DOI: 10.31276/VJST.2026.4196

Đánh giá khả năng tích hợp Chlorophyll-a từ Sentinel-2 vào mô hình chất lượng nước phục vụ cảnh báo tại lưu vực sông Thạch Hãn, tỉnh Quảng Trị

Hà Trọng Ngọc[1, 2*], Nguyễn Mạnh Khải[2, 3], Mai Xuân Dũng[4], Nguyễn Quang Hưng[5]

[1]Cục Môi trường, Bộ Nông nghiệp và Môi trường, 10 Tôn Thất Thuyết, phường Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

[2]Phòng thí nghiệm trọng điểm Công nghệ môi trường xanh và Tái chế chất thải, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, phường Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

[3]Khoa Môi trường, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, số 334 Nguyễn Trãi, phường Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

[4]Trung tâm Quan trắc Nông nghiệp và Môi trường Quảng Trị, 64 Thanh Niên, phường Đồng Hới, tỉnh Quảng Trị, Việt Nam

[5]Khoa Khí tượng Thuỷ văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, phường Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 10/8/2026; ngày chuyển phản biện 11/8/2026; ngày nhận phản biện 25/8/2026; ngày chấp nhận đăng 3/9/2026

Tóm tắt:

Mô hình chất lượng nước là công cụ quan trọng trong giám sát, đánh giá và hỗ trợ quản lý chất lượng nước mặt. Tuy nhiên, độ tin cậy của kết quả mô phỏng phụ thuộc đáng kể vào mức độ đầy đủ của thông tin đầu vào, đặc biệt là các biến liên quan đến quá trình sinh học trong thủy vực. Nghiên cứu này thử nghiệm khả năng tích hợp thông tin Chlorophyll-a (Chl-a) ước tính từ ảnh Sentinel-2 vào mô hình chất lượng nước cho hệ thống sông Thạch Hãn, tỉnh Quảng Trị. Chl-a được ước tính từ giá trị phản xạ phổ tại các kênh B2 và B3, kiểm chứng với số liệu thực đo và bổ sung vào mô phỏng. Hai kịch bản được xây dựng trên cơ sở mô hình chất lượng nước kế thừa, gồm cấu hình mô hình nền (Kịch bản 1) và cấu hình bổ sung Chl-a từ Sentinel-2 (Kịch bản 2). Kết quả được đánh giá bằng các chỉ tiêu RMSE, MAE, ME và R^2 dựa trên số liệu TN và TP thực đo. Việc bổ sung Chl-a cải thiện

[*]Tác giả liên hệ: Email: hatrongngoc@gmail.com

rõ rệt mô phỏng TN, với RMSE giảm từ 0,1263 xuống 0,0537, MAE từ 0,1191 xuống 0,0487 và R^2 tăng từ 0,665 lên 0,977. Đối với TP, RMSE và MAE tăng nhẹ, trong khi R^2 tăng từ 0,032 lên 0,207. Kết quả cho thấy Chl-a từ Sentinel-2 có khả năng bổ sung thông tin sinh học và cải thiện mô phỏng TN, trong khi ảnh hưởng đến TP cần tiếp tục được kiểm chứng. Kết quả mô phỏng được ứng dụng thử nghiệm trong hệ thống quan trắc và cảnh báo chất lượng nước trên nền tảng WebGIS.
Từ khoá: **cảnh báo chất lượng nước, Chlorophyll-a, mô hình chất lượng nước, lưu vực sông Thạch Hãn, Sentinel-2.**
Chỉ số phân loại: **1.5, 2.1, 2,7**

Assessing the feasibility of integrating Sentinel-2 Chlorophyll-a data into a water quality monitoring system for early warning purposes in the Thach Han River basin, Quang Tri Province, Vietnam

Trong Ngoc Ha[1, 2*], Manh Khai Nguyen[2, 3], Xuan Dung Mai[4], Quang Hung Nguyen[5]

[1]Department of Environment, Ministry of Agriculture and Environment, 10 Ton That Thuyet Street, Cau Giay Ward, Hanoi, Vietnam

[2]Key Laboratory of Green Environmental Technology and Waste Recycling, VNU University of Science, Vietnam National University, Hanoi, 334 Nguyen Trai Street, Thanh Xuan Ward, Hanoi, Vietnam

[3]Faculty of Environmental Sciences, VNU University of Science, Vietnam National University, Hanoi, 334 Nguyen Trai Street, Thanh Xuan Ward, Hanoi, Vietnam

[4]Quang Tri Center for Agricultural and Environmental Monitoring, 64 Thanh Nien Street, Dong Hoi Ward, Quang Tri Province, Vietnam

[5]Faculty of Meteorology, Hydrology and Oceanography, VNU University of Science, Vietnam National University, Hanoi, 334 Nguyen Trai Street, Thanh Xuan Ward, Hanoi, Vietnam

Received 10 August 2026; revised 25 August 2026; accepted 3 September 2026

Abstract:

Water-quality models are important tools for monitoring, assessing, and supporting the management of surface-water quality. However, the reliability of

model simulations depends partly on the completeness of input information, particularly variables associated with biological processes in aquatic systems. This study investigates the feasibility of integrating Chlorophyll-a (Chl-a) information derived from Sentinel-2 imagery into a water-quality model for the Thach Han River system, Vietnam. Chl-a was estimated using spectral reflectance from the B2 and B3 bands of Sentinel-2 and validated against field-measured Chl-a data before being incorporated as additional information into the water-quality simulation. Two scenarios were evaluated using an inherited water-quality modeling framework: Scenario 1 (S1) representing the baseline model configuration and Scenario 2 (S2) incorporating Sentinel-2-derived Chl-a. Model performance was evaluated against observed total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) using RMSE, MAE, ME, and R^2. The results demonstrate a substantial improvement in TN simulation following Chl-a integration, with RMSE decreasing from 0.1263 to 0.0537, MAE from 0.1191 to 0.0487, and R^2 increasing from 0.665 to 0.977. For TP, RMSE and MAE slightly increased from 0.00727 to 0.00773 and from 0.00443 to 0.00591, respectively, although R^2 increased from 0.032 to 0.207. These results indicate that integrating Sentinel-2-derived Chl-a can provide additional biological information and substantially improve TN simulation, whereas its effect on TP remains inconclusive and requires further validation. The simulation results were applied on a pilot basis in a WebGIS-based water-quality monitoring and early-warning system.

