

ỨNG DỤNG MÔ HÌNH MIKE FLOOD XÂY DỰNG BẢN ĐỒ NGẬP LỤT CÓ XÉT SỰ THAY ĐỔI CỦA THẨM PHỦ, LƯU VỰC SÔNG NHẬT LỆ

Nguyễn Thị Minh Tâm^{a,*}, Trịnh Đình Lai^a, Trịnh Công Tý^a, Đỗ Anh Đức^b

^aKhoa Công trình thủy, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bPhòng Nghiên cứu Thủy năng & NLTT, Viện Thủy điện và năng lượng tái tạo,
8/95 phố Chùa Bộc, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 13/01/2023, Sửa xong 14/02/2023, Chấp nhận đăng 09/3/2023

Tóm tắt

Bài báo giới thiệu kết quả xây dựng bản đồ ngập lụt lưu vực sông Nhật Lệ, tỉnh Quảng Bình, có xét đến sự thay đổi thảm phủ. Nghiên cứu sử dụng mô hình MIKE FLOOD mô phỏng dòng chảy lũ trong lòng sông và tràn bãi, sau đó kết quả tính toán thủy lực (lớp thông tin về mực nước lũ, độ sâu ngập lớn nhất) được sử dụng để xây dựng bản đồ ngập lụt kết hợp công cụ hệ thống thông tin địa lý GIS. Ảnh viễn thám SENTINEL-2 với độ phân giải không gian 10×10 m, thể hiện thông tin lớp thảm phủ đất, cho phép cập nhật kịp thời những biến động trên bề mặt lưu vực cho mô hình. Kết quả nghiên cứu là bản đồ ngập lụt thể hiện mức độ lũ lụt (khu vực) và độ sâu nước (hoặc cấp độ sâu nước) cùng những thống kê về diện tích ngập ứng với các cấp độ sâu ngập trước và sau khi xét đến sự thay đổi của thảm phủ. Đây là thông tin quan trọng để định lượng thiệt hại do ngập lụt và hữu ích cho các bên liên quan trong quản lý rủi ro thiên tai.

Từ khóa: MIKE FLOOD; GIS; Nhật Lệ; bản đồ ngập lụt; thảm phủ.

FLOOD INUNDATION MODELING UNDER LAND COVER CHANGES USING MIKE FLOOD: A CASE STUDY FOR NHAT LE RIVER BASIN

Abstract

This paper introduces the results of flood inundation mapping at Nhat Le river basin, Quang Binh province, with impacts of land cover change. The study uses the MIKE FLOOD model to simulate flood flows in river beds and floodplains. Then the results of hydraulic calculations (information on flood levels, and maximum inundation depth) are used to build the flood mapping. Flood inundation mapping combined with geographic information system (GIS) tools. SENTINEL-2 remote sensing imagery from high-spatial resolution data at 10 m, shows land cover layer information, allowing timely updates of changes in the basin surface for the model. The research results are flooding inundation mapping showing the flood levels (area) and inundation depth (or water depth level) along with statistics on the flooded areas corresponding to inundation depth before and after land cover change. This is important information for flood damage quantification and is useful to stakeholders in disaster risk management.

Keywords: MIKE FLOOD; GIS; Nhat Le; flood inundation mapping; land cover.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(3V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(3V)-11) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Lũ lụt là hiện tượng thiên nhiên khắc nghiệt, ảnh hưởng nghiêm trọng đến đời sống và sản xuất [1]. Trung bình có khoảng 21 triệu người trên thế giới bị ảnh hưởng bởi lũ sông mỗi năm và con số này có thể tăng lên 54 triệu người vào năm 2030 do biến đổi khí hậu và phát triển kinh tế - xã hội. Việt

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: tamntm@huce.edu.vn (Tâm, N. T. M.)

Nam là một trong 15 quốc gia chịu thiệt hại nặng nề nhất với khoảng 80% dân số chịu rủi ro lũ lụt. Để tăng cường khả năng ứng phó và giảm thiểu thiệt hại do lũ gây ra, rất nhiều các biện pháp công trình (đê kè, hồ chứa thượng lưu) và phi công trình (cảnh báo, dự báo, sơ tán dân cư) đã được thực hiện [2]. Trong đó phổ biến là xây dựng các bản đồ ngập lụt theo các trận lũ lịch sử, các kịch bản với tần suất lũ thiết kế khác nhau phục vụ công tác ứng phó chủ động với lũ lụt trong giai đoạn chuẩn bị, quy hoạch phòng chống thiên tai và giai đoạn ứng phó khẩn cấp cũng như hỗ trợ ước tính thiệt hại khi có lũ lụt [3–5]. Bản đồ ngập lụt hiện là công cụ hữu hiệu giúp các nhà quản lý, hoạch định chính sách nắm bắt tình hình ngập lụt nhanh chóng để đưa ra các biện pháp ứng phó hiệu quả và hành động kịp thời [6, 7].

Các phương pháp xây dựng bản đồ ngập lụt có thể kể đến như: sử dụng tài liệu khảo sát thủy văn và địa hình, sử dụng tài liệu điều tra các trận lũ lịch sử, sử dụng dữ liệu ảnh viễn thám, sử dụng kết quả mô phỏng từ các mô hình toán thủy văn - thủy lực [5, 8, 9]. Mỗi phương pháp đều có những ưu nhược điểm riêng trong việc xây dựng và ước tính diện tích ngập lụt. Trong đó, phương pháp mô hình toán thủy văn - thủy lực [10–12] được sử dụng rộng rãi do tính ưu việt về khả năng mô phỏng chính xác quá trình lũ theo thời gian, sự phân bố lũ theo không gian của các yếu tố động lực và đặc biệt cho phép tính toán dự báo, mô phỏng theo các kịch bản thay đổi trên bề mặt lưu vực hoặc đánh giá tác động của các hoạt động kinh tế - xã hội đến tình hình ngập lụt trong lưu vực nghiên cứu. Tuy vậy, phương pháp này cũng tồn tại một số nhược điểm như hiệu suất của mô hình phụ thuộc vào bộ thông số của mô hình [13]. Các giá trị này không bất biến mà thay đổi theo điều kiện hiện trạng của lưu vực, do vậy khi tính toán dòng chảy lũ cho những thời điểm khác nhau (cách nhau một vài năm hay hàng chục năm) thì điều kiện mặt đệm lưu vực đã thay đổi, dẫn đến kết quả tính toán sẽ không đảm bảo và khi đó cần điều chỉnh lại các thông số của mô hình. Để khắc phục vấn đề này, ảnh viễn thám SENTINEL-2 [14–16] với độ phân giải không gian 10x10 m, thể hiện thông tin lớp phủ đất trên bề mặt lưu vực được sử dụng để thành lập bản đồ hiện trạng lớp phủ theo thời gian. Bản đồ thảm phủ đất là một bản chụp cung cấp các thông tin về sự thay đổi lớp thảm phủ đất trong năm để phát hiện sự thay đổi, là cơ sở để vi chỉnh lại các thông số của mô hình cho phù hợp. Dữ liệu cung cấp miễn phí đã được xử lý trước một số lớp cho thấy việc thay đổi lớp thảm phủ, đầu ra cung cấp một bản đồ gồm 9 lớp về bề mặt, bao gồm các loại thảm thực vật, bề mặt trống, nước, đất trống trọt và các khu vực được xây dựng.

Mục tiêu chính của nghiên cứu này là ứng dụng mô hình mô phỏng ngập lụt MIKE FLOOD kết nối mô hình MIKE 11 mô phỏng dòng chảy lũ trong sông và mô hình MIKE 21 mô phỏng dòng chảy lũ tràn trên bãi để xây dựng bản đồ ngập lụt cho lưu vực sông Nhật Lệ, tỉnh Quảng Bình. Trong đó, khai thác nguồn dữ liệu bản đồ lớp phủ đất từ ảnh viễn thám SENTINEL-2 để điều chỉnh và lựa chọn bộ thông số mô hình thủy văn MIKE 21 cho trận lũ năm 2020. Ảnh viễn thám hỗ trợ xác định hệ số nhám của từng ô lưới cho vùng nghiên cứu để chính xác hóa số liệu đầu vào. Kết quả nghiên cứu là bản đồ ngập lụt với các thông tin về vùng ngập lũ ứng với cấp độ sâu ngập có thể cung cấp thông tin hữu ích cho các bên liên quan về quản lý rủi ro lũ lụt, các hoạt động ứng phó, giảm thiểu rủi ro lũ lụt.

