Climate; phamvantienbn@gmail.com
[2] National Centre for Hydrometeorological Forecasting; nguyentranlinh99@gmail.com; ngocpkchibo@gmail.com; thuybanguyen@gmail.com
[3] Oceanography Center; manhhamhc@gmail.com
[4] Faculty of Interdisciplinary Sciences, Vietnam National University

Abstract: In this study, the risk of coastal inundation due to storm surge in coastal of Thanh Hoa province for several scenarios of typhoon landfall the area with average height tidel cases is simulated by a couple model of surge, wave and tidel (SuWAT model). In which, the SuWAT model is developed with a moving boundary treatment to simulate inundation due to storm surge. Simulation results show that with typhoon level 12 and simulation time of 90 hours since the typhoon appear, at 71 hours, the water level in Thanh Hoa coastal area started to rise, after 73 inundation occure in some low-lying coastal areas and along river basins, at 79 hours, most of the areas with rising water were at their deepest. The area with the largest and deepest flooded area is along the coast of Hau Loc district, around the basins of Yen river, Ma river, Truong Giang river and Len river. In the case of a typhoon level 15, the total inundation area is up to 153.2 km^2. These are the initial research results on coastal inundation due to storm surge, which serve as a basis for further model development as well as implementation in many different scenarios in terms of terrain and storm intensity.

Keywords: Storm surge; Coastal inundation; A couple model.