Keywords: **Chlorophyll-a, Sentinel-2, Thach Han River, water quality warning system, water-quality modelling.**

Classification numbers: **1.5, 2.1, 2.7**

1. Đặt vấn đề

Mô hình chất lượng nước là một trong những công cụ quan trọng phục vụ quan trắc, giám sát và quản lý chất lượng nước mặt. Khác với quan trắc tại các điểm và thời điểm riêng lẻ, mô hình dựa trên quá trình (process-based water-quality models) cho phép mô phỏng sự biến đổi của các thông số chất lượng nước theo không gian và thời gian, đồng thời hỗ trợ đánh giá diễn biến của hệ thống dưới các điều kiện và kịch bản khác nhau. Tuy nhiên, độ tin cậy của kết quả mô hình phụ thuộc đáng kể vào chất lượng, số lượng và hàm lượng thông tin của các số liệu quan trắc được sử dụng để thiết lập, hiệu

chỉnh và kiểm định mô hình. M. Rode và cs (2007a) [1] cho thấy, thông tin chứa trong các bộ dữ liệu hiệu chỉnh có ảnh hưởng rõ rệt đến khả năng nhận dạng tham số và độ bất định của mô hình chất lượng nước; trong khi đó, M. Rode và cs (2007b) [2] chỉ ra rằng, bất định do lấy mẫu cũng có thể ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng của dữ liệu nước sông. Trong các quá trình chất lượng nước, Chlorophyll-a (Chl-a) là một chỉ thị quan trọng của sinh khối thực vật phù du và có liên quan chặt chẽ với động thái chất dinh dưỡng trong hệ thống thủy sinh. Đặc biệt, tổng quan hệ thống của M.G. Bennett và cs (2021) [3], tổng hợp 151 nghiên cứu về các hệ sinh thái nước chảy, cho thấy Chl-a có mối quan hệ với tổng nitơ (TN) và tổng phốt pho (TP), mặc dù mức độ và đặc điểm của mối quan hệ thay đổi theo điều kiện sinh thái của từng hệ thống. Do đó, việc bổ sung thông tin về Chl-a vào mô hình chất lượng nước có thể cung cấp thêm thông tin về trạng thái sinh học và các quá trình tương tác với chất dinh dưỡng, qua đó có khả năng cải thiện khả năng mô phỏng TN và TP.

Viễn thám vệ tinh mở ra khả năng bổ sung thông tin Chl-a với phạm vi bao phủ không gian rộng hơn so với quan trắc truyền thống. Nhiều nghiên cứu đã sử dụng dữ liệu đa phổ để ước tính Chl-a trong cả hồ, hồ chứa và hệ thống sông. Đối với Sentinel-2, J. Llodrà-Llabrés và cs (2023) [4] đã tổng hợp các phương pháp ước tính Chl-a trong thủy vực nội địa và cho thấy các kênh phổ của Sentinel-2 có khả năng được sử dụng để xây dựng các chỉ số phổ và mô hình ước tính Chl-a, mặc dù độ chính xác phụ thuộc vào đặc điểm quang học của thủy vực, phương pháp xử lý dữ liệu và dữ liệu thực địa dùng để kiểm chứng. Các nghiên cứu thực nghiệm cũng đã chứng minh khả năng này trong những hệ thống sông cụ thể. Có thể nhắc đến các nghiên cứu như E. Choe, et al. (2015) [5] sử dụng ảnh RapidEye để ước tính Chl-a trên sông Nakdong, Hàn Quốc, trong khi D.T. Ngo và cs (2024) [6] sử dụng Sentinel-2 để xây dựng mô hình ước tính Chl-a cho lưu vực sông Hinh, Việt Nam, R. Shi và cs (2017) [7] xây dựng mô hình phân tích diệp lục bằng cách kết hợp phân tích sóng nhỏ với mạng nơ-ron trên dữ liệu Landsat TM; C.X. Huy và cs (2022) [8] ứng dụng ảnh VNREDSat-1 để xác định phân bố hàm lượng diệp lục tại khu vực Thuận An, Thừa Thiên Huế; và D.T. Loi và cs (2024) [9] nghiên cứu mối quan hệ giữa Chlorophyll-a và phổ phản xạ mặt nước từ ảnh Landsat 8 OLI tại Hồ Tây, Hà Nội.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về ước tính Chl-a từ viễn thám và một số nghiên cứu đã kết hợp dữ liệu viễn thám với mô hình chất lượng nước [10]; theo N.T.P. Thao

và cs (2025) [11] việc sử dụng Chl-a được ước tính từ Sentinel-2 như một nguồn thông tin bổ sung cho mô hình chất lượng nước dựa trên quá trình, nhằm đánh giá khả năng cải thiện mô phỏng TN và TP trong một hệ thống sông cụ thể, vẫn cần được kiểm chứng thực nghiệm.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này thực hiện một đánh giá bước đầu về tính khả thi của việc tích hợp dữ liệu Chl-a từ Sentinel-2 vào mô hình chất lượng nước cho hệ thống sông Thạch Hãn, Việt Nam. Dữ liệu Chl-a được ước tính từ các kênh phổ Sentinel-2 bằng mối quan hệ phổ được lựa chọn và kiểm chứng với số liệu thực đo. Tiếp theo đó, thông tin Chl-a được bổ sung vào mô hình và tác động được đánh giá thông qua so sánh hai kịch bản mô phỏng: không bổ sung và có bổ sung Chl-a. Khả năng mô phỏng TN và TP của hai kịch bản được đánh giá bằng sai số căn phương trung bình (RMSE), sai số trung bình (ME), sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và hệ số xác định R^2 (phản ánh mức độ tương quan/phù hợp giữa mô phỏng và quan trắc). Kết quả mô hình sau đó được thể hiện trên nền tảng WebGIS như một ứng dụng thực tiễn hỗ trợ giám sát, cảnh báo chất lượng nước theo không gian. Ở Trung Quốc, F. Ni và cs (2009) [12] phát triển hệ thống cảnh báo sớm dựa trên GIS cho nước sạch nông thôn, trong khi L. Jin và cs (2014) [13] xây dựng hệ thống chỉ số cảnh báo sớm bằng mô hình đánh giá mờ cho lưu vực sông Qingdao. Tại Mỹ, Ủy ban Lưu vực sông Susquehanna (2015) [14] đã triển khai hệ thống cảnh báo trên lưu vực sông Susquehanna với 9 trạm giám sát tự động. Ở Việt Nam, N.D. Tuan (2008) [15] thí điểm hệ thống quan trắc tự động tại KCN Tân Bình (TP. Hồ Chí Minh); Viện Tài nguyên và Môi trường Biển (2024) [16] ứng dụng WebGIS để giám sát và cảnh báo CLN cho lưu vực sông Rế (Hải Phòng). Tổng quan này cho thấy xu hướng nghiên cứu ngày càng đa dạng: từ giải đoán Chlorophyll-a bằng viễn thám, tích hợp dữ liệu vệ tinh vào mô hình chất lượng nước, cho đến phát triển các hệ thống WebGIS cảnh báo, đều hướng tới mục tiêu nâng cao hiệu quả giám sát và quản lý chất lượng nước