2. Cơ sở dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

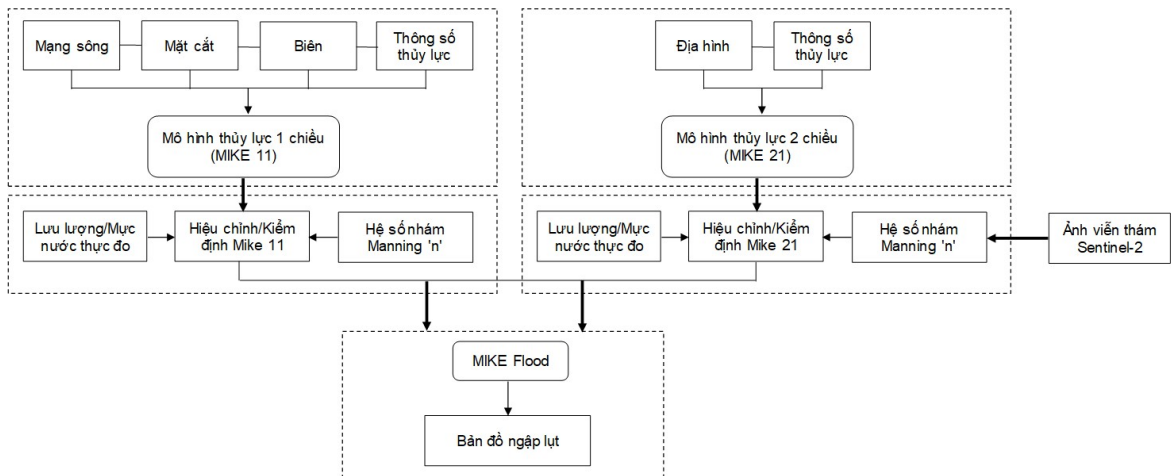
2.1. Vùng nghiên cứu

Lưu vực sông Nhật Lệ có dạng hình tròn với diện tích 2.650 km², gồm 2 nhánh sông Kiến Giang và Long Đại rồi đổ ra Biển Đông qua cửa Nhật Lệ. Lưu vực nằm trong vùng trũng của duyên hải Trung Bộ, có bề mặt bị chia cắt mạnh, hệ thống sông thường ngắn và dốc, thuận lợi cho việc tập trung nước nên dễ bị úng ngập trong mùa mưa [17]. Vấn đề ngập lũ trên lưu vực sông Nhật Lệ vừa do lũ trên sông, vừa do bị ảnh hưởng mạnh mẽ của thủy triều nên thường phức tạp về quy mô và mức độ ngập lụt. Vùng hạ lưu sông cũng là nơi tập trung đông dân cư, đặc biệt hai bên bờ sông chịu ảnh hưởng

mạnh mẽ của ngập lụt cũng chính là nơi có mật độ dân số cao nhất trên lưu vực. Do đó, xây dựng bản đồ ngập lụt cho lưu vực sông Nhật Lệ là việc làm cần thiết, nhằm hỗ trợ không chỉ cho các nhà quản lý trong quá trình ra quyết định mà còn giúp ước tính thiệt hại khi có lũ lụt xảy ra.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu ứng dụng mô hình MIKE FLOOD [18–20] - một hệ thống mô hình thủy lực kết nối mô hình MIKE 11 và mô hình MIKE 21 để mô phỏng ngập lụt lưu vực sông Nhật Lệ, tỉnh Quảng Bình [21]. Mô hình MIKE 11 là mô hình thủy động lực 1 chiều (MIKE 11HD – hydrodynamic), chuyên dùng để mô phỏng dòng chảy trên mạng lưới sông kênh và mô phỏng các công trình trên sông như cống đập nhưng khó khăn để mô phỏng dòng chảy tràn nếu không biết trước một số khu chứa và hướng chảy, không mô tả được trường vận tốc trên mặt ruộng hoặc khu chứa. Trong khi, mô hình thủy động lực 2 chiều MIKE 21 (MIKE 21HD - hydrodynamic), chuyên dùng để mô phỏng dòng chảy tràn trên các bãi tràn theo phương ngang, tuy nhiên, nếu vừa tính toán dòng tràn trên bề mặt, vừa nghiên cứu dòng chảy chủ lưu trong kênh dẫn thì phải thu nhỏ bước lưới đến mức có thể thể hiện được sự thay đổi của địa hình trong lòng dẫn mà hệ quả là thời gian tính toán tăng lên theo cấp số nhân. MIKE FLOOD cho phép kết nối 2 mô hình MIKE 11 và MIKE 21 trong quá trình tính toán, tăng bước lưới của mô hình (nghĩa là giảm thời gian tính toán) nhưng vẫn mô phỏng được cả dòng chảy trong lòng dẫn lẫn trên bề mặt lưu vực hoặc ô chứa cũng như mô phỏng được quá trình thủy văn - thủy lực qua hệ thống công trình. Để xử lý bản đồ lớp phủ đất từ ảnh viễn thám SENTINEL-2 và xây dựng bản đồ ngập lụt nghiên cứu sử dụng công cụ hệ thống thông tin địa lý GIS trong chi tiết hóa thông tin về lớp phủ tương ứng thời gian xảy ra lũ lụt. Sơ đồ nghiên cứu chi tiết được thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ nghiên cứu [11]

3. Cơ sở dữ liệu

3.1. Dữ liệu đầu vào

Dữ liệu thủy văn: (1) Mức nước (H) thực đo tại các trạm thủy văn Kiến Giang, Lệ Thủy, Đồng Hới và lưu lượng (Q) thực đo tại trạm Kiến Giang để kiểm tra mô hình; (2) Mức nước thủy triều được tính toán từ mô hình triều Biển Đông; (3) Lưu lượng lũ tính toán bằng mô hình thủy văn MIKE NAM tại các biên nhập lưu.

Dữ liệu vết lũ lịch sử: Tài liệu vết lũ điều tra thu thập trên lưu vực sông Nhật Lệ các năm 2010 và 2020.

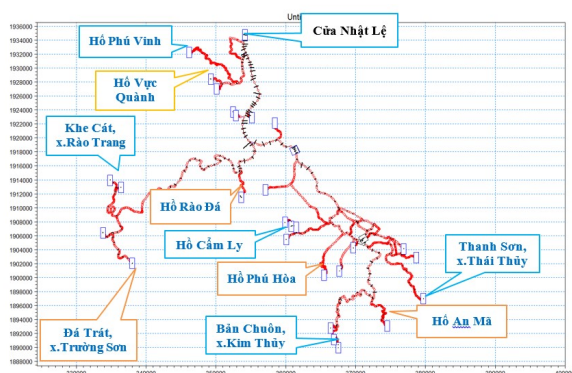
Dữ liệu thảm phủ: Nghiên cứu này download ảnh viễn thám SENTINEL-2 miễn phí từ nguồn (<https://livingatlas.arcgis.com/landcover/>) để cung cấp sự thay đổi bề mặt thảm phủ cho trận lũ năm 2020.

Dữ liệu địa hình và công trình khu vực hạ du lưu vực sông Nhật Lệ, tỉnh Quảng Bình: (1) Tài liệu mặt cắt địa hình cho mô hình MIKE 11 mạng sông: 355 mặt cắt ngang sông đo đạc trước năm 2021 và các mặt cắt dọc căn lũ như cầu qua sông, đường giao thông; (2) Bình đồ tỉnh Quảng Bình tỷ lệ 1:10.000 đối với các vùng thuộc huyện và tỷ lệ 1:5.000 đối với các vùng thuộc thành phố Đồng Hới, được thu thập từ Cục Bản đồ - Bộ Tài nguyên và Môi trường thực hiện giai đoạn 2009 – 2010; (3) Tài liệu các công trình vùng hạ lưu sông: Tổng hợp tài liệu về các công trình giao thông, thủy lợi trên lưu vực có ảnh hưởng đến quá trình lũ tràn trên lưu vực, như các cầu giao thông, tuyến đường bộ, đường sắt, các tuyến kênh tưới ngăn căn lũ rõ rệt.