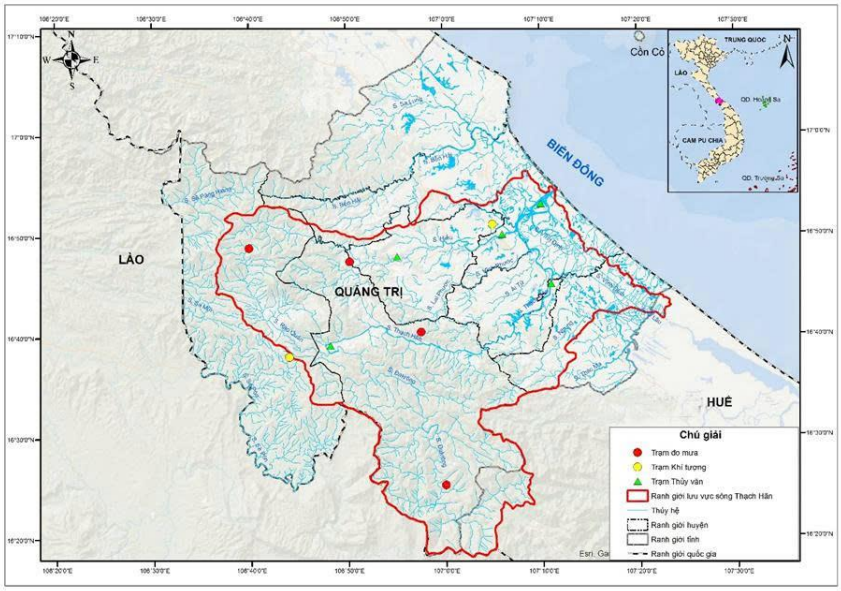
2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Lưu vực sông Thạch Hãn nằm trong phạm vi từ 16°18’ đến 16°54’ vĩ độ Bắc và 106°36’ đến 107°18’ kinh độ Đông. Phía Đông giáp với Biển Đông, phía Tây giáp lưu vực sông Sê Pôn, phía Nam giáp lưu vực Ô Lưu và tỉnh Thừa Thiên Huế (nay là TP. Huế), phía Bắc giáp lưu vực sông Bến Hải. Sông Thạch Hãn bắt nguồn từ dãy Trường Sơn, có chiều dài 156 km. Dòng chính Thạch Hãn, đoạn thượng nguồn (sông Đakrông)

chảy quanh núi Da Ban, khi về tới Ba Lòng sông chuyển hướng Đông Bắc và đổ ra biển tại Cửa Việt với diện tích lưu vực 2660 km^2.

Lưu vực có địa hình phân hóa rõ rệt từ vùng núi phía Tây đến đồng bằng và ven biển phía Đông; địa hình thượng lưu dốc, trong khi hạ lưu tương đối thấp và bằng phẳng, tạo nên sự biến động đáng kể về dòng chảy (hình 1). Lưu vực có khí hậu nhiệt đới gió mùa, lượng mưa năm lớn và tập trung chủ yếu vào mùa mưa, trong khi mùa khô kéo dài. Nguồn nước của sông hiện đang được khai thác cho nhiều mục đích như cấp nước sinh hoạt, công nghiệp, nông nghiệp, nuôi trồng thủy sản, giao thông thủy và du lịch.



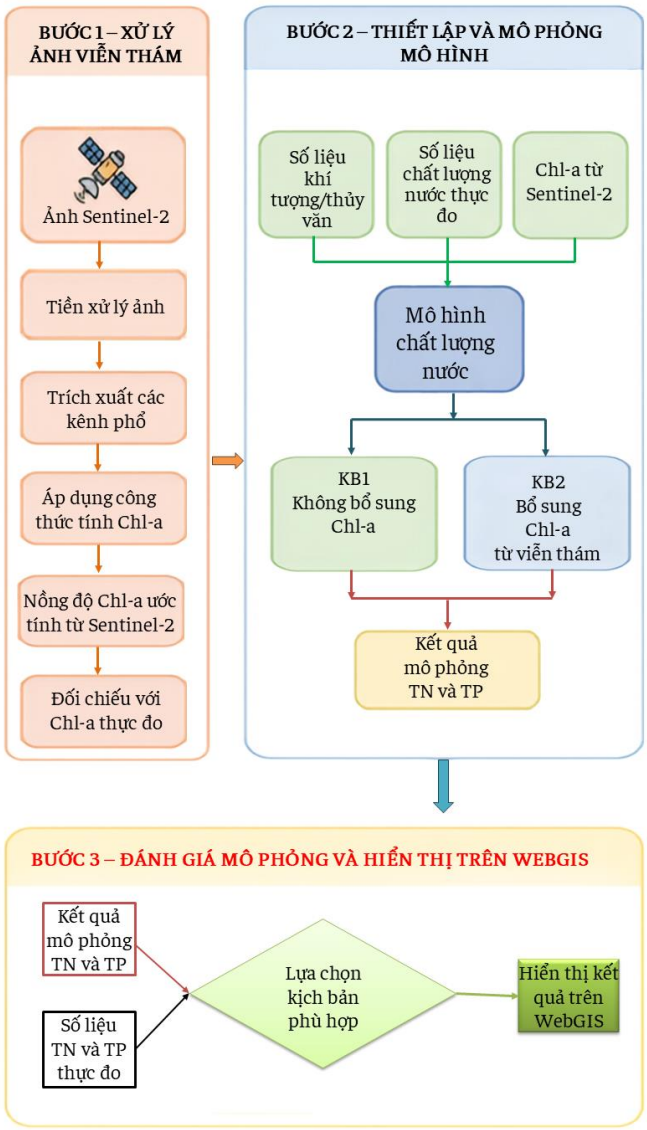
Hình 1. Bản đồ khu vực nghiên cứu. Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp.

Ước tính khoảng 370.000 người sinh sống trong lưu vực với các hoạt động kinh tế của lưu vực bao gồm nông nghiệp, lâm nghiệp, thủy sản, công nghiệp, dịch vụ và các hoạt động đô thị. Nông nghiệp chiếm diện tích đáng kể, với các vùng trồng lúa và cây hàng năm tập trung ở khu vực đồng bằng; ngoài ra còn có các vùng cây công nghiệp và cây lâu năm ở khu vực đồi núi.

Các hoạt động này tạo ra những nguồn gây ô nhiễm tiềm tàng cho hệ thống sông, bao gồm nước thải sinh hoạt và đô thị, nước thải sản xuất, dòng chảy mặt từ khu vực nông nghiệp và các nguồn xả thải phân tán.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu được triển khai theo một quy trình gồm ba bước chính nhằm đánh giá tính khả thi của việc sử dụng Chl-a được ước tính từ ảnh Sentinel-2 như một nguồn thông tin bổ sung cho mô hình chất lượng nước (hình 2).



Hình 2. Các bước triển khai nghiên cứu (Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp).