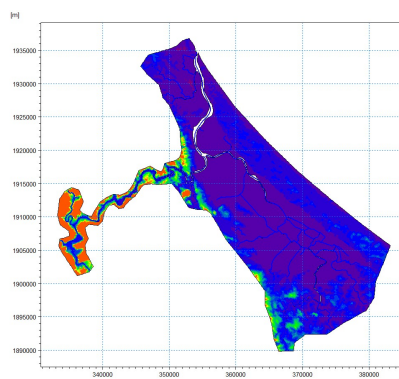
3.2. Thiết lập mô hình

a. Thiết lập mạng sông và lưới tính mô hình MIKE FLOOD

Trên cơ sở phân tích mạng sông và địa hình tự nhiên lưu vực sông Nhật Lệ, nghiên cứu thiết lập mô hình mô phỏng trong mô hình MIKE FLOOD (Hình 2). Theo đó, sơ đồ mạng sông tính toán trên mô hình MIKE 11 bao gồm 08 tuyến sông chính (sông Kiến Giang dài 54,1 km, sông Long Đại dài 45,4 km, sông Nhật Lệ dài 17 km, sông Phú Vinh dài 12,3 km, sông Lệ Kỳ dài 9,6 km, sông Rào Đá dài 5,1 km, sông Cẩm Lý dài 7,6 km và sông Đâu Giang dài 18,6 km).



(a) Sơ đồ mạng lưới sông suối mô phỏng trong mô hình MIKE 11



(b) Địa hình được mô phỏng trong mô hình MIKE 21

Hình 2. Mô hình MIKE FLOOD thiết lập cho vùng hạ du lưu vực sông Nhật Lệ, Quảng Bình

Miền lưới tính của mô hình MIKE 21: Tổng cộng 123.648 phần tử lưới mô phỏng cho vùng tính toán là 773 km². Kích thước ô lưới tùy thuộc vào mức độ quan trọng của vùng mô phỏng, khu vực ven sông lưới tính toán được chia dày với kích thước 30 - 50 m, với các vùng còn lại ít quan trọng hơn và khả năng ngập thấp hơn được chia lưới từ 70 - 100 m.

Mô hình MIKE FLOOD kết nối hai mô hình MIKE 11 và MIKE 21 thông qua kết nối bên (Lateral Link) gồm kết nối bên phải và bên trái. Thống kê xấp xỉ 491 km sông suối, kênh rạch được mô phỏng và 7.837 kết nối được thiết lập trong mô hình.

b. Thiết lập điều kiện biên cho mô hình

Biên trên: Là biên lưu lượng trên các sông, suối; gồm 26 biên trên tại các sông chính như Kiến Giang, Long Đại, các nhánh sông khác và 8 nhập lưu khu giữa.

Biên dưới: Là quá trình mực nước triều tại cửa sông Nhật Lệ. Mực nước này được tính toán xác định từ mô hình triều Biển Đông.

Các nhập lưu khu giữa: Khu giữa là các nhánh sông nhập lưu vào các sông chính Kiến Giang, Long Đại, Nhật Lệ và các sông khác. Do các nhánh sông này không có trạm thủy văn nên quá trình lưu lượng được tính toán từ mô hình mưa - dòng chảy MIKE NAM.

c. Chỉ tiêu đánh giá

Chỉ số Nash (NSE): Độ tin cậy của bộ thông số mô hình mô phỏng dòng chảy lũ được đánh giá qua chỉ tiêu thống kê là hệ số Nash (NSE). Chỉ số NSE được sử dụng để đo mức độ liên kết giữa các giá trị thực đo và mô phỏng. Giá trị biến thiên trong khoảng $[0, 1]$, chỉ số NSE càng gần 1 cho kết quả càng tốt. Ngoài ra có xem xét đặc trưng về Sai số đỉnh lũ:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (o_t - f_t)^2}{\sum_{t=1}^n (o_t - \bar{o})^2} \quad (1)$$

$$\Delta Q = \frac{\sum_{t=1}^n (o_t - f_t)}{\sum_{t=1}^n f_t} \quad (2)$$

trong đó f_t là giá trị dự báo lần thứ t , o_t là giá trị thực đo lần thứ t và \bar{f} , \bar{o} là giá trị trung bình của dự báo và thực đo cho toàn tập giá trị quan trắc với n là số lần dự báo.

4. Kết quả và thảo luận

Nghiên cứu lựa chọn chuỗi số liệu trận lũ 01 - 07/10/2010 để hiệu chỉnh mô hình và trận lũ 16 - 22/10/2020 để kiểm định mô hình. Xét ảnh hưởng của lớp thảm phủ đến dòng chảy lưu vực thông qua điều chỉnh hệ số nhám trong mô hình MIKE 21 cho trận lũ năm 2020.

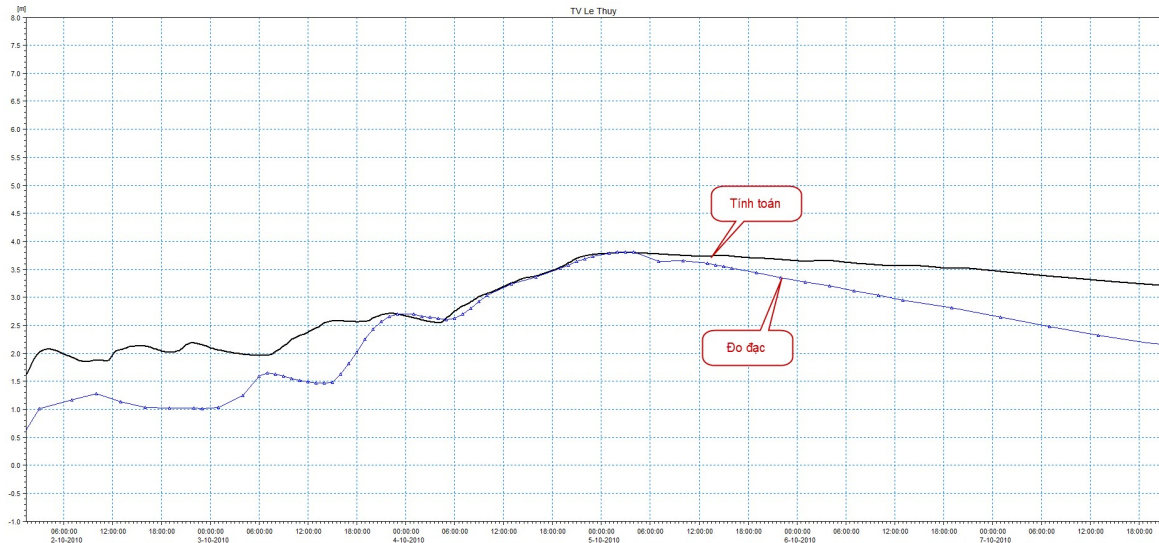
4.1. Hiệu chỉnh mô hình 2010

- Vị trí kiểm định: Mực nước đo đạc tại trạm thủy văn Kiến Giang, Lệ Thủy, Đồng Hới và vết lũ trận lũ năm 2010 được điều tra năm 2020.

- Số liệu kiểm định: Trận lũ từ ngày 01 - 07/10/2010.

- Số liệu biên: Biên trên và nhập lưu khu giữa được tính toán từ mô hình MIKE NAM. Biên dưới là đường quá trình triều tại cửa Nhật Lệ, tính toán từ mô hình triều Biển Đông.

Các kết quả sau khi hiệu chỉnh mô hình với trận lũ năm 2010 (đại diện trên Hình 3 và Bảng 1) cho thấy: sai số từ 40 - 50 cm chiếm 28,6% tổng số vết lũ, sai số từ 30 - 40 cm chiếm 16,7%, sai số từ 20 - 30 cm chiếm 11,9%, còn sai số nhỏ hơn 20 cm chiếm 42,9% tổng số 42 vết lũ điều tra, đánh giá. Ngoài ra mô hình còn được hiệu chỉnh qua đường quá trình mực nước tại trạm thủy văn Kiến Giang, Lệ Thủy và Đồng Hới, quá trình lũ tính toán đã bắt được khá sát với đường quá trình lũ đo đạc được với sai số đỉnh lũ tại các trạm chỉ khoảng từ 1 - 2 cm. Chỉ số NSE tại trạm Lệ Thủy đạt 0,85 được đánh giá là rất tốt, chỉ số đánh giá đường quá trình mực nước và lưu lượng tại trạm Kiến Giang đạt 0,67 và 0,72, được đánh giá là tốt, chỉ số NSE tại Đồng Hới đánh giá là đạt. Đây là trận lũ rất lớn và đã xảy ra khá lâu, số liệu địa hình và cơ sở hạ tầng trên sông, trên bãi khác nhiều so với hiện tại nên các kết quả so sánh ở trên có thể chấp nhận được.



Hình 3. Mức nước tính toán và thực đo lũ tháng 10/2010 tại trạm TV Lê Thủy

Bảng 1. Sai số hiệu chỉnh trận lũ tháng 10/2010 tại các trạm thủy văn

Vị trí	$H_{td\ max}$ (m)	$H_{tt\ max}$ (m)	Sai số đỉnh	NSE
TV Lê Thủy (m)	3,81	3,79	0,02	0,85
TV Kiến Giang - H (m)	12,81	12,80	0,01	0,67
TV Kiến Giang - Q (m ³ /s)	1.340	1.800	-460	0,72
TV Đồng Hới (m)	2,1	1,9	0,2	0,58

4.2. Kiểm định mô hình 2020

Kết quả hiệu chỉnh mô hình cho thấy bộ thông số đã hiệu chỉnh tương đối tốt. Để khẳng định bộ thông số thu được là đáng tin cậy, bộ thông số của mô hình sẽ được kiểm định lại. Nghiên cứu đã xem xét 2 trường hợp (dữ liệu thảm phủ năm 2010 và dữ liệu thảm phủ năm 2020) để thấy được ảnh hưởng của việc cập nhật dữ liệu thảm phủ.

- Vị trí hiệu chỉnh: Mức nước đo đạc tại trạm thủy văn Kiến Giang, Lê Thủy, Đồng Hới và vết lũ điều tra năm 2021.

- Số liệu hiệu chỉnh: Trận lũ từ ngày 16 - 22/10/2020.

- Số liệu biên: Biên trên và nhập lưu khu giữa được tính toán từ mô hình MIKE NAM. Biên dưới là đường quá trình triều được tính toán từ mô hình triều Biển Đông.

Kết quả sau khi kiểm định mô hình (đại diện trên Hình 4 và Bảng 2) cho thấy, sai số giữa số liệu điều tra vết lũ và số liệu tính toán tại một số vị trí vết lũ dọc sông có thể chấp nhận được và nằm trong phạm vi cho phép: sai số từ 40 - 50 cm chiếm 9,5% tổng số vết lũ, sai số từ 30 - 40 cm chiếm 12,9%, sai số từ 20 - 30 cm chiếm 20,5%, còn sai số nhỏ hơn 20 cm chiếm 57% tổng số 526 vết lũ điều tra, đánh giá. Ngoài ra mô hình còn được hiệu chỉnh qua đường quá trình mực nước tại trạm thủy văn Kiến Giang, Lê Thủy và Đồng Hới, quá trình lũ tính toán đã bắt được khá sát với đường quá trình lũ đo đạc được với sai số đỉnh lũ tại các trạm chỉ khoảng từ 5 - 11 cm. Chỉ số NSE tại trạm Lê Thủy đạt 0,86 được đánh giá là rất tốt, chỉ số đánh giá đường quá trình mực nước và lưu lượng tại trạm Kiến Giang đạt 0,68 và 0,72, được đánh giá là tốt, chỉ số NSE tại Đồng Hới đánh giá là đạt. Thông qua quá trình hiệu chỉnh, kiểm định có thể khẳng định mô hình thủy lực được xây dựng cho lưu vực sông Kiến Giang, Nhật Lệ và vùng lân cận đảm bảo độ tin cậy.



Hình 4. Mức nước tính toán và thực đo lũ tháng 10/2020 tại trạm TV Lê Thủy

Bảng 2. Sai số hiệu chỉnh trận lũ tháng 10/2020 tại các trạm thủy văn

Vị trí	$H_{td\max}$ (m)	$H_{tt\max}$ (m)	Sai số đỉnh	NSE
TV Lê Thủy (m)	4,88	4,95	-0,07	0,86
TV Kiến Giang - H (m)	13,5	13,45	0,05	0,68
TV Kiến Giang - Q (m ³ /s)	1.660	1.575	85	0,72
TV Đồng Hới (m)	2,64	2,53	0,11	0,60

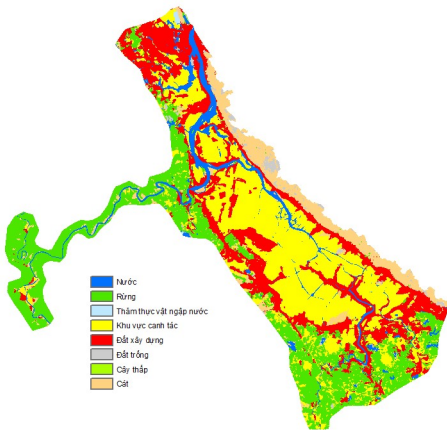
4.3. Thiết lập thông số nhám cho mô hình

Mỗi đối tượng thực tế trên bề mặt lưu vực (công trình dân cư, thủy lợi, giao thông, đất trồng cây, đất trồng lúa, đất xây dựng) được đặc trưng bởi một giá trị hệ số nhám khác nhau trong mô hình toán 2 chiều. Độ nhám là thông số thể hiện mức độ cản trở dòng chảy lũ tràn trên bề mặt lưu vực, độ nhám càng lớn thì mức cản càng lớn. Thông thường, hệ số nhám được xác định theo 2 phương pháp: (1) Hệ số nhám được lấy là giá trị trung bình cho toàn lưu vực hoặc (2) Hệ số nhám phân bố dựa theo bản đồ sử dụng đất. Việc áp dụng theo cách (1) đơn giản, hiệu quả cho những lưu vực nhỏ, tương đối đồng nhất về mặt đệm nhưng không thỏa đáng với những lưu vực lớn, có tính chất thảm phủ thay đổi như lưu vực sông Nhật Lệ vì làm mất tính biến thiên, không phản ánh đúng điều kiện bề mặt lưu vực. Phương pháp (2) khắc phục được nhược điểm của phương pháp (1) và do đó các giá trị độ nhám được thay đổi theo hiện trạng thảm phủ của lưu vực. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp này là phụ thuộc hoàn toàn vào bản đồ hiện trạng đất; các bản đồ thường có mức độ chi tiết không cao (tỷ lệ 1:25.000) nên hệ số nhám cũng đã bị trung bình hóa giữa các đối tượng; thời gian cập nhật bản đồ lâu (thường 5 năm một lần) nên chưa phản ánh đúng được các đối tượng bề mặt lưu vực tại thời điểm trận lũ mô phỏng. Những hạn chế này sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của mô phỏng. Trong nghiên cứu này, xem xét các loại độ nhám sau:

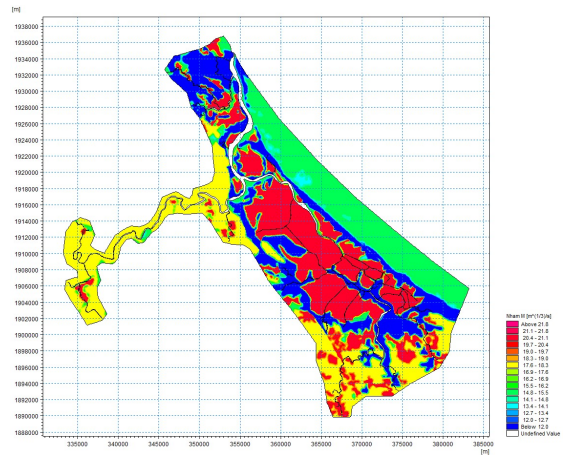
Độ nhám lòng sông trong mô hình MIKE 11: Trên mỗi đoạn sông, độ nhám sẽ khác nhau tùy thuộc vào độ dốc lòng sông, vật liệu đáy sông là bùn, cát, sỏi hay đá; thảm phủ trên các bãi sông; các công trình trên sông. Căn cứ vào số liệu đo đạc tại các trạm thủy văn trên sông, vết lũ điều tra dọc sông và hiện trạng thực tế trên sông thì độ nhám của từng đoạn sông được điều chỉnh sao cho các số liệu tính toán phù hợp với số liệu đo đạc. Kết quả hiệu chỉnh và kiểm định mô hình đã xác định được

độ nhám lòng sông của các sông trong phạm vi tính toán biến đổi từ 0,035 - 0,04.