Bước thứ nhất: Ảnh Sentinel-2 được thu thập và xử lý để trích xuất các kênh phổ cần thiết, sau đó áp dụng công thức được lựa chọn để ước tính nồng độ Chl-a. Kết quả ước tính được đối chiếu với các giá trị Chl-a thực đo nhằm đánh giá mức độ phù hợp trước khi sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho mô hình chất lượng nước.

Bước thứ hai: Mô hình chất lượng nước được thiết lập và cập nhật với thông tin Chl-a từ Sentinel-2. Hai kịch bản mô phỏng được xây dựng để đánh giá ảnh hưởng của việc bổ sung Chl-a: Kịch bản 1 (KB1) sử dụng cấu hình mô hình không bổ sung Chl-a từ viễn thám và Kịch bản 2 (KB2) sử dụng cấu hình có bổ sung Chl-a. Kết quả mô phỏng TN và TP của hai kịch bản được đánh giá thông qua so sánh với số liệu thực đo.

Bước thứ ba: Mức độ phù hợp của kết quả mô phỏng TN và TP được đánh giá bằng các chỉ tiêu RMSE, MAE, ME và R^2, kết hợp với biểu đồ phân tán giữa giá trị mô phỏng và thực đo. Kịch bản cho kết quả phù hợp hơn được sử dụng làm cơ sở để thể

hiện diễn biến chất lượng nước theo không gian trên nền tảng WebGIS, phục vụ giám sát, cảnh báo và hỗ trợ quản lý tài nguyên nước.

2.3. Dữ liệu sử dụng

Dữ liệu viễn thám và Chl-a thực đo

Nghiên cứu sử dụng ảnh vệ tinh Sentinel-2 để cung cấp dữ liệu phổ phục vụ ước tính nồng độ Chl-a trên hệ thống sông Thạch Hãn. Sentinel-2 được lựa chọn do có độ phân giải không gian và phổ phù hợp cho quan trắc chất lượng nước nội địa; tiềm năng sử dụng dữ liệu Sentinel-2 để ước tính Chl-a thông qua các chỉ số phổ và mô hình thực nghiệm.

Ảnh Sentinel-2 thu thập trong giai đoạn tháng 1-4 năm 2025, được lọc với độ che phủ mây không quá 20% bằng thuật toán trên nền Google Earth Engine, được xử lý hiệu chỉnh khí quyển bằng thuật toán Sen2Cor do Cơ quan Vũ trụ Châu Âu (ESA) phát triển, nhằm chuyển đổi dữ liệu ảnh về phản xạ bề mặt. Các kênh phổ cần thiết, trong đó tập trung vào B2 (bước sóng ~490 nm) và B3 (bước sóng ~560 nm), được xử lý để ước tính Chl-a. Bên cạnh dữ liệu vệ tinh, nghiên cứu sử dụng 36 giá trị Chl-a thực đo tại các vị trí quan trắc trên hệ thống sông Thạch Hãn trong đợt đo đạc quan trắc định kỳ của Trung tâm Quan trắc Nông nghiệp và Môi trường Quảng Trị năm 2025.

Các mô hình hồi quy tuyến tính được xây dựng và đề xuất để chuyển đổi từ tín hiệu Sen-2 thành chỉ số Chl-a được xây dựng khá nhiều trong những nghiên cứu gần đây. Trong điều kiện bộ số liệu viễn thám và thực đo chưa đủ dày để xây dựng một mô hình hoàn chỉnh, nghiên cứu đã thử nghiệm lần lượt các công thức được khuyến nghị và thấy công thức của D.T. Loi và cs (2024) [9] đang cung cấp giá trị Chl-a hợp lý nhất so với giá trị thực đo trên lưu vực sông Thạch Hãn.

Dữ liệu mô hình thủy văn thủy lực và chất lượng nước

Nghiên cứu này thừa hưởng bộ mô hình chất lượng nước đã được hiệu chỉnh kiểm định cho lưu vực Thạch Hãn của Trung tâm Quan trắc Nông nghiệp và Môi trường Quảng Trị. Mô hình thủy văn thủy lực được thiết lập cho 11 nhánh sông với tổng chiều dài 268,91 km được thể hiện qua 149 mặt cắt, biên trên gồm 5 biên lưu lượng đầu vào (Ô Lâu, Thác Ma, Dakrong, Đầu Mầu, Lai Phước) và 2 biên dưới là mực nước tại Cửa Lác và Cửa Việt. Mô hình chất lượng nước được thiết lập gồm 57 nguồn thải điểm và 7 nguồn thải diện đưa vào mô hình bao gồm các thông số môi trường BOD, COD, NH_4-N, TN, TP.

Đồng thời với bộ mô hình chất lượng nước, bộ dữ liệu về nguồn thải và hiện trạng chất lượng nước của hệ thống sông Thạch Hãn do Trung tâm Quan trắc Nông nghiệp và Môi trường tỉnh Quảng Trị cung cấp, bao gồm thông tin về các nguồn xả thải, các chỉ số quan trắc và đo đạc môi trường trên sông và tại các nguồn thải trong nhiều năm.