Độ nhám bề mặt lưu vực trong mô hình MIKE 21: Đối với hệ số nhám trên bãi tràn, nghiên cứu xem xét 2 trường hợp, trường hợp (1) hệ số nhám được xác định dựa trên bản đồ sử dụng đất và có sự điều chỉnh sao cho cao độ vết lũ điều tra và mực nước lớn nhất tính toán có sự phù hợp (thu được từ quá trình hiệu chỉnh và kiểm định), trường hợp (2) xác định hệ số nhám bề mặt từ phân tích ảnh viễn thám SENTINEL-2 với độ phân giải không gian 10×10 m, thể hiện thông tin lớp thảm phủ đất trên bề mặt lưu vực cho mô hình mô phỏng ngập lụt trên lưu vực năm 2020. Từ kết quả phân tích ảnh SENTINEL-2 sẽ phân loại được các đối tượng cụ thể trên bề mặt lưu vực như Hình 5. Sau khi quy đổi giá trị hệ số nhám cho mỗi loại đối tượng cụ thể sẽ xác định được hệ số nhám phân bố theo không gian bề mặt lưu vực. Dựa vào độ phân giải của ảnh viễn thám mỗi vùng ô lưới vuông sẽ được gán một giá trị hệ số nhám phân bố thiết lập dưới dạng ô lưới 10×10 m như Hình 6. Việc xác định hệ số nhám có một ý nghĩa quan trọng trong tính toán thủy lực. Là một hệ số thực nghiệm, hệ số nhám phụ thuộc vào nhiều yếu tố như độ nhám bề mặt, cây cỏ xung quanh mặt cắt lòng dẫn. Trên cơ sở tham khảo các giá trị hệ số nhám của các tác giả đã công bố [22–26] kết hợp với phân tích điều kiện bề mặt thực tế của lưu vực để lựa chọn hệ số nhám trên mô hình 2 chiều cho trường hợp (1) thay đổi từ $M = 12$ đến $22 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (hay $n = 0,045$ đến $0,083 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$). Trường hợp (2) khi xét đến sự thay đổi của lớp thảm phủ năm 2020 thì hệ số nhám dao động 0,03 - $0,1 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ tùy thuộc vào từng đối tượng. Giá trị hệ số nhám cụ thể như Bảng 3.



Hình 5. Thảm phủ thực vật tương ứng năm 2020



Hình 6. Hệ số nhám quy đổi cho các đối tượng năm 2020

Bảng 3. Bộ thông số nhám của mô hình MIKE FLOOD vùng nghiên cứu

Phân loại các lớp phủ đặc trưng trên lưu vực	Hệ số nhám (n)
Nước (Khu vực lòng sông chính)	0,030
Rừng (Khu vực rừng nguyên sinh và rừng tái sinh (cây cao))	0,056
Thảm thực vật ngập nước (Khu vực thực vật bị ngập nước)	0,040
Khu vực canh tác (Khu vực cây trồng, lúa và hoa màu)	0,050
Đất xây dựng (Khu vực dân cư, khu san lấp xây dựng công trình)	0,100
Đất trống (Khu vực đất trống)	0,071
Cây thấp (Khu vực cây trồng, các loại cây thấp)	0,042
Cát (Nền cát ở các khu vực bãi sông, cửa sông)	0,037

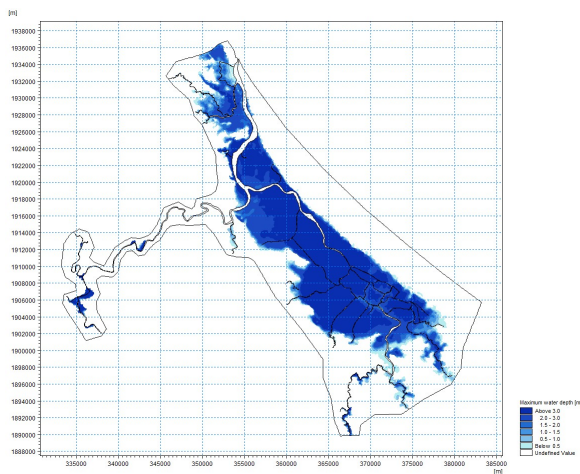
Kết quả cho biết lớp ngập, lớp phân bố vận tốc dòng chảy đã được tính toán, mô phỏng trên nền mô hình toán MIKE FLOOD. Đây là cơ sở thống kê diện tích ngập theo đơn vị hành chính và các yếu tố ảnh hưởng như cơ sở hạ tầng, dân cư, thời gian ngập và phục vụ xây dựng bản đồ ngập lụt vùng đồng bằng ngập lũ lưu vực sông Nhật Lệ.

* Về độ sâu ngập (kết quả thể hiện qua Hình 7 và Hình 8): Huyện Lệ Thủy chịu ảnh hưởng nặng nhất trong trận lũ lịch sử năm 2020, độ sâu ngập từ 3 - 5 m chiếm phần lớn vùng trũng Lệ Thủy, sau đó là vùng có độ sâu ngập từ 1,5 - 3 m.

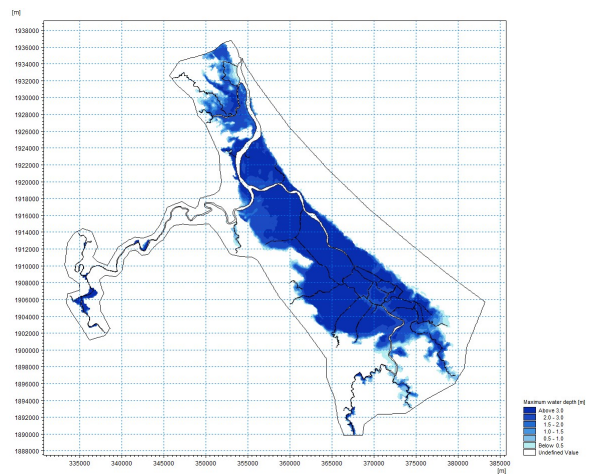
* Về thời gian duy trì ngập (kết quả thể hiện qua Hình 9 và Hình 10): Thời gian ngập phổ biến trên địa bàn huyện Lệ Thủy, Quảng Ninh và TP Đồng Hới là trên 72 giờ, kế tiếp là kéo dài từ 60 - 72 giờ.

* Về vận tốc dòng chảy (kết quả thể hiện qua Hình 11 và Hình 12): Vận tốc dòng chảy chủ yếu phân bố từ 0,2 - 0,6 m/s, một số khu vực có vận tốc dòng chảy cục bộ lớn hơn với mức 0,8 - 1,0 m/s.

- Mức ngập lớn nhất mô phỏng:

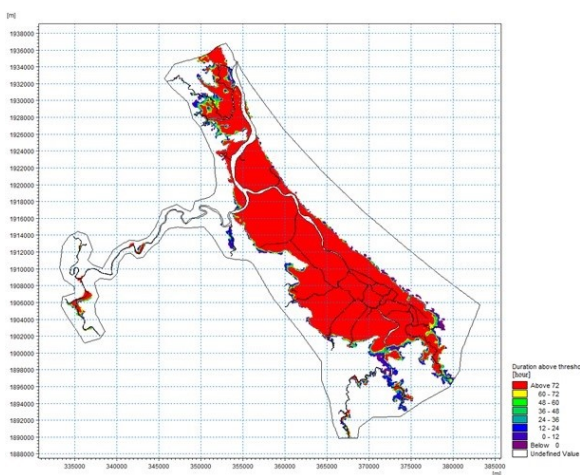


Hình 7. TH thâm phủ 2010 cho trận lũ
16 - 22/10/2020

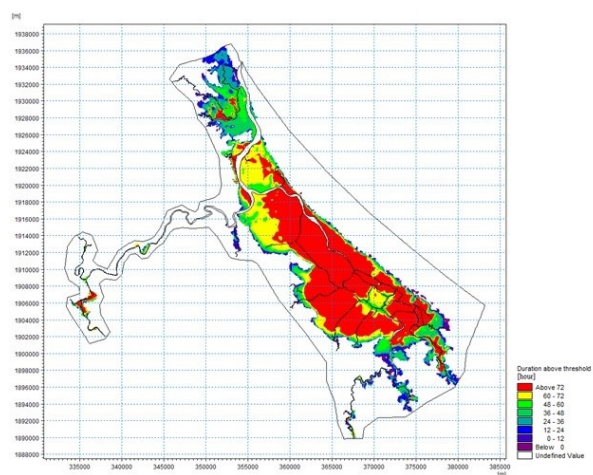


Hình 8. TH thâm phủ 2020 cho trận lũ
16 - 22/10/2020

- Thời gian duy trì ngập mô phỏng:

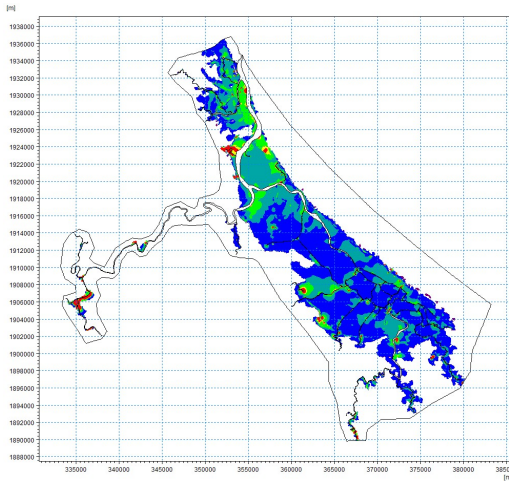


Hình 9. TH thâm phủ 2010 cho trận lũ
16 - 22/10/2020

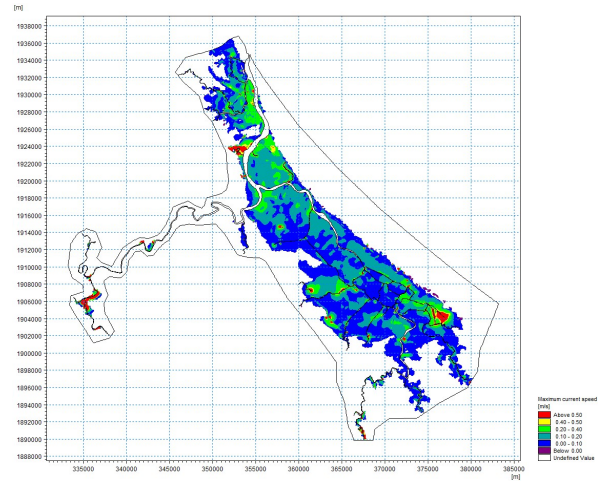


Hình 10. TH thâm phủ 2020 cho trận lũ
16 - 22/10/2020

- Vận tốc lớn nhất mô phỏng:



Hình 11. TH thảm phù 2010 cho trận lũ 16 - 22/10/2020



Hình 12. TH thảm phù 2020 cho trận lũ 16 - 22/10/2020

4.4. Xây dựng bản đồ ngập lụt

Độ sâu mực nước tại một điểm trên bản đồ ngập lụt là hiệu số giữa cao độ mực nước tính toán và cao độ địa hình. Trong đó, cao độ mực nước tính toán là kết quả tính toán thủy lực từ mô hình MIKE 21 được nội suy ra lớp mực nước dưới dạng ô lưới (raster) tại vùng nghiên cứu với độ phân giải 10×10 m. Trong khi DEM địa hình được nội suy từ đường bình độ và điểm độ cao bằng công cụ trong ArcGIS với cùng độ phân giải. Bản đồ ngập lụt thể hiện mức độ ngập sâu theo thang độ ngập (được phân thành 6 cấp), và thống kê diện tích ngập lụt ứng với các cấp ngập theo đơn vị hành chính (Bảng 4 và Bảng 5).

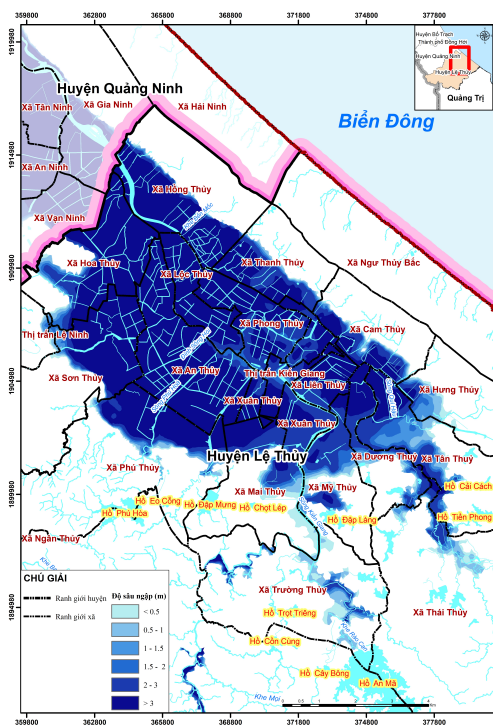
Bảng 4. Thống kê diện tích ngập lớn nhất ứng với TH thảm phù 2010 cho trận lũ 16 - 22/10/2020

Đơn vị hành chính	< 0,5 m	0,5 - 1 m	1 - 1,5 m	1,5 - 2 m	2 - 3 m	< 3 m	Tổng (ha)
H. Lệ Thủy	542,8	845,4	795,5	853,3	3041,7	9803,8	15882,4
H. Quảng Ninh	111,8	273,7	274,1	496,2	2775,4	5717,4	9648,6
TP. Đồng Hới	130,3	358,3	518,9	524,1	922,9	155,0	2609,4
Tổng (ha)	785,0	1477,4	1588,4	1873,6	6739,9	15676,2	28140,5

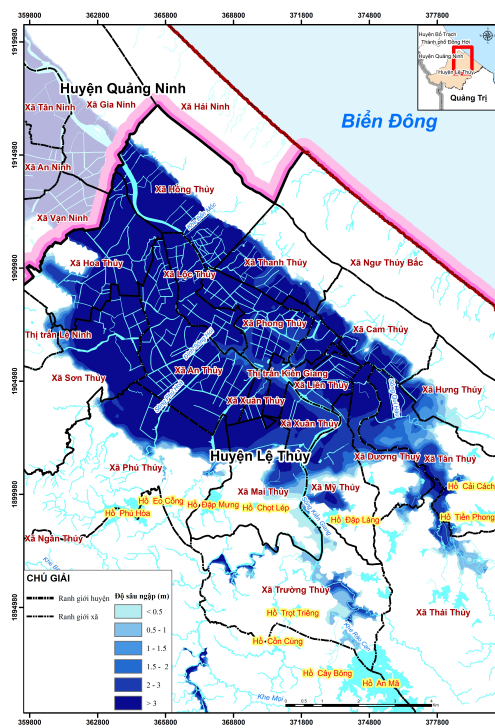
Bảng 5. Thống kê diện tích ngập lớn nhất ứng với TH thảm phù 2020 cho trận lũ 16 - 22/10/2020

Đơn vị hành chính	< 0,5 m	0,5 - 1 m	1 - 1,5 m	1,5 - 2 m	2 - 3 m	< 3 m	Tổng (ha)
H. Lệ Thủy	523,3	865,0	779,3	838,1	2814,3	10220,1	16040,1
H. Quảng Ninh	105,2	275,7	264,6	450,9	2663,5	5910,9	9670,8
TP. Đồng Hới	130,5	363,0	519,6	524,4	909,1	176,5	2623,1
Tổng (ha)	758,9	1503,7	1563,5	1813,4	6387,0	16307,4	28333,9

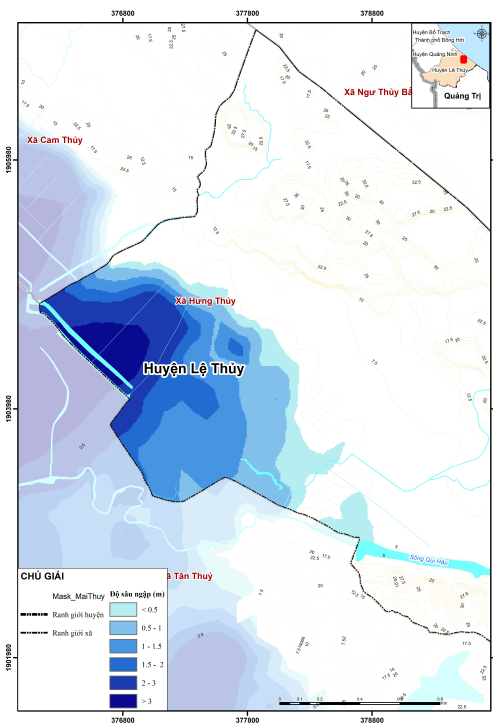
Trận lũ 16 - 22/10/2020 do ảnh hưởng của dải hội tụ nhiệt đới nổi với ATNĐ suy yếu thành vùng áp thấp và kết hợp với KKL nên các tỉnh Trung Bộ đã có mưa to đến rất to, lượng mưa toàn trận đo được tại các trạm thuộc Quảng Bình từ 400 - 850 mm, đặc biệt trên sông Kiến Giang đã thiết lập đỉnh lũ lịch sử mới tại trạm Lệ Thủy là 4,88 m (06h ngày 19/10), vượt đỉnh lũ lịch sử năm 1979 là 0,97 m gây ngập lụt ở hầu hết vùng hạ lưu sông Nhật Lệ. Kết quả thống kê khi chưa thay đổi thảm phù cho