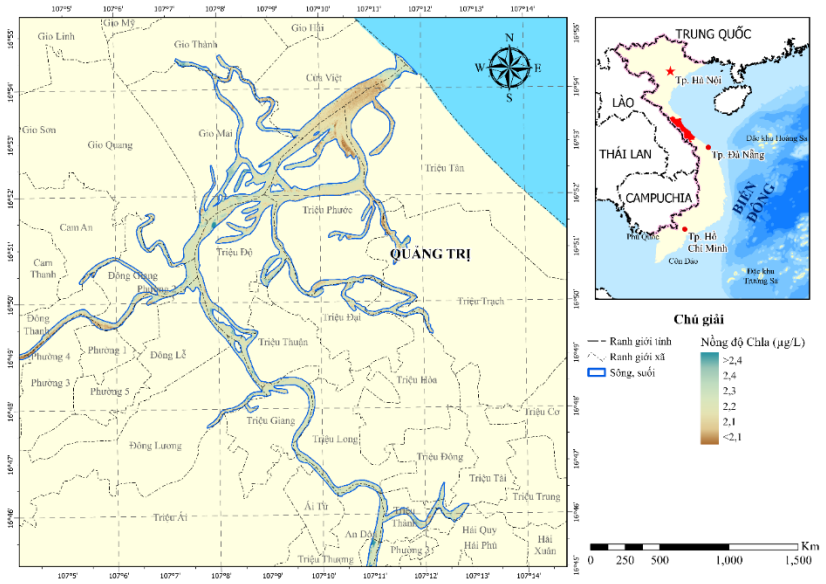
3. Kết quả và bàn luận

3.1. Kết quả xử lý ảnh viễn thám khu vực nghiên cứu

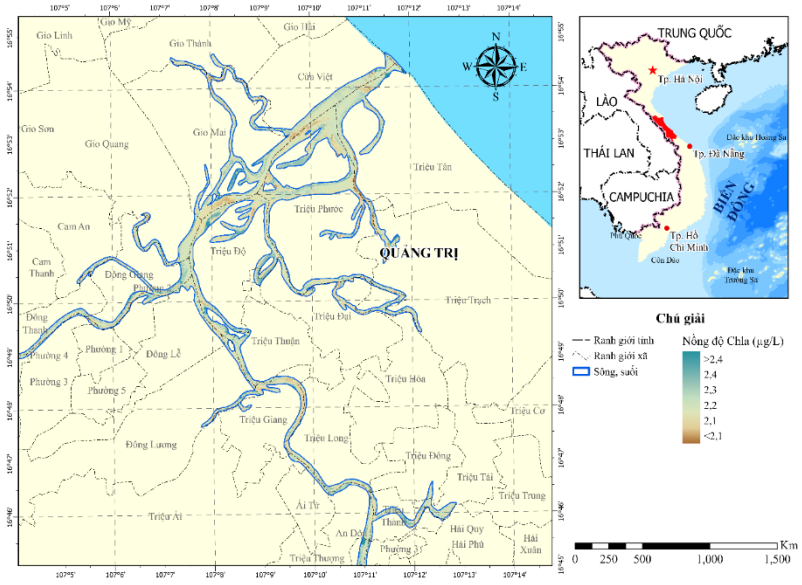
Nghiên cứu này đã thử nghiệm với nhiều công thức khác nhau và lựa chọn sử dụng công thức sau [9]:

$$C_{Chlorophyll\text{-}a} = 236{,}672*(B3/B2) + 0{,}6546 \quad (1)$$

trong đó: hàm lượng Chl-a có đơn vị là (µg/l); B3/B2 ứng với tỷ số kênh 3/kênh 2 của ảnh viễn thám sau khi đã hiệu chỉnh; hàm lượng Chl-a trong sông tính toán từ số liệu viễn thám các tháng mùa kiệt năm 2025 dao động 2,05- 2,8 µg/l, kết quả phân bố theo không gian được thể hiện trên các hình 3 và hình 4. Giá trị thực đo của Chl-a tháng 3 và tháng 4 năm 2025 tại các vị trí khảo sát trên các sông thuộc LVS Thạch Hãn, tỉnh Quảng Trị là <3 µg/l [17]. Mức chênh lệch giữa giá trị Chl-a giải đoán từ dữ liệu Sentinel-2 và giá trị thực đo cho thấy mức chênh lệch khá nhỏ và công thức lựa chọn được chấp nhận sử dụng trong nghiên cứu này.



Hình 3. Nồng độ Chl-a giải đoán từ ảnh viễn thám khu vực nghiên cứu tháng 3 năm 2025. Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp.



Hình 4. Nồng độ Chl-a giải đoán từ ảnh viễn thám khu vực nghiên cứu tháng 4 năm 2025. Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp.

3.2. Cập nhật mô hình chất lượng nước

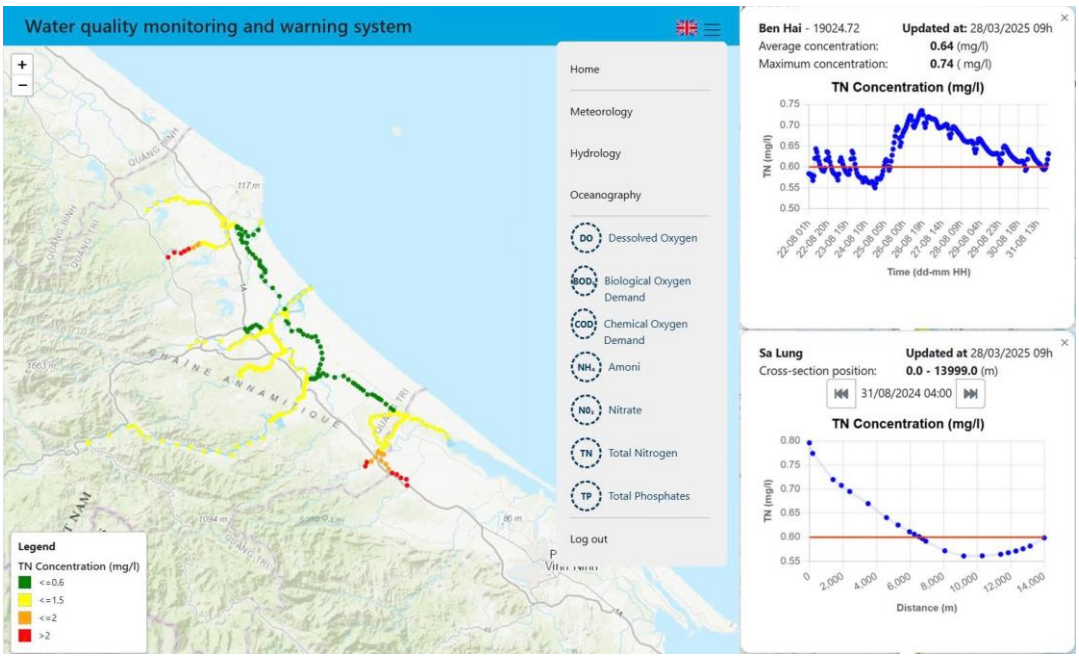
Mô hình chất lượng nước cho lưu vực sông Thạch Hãn đã được thực hiện trong nhiệm vụ xây dựng kế hoạch quản lý chất lượng nước mặt do Trung tâm Quan trắc Nông nghiệp và Môi trường tỉnh Quảng Trị thực hiện trong hai năm 2024 và 2025, sử dụng bộ mô hình gồm các mô đun MIKE NAM, MIKE 11HD, MIKE 11 AD, MIKE 11 WQ. Kết quả mô hình thủy văn và thủy lực mô phỏng ở mức khá, với mô hình thủy văn đạt chỉ số Nash 0,723-0,73; mô hình thủy lực có chỉ số Nash 0,601-0,965 tại các điểm hiệu chỉnh kiểm định. Tuy nhiên, mô phỏng chất lượng nước mới chỉ ở một mức có thể chấp nhận được đối với một số thông số ô nhiễm, một trong những nguyên nhân có thể thấy rõ là lượng dữ liệu đầu vào (nguồn xả thải, nồng độ thực đo chất ô nhiễm trên sông) chưa đủ dày và chính xác cả về thời gian lẫn không gian để cung cấp cho mô hình.

Hai kịch bản mô phỏng chất lượng nước được thực hiện trên cùng bộ mô hình và các điều kiện thủy văn, thủy lực, nguồn thải và điều kiện biên. Kịch bản 1 (KB1) sử dụng cấu hình mô hình nền, trong khi Kịch bản 2 (KB2) được bổ sung thông tin Chl-a được ước tính từ dữ liệu Sentinel-2. Việc bổ sung Chl-a nhằm đưa thêm thông tin về thành phần sinh học của hệ thống vào quá trình mô phỏng chất lượng nước, qua đó đánh giá liệu sự thay đổi này có làm kết quả mô phỏng các thông số dinh dưỡng TN và TP phù hợp hơn với số liệu thực đo hay không. Trong kịch bản 2, các hệ số động học sinh hoá cốt lõi được hiệu chỉnh theo phương pháp thử và sai, các thông số động học sinh hoá chính đã hiệu chỉnh cho khu vực nghiên cứu được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Bộ thông số động học sinh hoá.