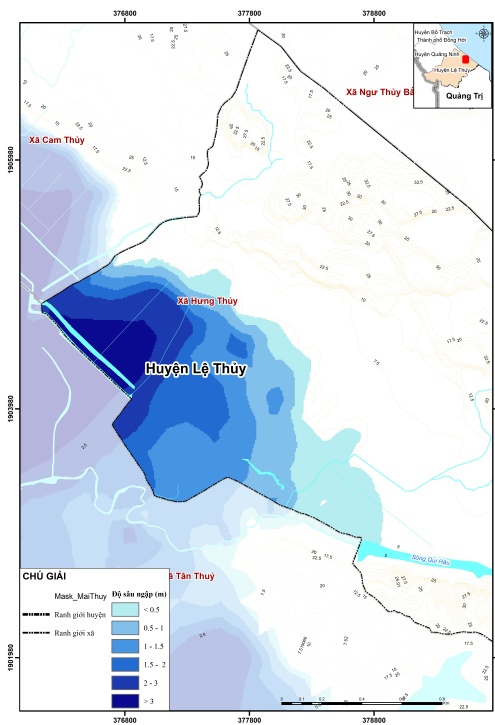
(a) Huyện Lệ Thủy – thảm phù 2010



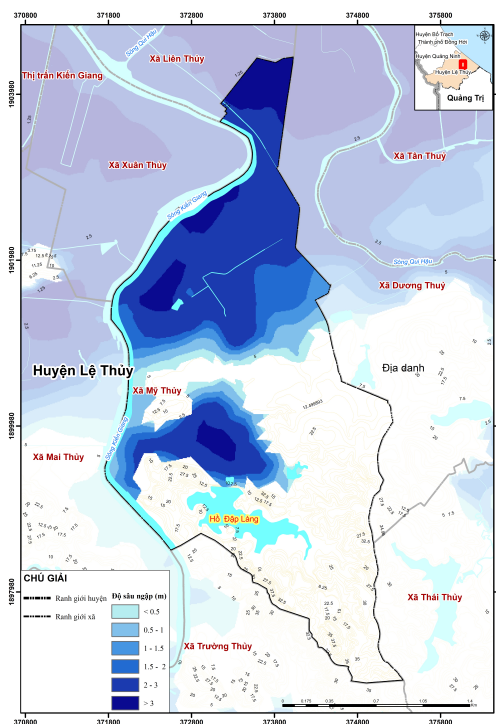
(b) Huyện Lệ Thủy – thảm phù 2020



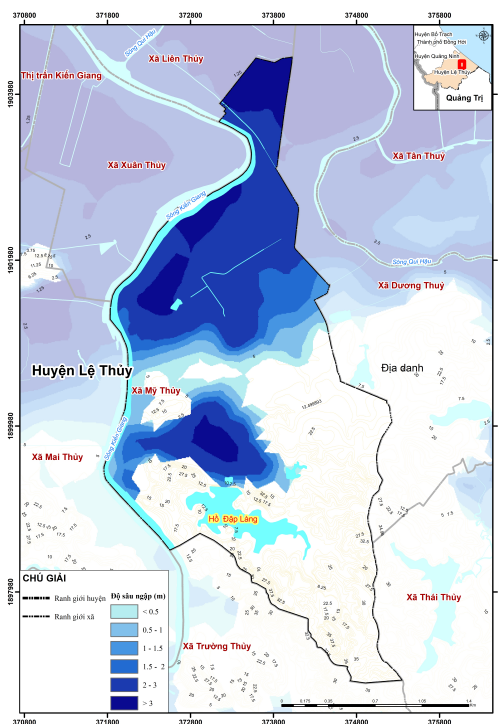
(c)Xã Hưng Thủy – thảm phù 2010



(d)Xã Hưng Thủy – thảm phù 2020



(e) Xã Mỹ Thủy – thảm phủ 2010



(f) Xã Mỹ Thủy – thảm phủ 2020

Hình 13. Bản đồ ngập lụt

thấy, phạm vi ảnh hưởng ngập lụt gồm 49/56 xã/phường/thị trấn của 3 huyện Lệ Thủy, Quảng Ninh và TP Đồng Hới. Trong đó, Lệ Thủy là địa phương có diện tích ngập lụt lớn nhất, chiếm 56,4%; kế tiếp là Quảng Ninh 34,3% và TP Đồng Hới chiếm 9,27%. Mức ngập sâu, tới 55,7% diện tích ngập ở độ sâu > 3 m, đây là mức ngập cực kỳ cao, là thang độ ngập cao nhất trong 06 phân cấp. Mức ngập từ 2 - 3 m chiếm 24% và còn lại là các mức ngập thấp hơn chiếm từ 2,8 - 6,7%.

Sau khi cập nhật sự thay đổi thảm phủ từ ảnh SENTINEL-2 cho năm 2020 (kết quả trên Hình 13), vùng ngập đã có sự điều chỉnh, có vùng nâng mức ngập, có vùng mở rộng phạm vi ngập. Phạm vi vùng ảnh hưởng ngập lụt tăng thêm 193,6 ha; trong đó huyện Lệ Thủy tăng 157,7 ha, huyện Quảng Ninh tăng 22,2 ha và TP Đồng Hới tăng 13,7 ha. Mức ngập thấp (< 0,5 m) giảm 26 ha trong khi mức ngập trung bình (1 - 2 m) tăng 26 ha. Diện tích ngập gia tăng chủ yếu là mức độ ngập rất cao (2 - 3 m) sang cực kỳ cao (> 3 m), trong khi mức ngập 2 - 3 m giảm 352,9 ha thì mức ngập > 3 m tăng 631,2 ha, chiếm phần lớn sự thay đổi diện tích ngập. Cụ thể:

- Huyện Lệ Thủy phát sinh một số vùng ngập mới, với mức ngập < 0,5 m, đáng kể nhất là các xã Hưng Thủy (27,4 ha), xã Mỹ Thủy (10,8 ha) và xã Mai Thủy (6,2 ha).
- Một số xã tăng mạnh diện tích ngập > 3 m, điển hình như Liên Thủy (70,4 ha), Phong Thủy (66,2 ha), Tân Thủy (39 ha) - huyện Lệ Thủy; xã An Ninh (43,6 ha), xã Hàm Ninh (44,2 ha) - huyện Quảng Ninh.

Kết quả phát hiện những khu vực ngập mới và những khu vực tăng mức độ ngập có nhiều ý nghĩa thực tế, tại những vùng phát sinh mức ngập thấp cần nâng cao đề phòng và có các biện pháp phòng chống chủ động hơn như di dời tài sản lên cao, che chắn, nâng cos nền hay tại các khu vực ngập cực kỳ cao cần sớm thực hiện các biện pháp di dân đến những khu vực an toàn và triển khai các biện pháp cứu trợ, cứu hộ một cách kịp thời và hiệu quả.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã trình bày phương pháp xây dựng bản đồ ngập lụt bằng cách sử dụng mô hình toán thủy văn - thủy lực kết hợp mô hình độ cao số (DEM), trong đó ứng dụng ảnh viễn thám SENTINEL-2 xác định lại hệ số nhám cho mô hình MIKE 21 để xây dựng bản đồ ngập lụt cho vùng hạ du lưu vực sông Nhật Lệ. Kết quả cho thấy xuất hiện thêm vùng ngập như huyện Lệ Thủy phát sinh một số vùng ngập mới $< 0,5$ m; phạm vi vùng ảnh hưởng ngập lụt mở rộng, đặc biệt có vùng chuyển cấp ngập rất cao 2 - 3 m sang cực kỳ cao > 3 m, điển hình như các vùng trũng, ven sông thuộc địa phận xã Hưng Thủy, Mỹ Thủy huyện Lệ Thủy; xã Hàm Ninh huyện Quảng Ninh. Việc phát hiện những vùng ngập mới hay vùng ngập sâu hơn có nhiều ý nghĩa thực tế, cung cấp thêm thông tin hữu ích giúp những người ra quyết định và chính quyền địa phương đưa ra phương án phòng chống thiên tai nhanh chóng và hiệu quả hơn. Kết quả cũng có thể được kết hợp với bản đồ quy hoạch sử dụng đất để hỗ trợ trong quá trình ra quyết định quy hoạch. Khi dữ liệu viễn thám ngày càng được ứng dụng rộng rãi và được cung cấp miễn phí, phương pháp xây dựng bản đồ ngập lụt từ việc kết hợp mô hình toán và kết quả phân tích ảnh viễn thám phản ánh khách quan và cập nhật kịp thời những biến động của các đối tượng trên bề mặt lưu vực, cho phép phát hiện những thay đổi vùng ngập và mức độ ngập một cách hiệu quả. Cách tiếp cận này có thể được áp dụng để xây dựng các bản đồ ngập cho các kịch bản lũ thiết kế phục vụ xây dựng phương án phòng chống, giảm nhẹ thiên tai và phục vụ công tác dự báo, cảnh báo lũ cho hạ lưu.

Nghiên cứu hiện tại mới tập trung xem xét ảnh hưởng của thay đổi thảm phủ đến dòng chảy lũ thông qua điều chỉnh hệ số nhám trong mô hình MIKE 21. Bên cạnh đó, các điều kiện về thảm phủ cũng tác động đáng kể đến quá trình hình thành dòng chảy lũ trên lưu vực – vốn là một quá trình thủy văn – thủy lực phức tạp. Trong những nghiên cứu tiếp theo, nhóm nghiên cứu sẽ tập trung khai thác nguồn dữ liệu phân tích từ ảnh viễn thám kết hợp mô hình thủy văn để đánh giá chi tiết hơn ảnh hưởng của thảm phủ đến quá trình hình thành dòng chảy lũ.

Lời cảm ơn

Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài “Ứng dụng mô hình Mike Flood trong xây dựng bản đồ ngập lụt có xét sự thay đổi của thảm phủ đến dòng chảy lũ, lưu vực sông Nhật Lệ, tỉnh Quảng Bình”, mã số 36-2022/KH XD.

Tài liệu tham khảo

- [1] Ward, P. J., Jongman, B., Kumm, M., Dettinger, M. D., Weiland, F. C. S., Winsemius, H. C. (2014). [Strong influence of El Niño Southern Oscillation on flood risk around the world](#). *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(44):15659–15664.
- [2] Nghinh, L. V. (1999). Các giải pháp phòng chống lũ lụt giảm nhẹ thiên tai ở miền Trung. *Tạp chí khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường*, 1–6.
- [3] Châu, T. K., Lan, P. T. H. (2017). Ứng dụng mô hình thủy lực 1&2 chiều kết hợp xây dựng bản đồ ngập lụt hạ lưu hồ chứa Suối Mơ. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, 4:37–46.
- [4] Büchele, B., Kreibich, H., Kron, A., Thieken, A., Ihringer, J., Oberle, P., Merz, B., Nestmann, F. (2006). [Flood-risk mapping: contributions towards an enhanced assessment of extreme events and associated risks](#). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(4):485–503.
- [5] Quang, N. D., Sơn, L. V., Hải, B. T., Văn, B. T., Dung, T. T. T. (2022). [Nghiên cứu xây dựng bản đồ ngập lụt lưu vực sông Bưởi và vùng phụ cận](#). *Vietnam Journal of Hydrometeorology*, 9(741):29–41.
- [6] Chinh, L. T. D., Nam, D. Đ., Lai, T. Đ., Quỳnh, B. D. (2021). [Nghiên cứu xây dựng bản đồ hiểm họa lũ lụt sử dụng vết lũ lịch sử và mô hình độ cao số](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 15(3V):152–164.
- [7] Merz, B., Thieken, A. H., Gocht, M. (2007). [Flood Risk Mapping At The Local Scale: Concepts and Challenges](#). *Flood Risk Management in Europe*, Springer Netherlands, 231–251.

- [8] Anh, T. N. (2011). Xây dựng bản đồ ngập lụt hạ lưu các sông Bến Hải và Thạch Hãn, tỉnh Quảng Trị. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN, Khoa học Tự nhiên và Công nghệ*, 15:1–8.
- [9] Luân, N. T., Hùng, N. T., Cường, V. Đ., Huyền, N. T. (2017). Nghiên cứu thành lập bản đồ ngập lụt từ ảnh viễn thám radar áp dụng cho hạ du lưu vực sông Trà Khúc, sông Vệ, tỉnh Quảng Ngãi. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, 39(1-8).
- [10] Tuấn, H. N. (2017). Xây dựng bản đồ ngập lụt hạ du hồ chứa nước Eadrăng tỉnh Đắk Lắk ứng với các kịch bản xả lũ và đánh giá thiệt hại do ngập lụt gây ra. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, 39:1–8.
- [11] Tansar, H., Babur, M., Karnchanapaiboon, S. L. (2020). [Flood inundation modeling and hazard assessment in Lower Ping River Basin using MIKE FLOOD](#). *Arabian Journal of Geosciences*, 13(18).
- [12] Khosravi, K., Rostaminejad, M., Cooper, J. R., Mao, L., Melesse, A. M. (2019). [Dam break analysis and flood inundation mapping: The case study of Sefid-Roud Dam, Iran](#). *Extreme Hydrology and Climate Variability*, Elsevier, 395–405.
- [13] Huyền, N. T. T. (2018). Ứng dụng ảnh viễn thám kết hợp mô hình thủy văn trong nghiên cứu dòng chảy lũ lưu vực sông Vệ tỉnh Quảng Ngãi. *Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ*, 60(6):44–49.
- [14] Nguyen, H. T. T., Doan, T. M., Tomppo, E., McRoberts, R. E. (2020). [Land Use/Land Cover Mapping Using Multitemporal Sentinel-2 Imagery and Four Classification Methods—A Case Study from Dak Nong, Vietnam](#). *Remote Sensing*, 12(9):1367.
- [15] Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V., Murayama, Y., Ranagalage, M. (2020). [Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review](#). *Remote Sensing*, 12(14):2291.
- [16] Chaves, M. E. D., Picoli, M. C. A., Sanches, I. D. (2020). [Recent Applications of Landsat 8/OLI and Sentinel-2/MSI for Land Use and Land Cover Mapping: A Systematic Review](#). *Remote Sensing*, 12(18): 3062.
- [17] Chinh, L. T. D., Hằng, H. T., Linh, T. H., Quỳnh, B. D. (2022). [Đánh giá ảnh hưởng của lũ lụt khu vực tỉnh Quảng Bình sử dụng Google Earth Engine và các phân tích không gian](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 16(5V):101–113.
- [18] Vanderkimpfen, P., Melger, E., Peeters, P. (2008). [Flood modeling for risk evaluation—a MIKE FLOOD vs. Flood Risk Management: Research and Practice](#), CRC Press, 77–84.
- [19] Patro, S., Chatterjee, C., Mohanty, S., Singh, R., Raghuwanshi, N. S. (2009). [Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data](#). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 37(1): 107–118.
- [20] Kadam, P., Sen, D. (2012). [Flood inundation simulation in Ajoy River using MIKE-FLOOD](#). *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 18(2):129–141.
- [21] <https://tapchigiaothong.vn/ung-dung-mo-hinh-mike-flood-tinh-toan-ngap-lut-18355886.htm>.
- [22] Ding, Y., Jia, Y., Wang, S. S. Y. (2004). [Identification of Manning's Roughness Coefficients in Shallow Water Flows](#). *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(6):501–510.
- [23] Hossain, A. K. M. A., Jia, Y., Chao, X. (2009). [Estimation of Manning's roughness coefficient distribution for hydrodynamic model using remotely sensed land cover features](#). *2009 17th International Conference on Geoinformatics*, IEEE, 1:3–6.
- [24] Kamali, P., Ebrahimian, H., Parsinejad, M. (2018). [Estimation of Manning roughness coefficient for vegetated furrows](#). *Irrigation Science*, 36(6):339–348.
- [25] Li, Z., Zhang, J. (2001). [Calculation of Field Manning's Roughness Coefficient](#). *Agricultural Water Management*, 49(2):153–161.
- [26] Papaioannou, G., Loukas, A., Vasiliades, L., Aronica, G. T. (2016). [Flood inundation mapping sensitivity to riverine spatial resolution and modelling approach](#). *Natural Hazards*, 83(S1):117–132.