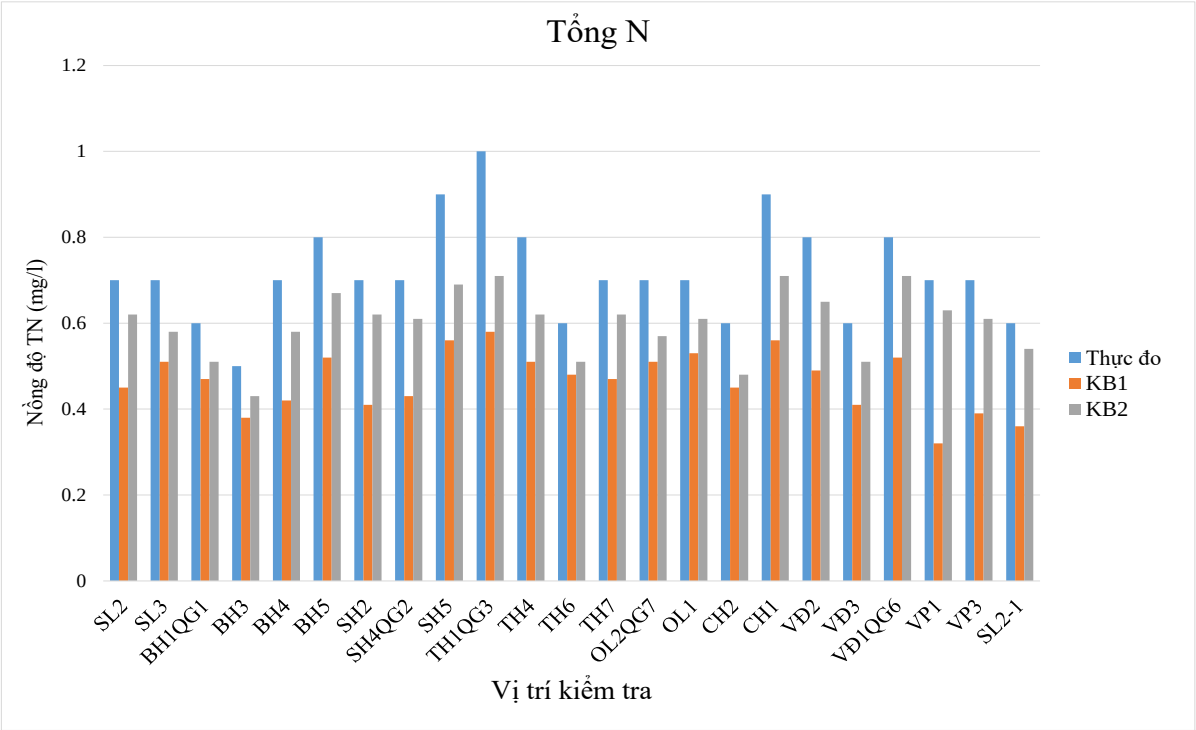
TT	Thông số	Đơn vị	Giá trị
1	Vĩ độ	độ	16,5
2	Hệ số tán xạ từ CH	1/m	7,8
3	Số mũ, tán xạ từ CH	-	0,65
4	Thực vật phù du, Hiệu chỉnh cho phản ứng tối	-	1,4
5	Nồng độ Nitơ nội bào tối thiểu của thực vật phù du	g N/g C	0,075
6	Nồng độ Nitơ nội bào tối đa của thực vật phù du	g N/g C	0,18
7	Nồng độ Phốt pho nội bào tối thiểu của thực vật phù du	g P/g C	0,008
8	Nồng độ Phốt pho nội bào tối đa của thực vật phù du	g P/g C	0,04
9	Nồng độ nửa bão hòa Phốt pho của thực vật phù du	g P/g C	0,005
10	Giới hạn hấp thụ chất dinh dưỡng của thực vật phù du	-	0,001
11	Tốc độ hấp thụ NH_4 tối đa của thực vật phù du	G N/g C/ngày	0,13
12	Tốc độ hấp thụ NO_3 tối đa của thực vật phù du	g N/g C/ngày	1,4
13	Tốc độ hấp thụ PO_4 tối đa của thực vật phù du	g P/g C/ngày	0,13
14	Nồng độ nửa bão hòa của thực vật phù du với sự hấp thụ NH_4	g N/m^3	0,03
15	Nồng độ nửa bão hòa của thực vật phù du với sự hấp thụ NO_3	g N/m^3	0,03
16	Nồng độ nửa bão hòa của thực vật phù du với sự hấp thụ PO_4	g P/m^3	0,02
17	Hàm lượng CH_3 khi tảo nở hoa	g chl/m^2	0,18
18	Hàm lượng CH_3 tối thiểu để tảo nở hoa	g chl/m^2	0,002
19	Hằng số nửa bão hòa NH_4, quá trình nitơ hóa	g N/m^2	0,4

Kết quả mô phỏng với Templates mới bổ sung thêm thông số Chl-a được giải đoán từ ảnh vệ tinh ứng dụng công nghệ viễn thám đã cho sai số giảm tại các vị trí kiểm tra (hình 5). Điều này cho thấy, với hạn chế số liệu CLN thực đo theo không gian và thời gian như khu vực nghiên cứu thì việc ứng dụng viễn thám có khả năng nâng cao độ chính xác kết quả của mô hình.



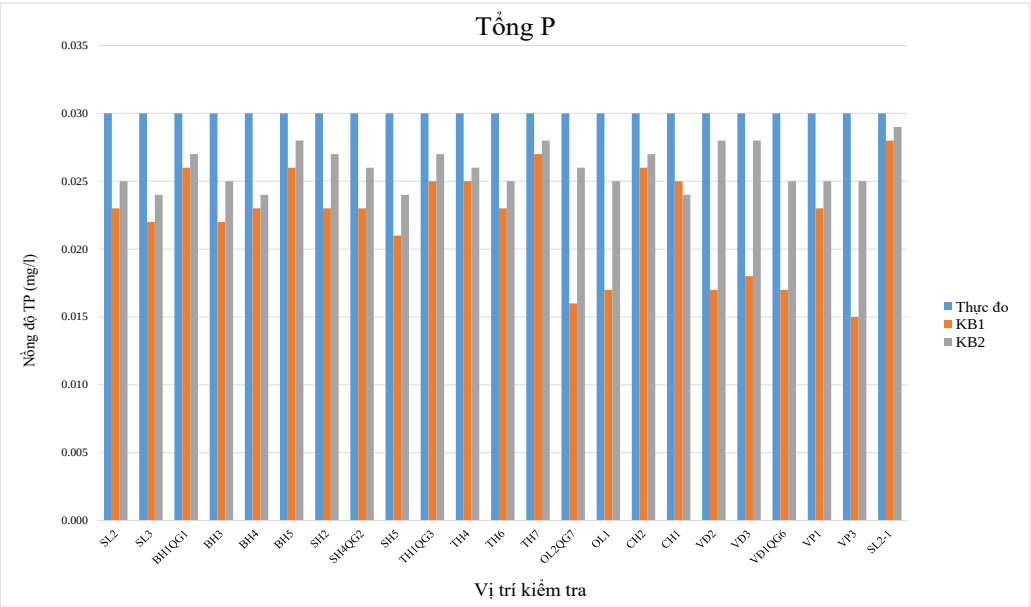
Hình 5. Vị trí các điểm đánh giá so sánh TN và TP trên địa bàn tỉnh Quảng Trị. Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp.

Kết quả tại 23 vị trí quan trắc cho thấy, việc bổ sung Chl-a tạo ra sự thay đổi rõ rệt trong kết quả mô phỏng TN. Đối với KB1, giá trị TN mô phỏng có sai khác tương đối so với thực đo tại hầu hết các vị trí, với mức sai số tương đối dao động khoảng 10-25%. Khi bổ sung Chl-a trong KB2, sai số tại phần lớn các vị trí giảm xuống, nhiều vị trí chỉ còn khoảng 3-12%. Chẳng hạn, tại SL2, sai số giảm từ 22 (KB1) xuống 7% ở KB2; tại BH5 giảm từ 24 xuống 5%; và tại TH1QG3 giảm từ 25 xuống 11%. Xu hướng tương tự cũng xuất hiện tại nhiều vị trí khác trên hệ thống sông (hình 6).



Hình 6. Kết quả mô phỏng TN với hai kịch bản trước và sau khi bổ sung dữ liệu Chl-a. Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp.

Đối với TP, sự thay đổi giữa hai kịch bản phức tạp hơn. Tại một số vị trí, KB2 cho kết quả gần với thực đo hơn KB1, như BH1QG1, TH4 và TH6. Tuy nhiên, tại một số vị trí khác, sai số của KB2 lại tăng, điển hình là SH5, trong đó sai số tương đối tăng từ 3% ở KB1 lên 16% ở KB2. Do đó, kết quả theo từng vị trí chưa cho thấy sự cải thiện đồng nhất của TP khi bổ sung Chl-a (hình 7).



Hình 7. Kết quả mô phỏng TP với hai kịch bản trước và sau khi bổ sung dữ liệu Chl-a. Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp.

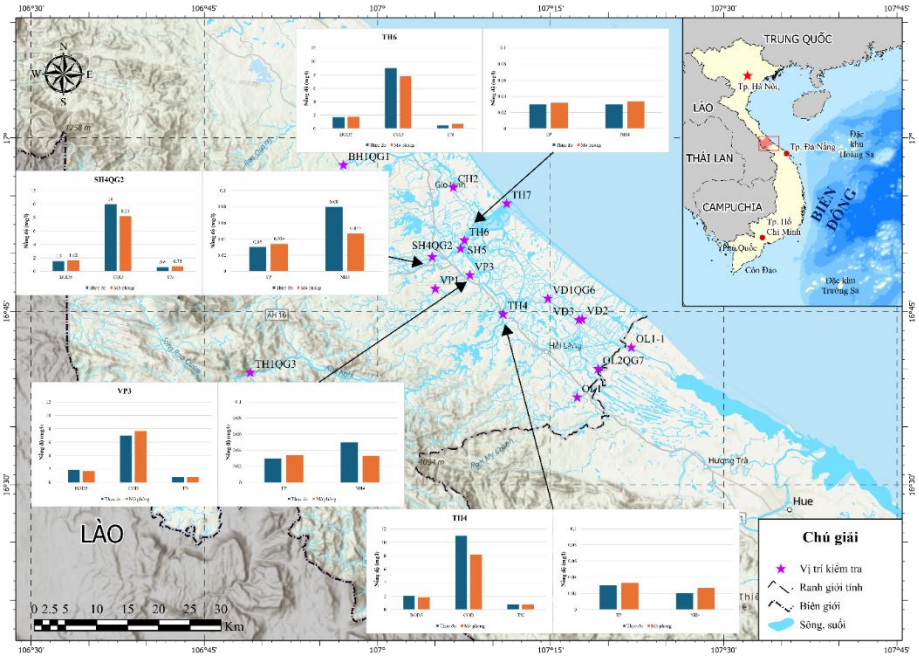
Để đánh giá tổng thể sự khác biệt giữa hai kịch bản, các kết quả mô phỏng được so sánh với số liệu thực đo thông qua RMSE, MAE, ME và R^2. Kết quả được tổng hợp trong bảng 2.

Bảng 2. So sánh hiệu quả mô phỏng TN và TP giữa hai kịch bản.

Thông số	Kịch bản	RMSE	MAE	ME	R^2
TN	KB1	0,1263	0,1191	-0,0313	0,665
	KB2	0,0537	0,0487	+0,0487	0,977
TP	KB1	0,00727	0,00443	+0,00200	0,032
	KB2	0,00773	0,00591	+0,00591	0,207

3.3. Hệ thống giám sát và cảnh báo chất lượng nước khu vực nghiên cứu

Trên cơ sở mô hình toán mô phỏng chất lượng nước của toàn bộ lưu vực sông Thạch Hãn đã được hiệu chỉnh và kiểm định, một hệ thống được xây dựng trên nền tảng WebGIS để cung cấp các thông tin về chất lượng nước mặt trên sông cho người dùng thông qua Internet. Mô hình toán được giữ nguyên các tham số đã thiết lập sau hiệu chỉnh kiểm định, các biên đầu vào được nhập từ các trạm khí tượng thủy văn và hải văn trên lưu vực, các biên chất lượng nước được thiết lập theo các chế độ xả của nguồn thải điểm và nguồn thải diện đã điều tra. Mô hình được khởi động chạy mô phỏng theo chế độ hàng ngày và cung cấp thông tin mô phỏng thời gian thực cho cộng đồng. Hệ thống đã được đưa vào thử nghiệm từ tháng 5 năm 2025 (hình 8).



Hình 8. Kết quả thử nghiệm hệ thống cảnh báo chất lượng nước. Nguồn: Nhóm tác giả tổng hợp.

Kết quả thử nghiệm hệ thống quan trắc, giám sát và cảnh báo chất lượng nước với 5 thông số ô nhiễm tại 4 vị trí kiểm tra cụ thể được thể hiện trên bảng 3 như sau:

Bảng 3. So sánh kết quả thử nghiệm hệ thống.

Thông số ô nhiễm	**SH4QG2**		**VP3**		**TH4**		**TH6**	
	Thực đo	***Mô phỏng***	***Thực đo***	***Mô phỏng***	***Thực đo***	***Mô phỏng***	***Thực đo***	***Mô phỏng***
BOD_5	1,5	1,62	1,9	1,67	2	1,82	1,7	1,78
COD	10	8,23	7	7,63	11	8,17	9	7,81
TN	0,6	0,73	0,8	0,79	0,7	0,76	0,5	0,71
TP	0,03	0,034	0,03	0,034	0,03	0,033	0,03	0,032
NH_4	0,08	0,047	0,05	0,033	0,02	0,027	0,03	0,034
Sai số	SH4QG2		VP3		TH4		TH6	
BOD_5	0,12	8%	0,23	12%	0,18	9%	0,08	5%
COD	1,77	18%	0,63	9%	2,83	26%	1,19	13%
TN	0,13	22%	0,01	1%	0,06	9%	0,21	42%
TP	0,004	13%	0,004	13%	0,003	10%	0,002	7%
NH_4	0,033	41%	0,017	34%	0,007	35%	0,004	13%

Kết quả đạt được này ngoài việc các nguồn ô nhiễm chính như công nghiệp, nông nghiệp và sinh hoạt được mô phỏng tương đối chính xác, phản ánh được tác động các nguồn ô nhiễm đến vị trí sông tiếp nhận; mô phỏng tương đối đầy đủ và chính xác quá trình gia nhập dòng chảy sông của các nguồn ô nhiễm cả dạng điểm và dạng diện trong khu vực nghiên cứu thì việc ứng dụng ảnh viễn thám cung cấp thêm số liệu thực đo chất lượng nước cũng đóng góp phần không nhỏ trong việc nâng cao độ chính xác kết quả mô phỏng của mô hình lõi hệ thống giúp hệ thống khi vận hành thử nghiệm đã đưa ra những giá trị cảnh báo có độ tin cậy cao hơn.

3.4. Bàn luận

Các nghiên cứu trước cho thấy Sentinel-2 có khả năng cung cấp thông tin Chl-a cho các thủy vực nội địa thông qua các quan hệ phổ và mô hình ước tính khác nhau. Tuy nhiên, hiệu quả của các công thức phụ thuộc vào đặc điểm quang học và loại hình thủy vực, do đó việc kiểm chứng bằng số liệu thực đo là cần thiết trước khi sử dụng cho các mục đích tiếp theo. Trong nghiên cứu này, Chl-a được ước tính từ các giá trị phản xạ phổ B2 và B3 của Sentinel-2 và được kiểm chứng với số liệu Chl-a thực đo. Kết quả cho

thấy, mức độ phù hợp đủ để sử dụng bộ dữ liệu Chl-a này như một nguồn thông tin bổ sung cho mô hình chất lượng nước. Kết quả hiện tại chứng minh tính khả thi của cách tiếp cận, tuy nhiên vẫn cần có các nghiên cứu và kết quả đầy đủ hơn để xác định được công thức được lựa chọn có tính áp dụng phổ quát cho hệ thống sông Thạch Hãn. Việc xây dựng và kiểm chứng một công thức Chl-a chuyên biệt với chuỗi số liệu dài hơn sẽ là hướng nghiên cứu tiếp theo.

Việc bổ sung Chl-a từ Sentinel-2 vào mô hình đã tạo ra sự cải thiện rõ rệt đối với mô phỏng TN. RMSE và MAE của TN lần lượt giảm khoảng 57% và 59%, trong khi R^2 tăng từ 0,665 lên 0,977. Điều này cho thấy việc bổ sung thông tin về Chl-a đã giúp mô hình mô tả tốt hơn mối quan hệ giữa các quá trình sinh học và chu trình dinh dưỡng trong hệ thống sông. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu tổng hợp trên hệ thống sông và suối, trong đó Chl-a có mối quan hệ tích cực với cả TN và TP, phản ánh sự tương tác giữa dinh dưỡng và sinh khối sinh vật sản xuất sơ cấp.

Đối với TP, mức độ cải thiện không rõ ràng. Mặc dù R^2 tăng từ 0,032 lên 0,207, RMSE và MAE lại tăng nhẹ khi chuyển từ KB1 sang KB2. Điều này cho thấy việc bổ sung Chl-a có thể làm thay đổi mối quan hệ giữa các quá trình sinh học và dinh dưỡng, nhưng không nhất thiết làm giảm sai số mô phỏng TP trong mọi điều kiện. Mối quan hệ giữa Chl-a và N/P vốn phụ thuộc vào điều kiện môi trường và trạng thái dinh dưỡng của từng hệ thống. Các nghiên cứu quy mô lớn cũng cho thấy vai trò tương đối của N và P đối với Chl-a có thể thay đổi theo trạng thái phú dưỡng. Một trong những thông tin có thể làm ảnh hưởng đến quá trình mô phỏng TP trong mô hình đó là có rất nhiều điểm khảo sát thực tế đang có kết quả là không phát hiện (<0,03 mg/l), do đó mô hình có thể chưa đảm bảo mô phỏng được chính xác diễn biến của TP trong sông.

Một số đoạn sông trên lưu vực Thạch Hãn có chiều rộng dòng chảy nhỏ, độ phân giải không gian 10 m của Sentinel-2 ở các kênh khả kính dễ gặp hiện tượng điểm ảnh hỗn hợp tại khu vực sát bờ sông hoặc các chi lưu nhỏ, gây nhiễu phổ phản xạ; số liệu thực đo TN, TP mới bắt đầu thu thập từ năm 2025, dẫn đến chuỗi số liệu thủy văn - môi trường chưa đủ dài để tối ưu hóa đầy đủ các thông số động học của mô đun mô phỏng sinh hóa. Mặc dù chọn ảnh có độ phủ mây <20%, ảnh hưởng của hơi nước và khí quyển miền Trung mùa kiệt vẫn gây sai số nhất định đến giá trị phản xạ phổ. Việc áp dụng công thức hồi quy tuyến tính cố định dựa trên tỷ số kênh B3/B2 có thể chưa phản ánh hết sự thay đổi sinh học phức tạp của các loài thực vật phù du theo nhiệt độ và độ đục

của nước qua các tháng. Việc kiểm soát chính xác tải lượng ô nhiễm từ nguồn diện (nông nghiệp, dân cư) đổ vào hệ thống sông trong mùa kiệt còn nhiều giả định, dẫn đến sai số mô phỏng tại một số trạm.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã thử nghiệm khả năng tích hợp dữ liệu Chl-a được ước tính từ ảnh Sentinel-2 vào mô hình chất lượng nước kế thừa cho hệ thống sông Thạch Hãn. Kết quả kiểm chứng cho thấy dữ liệu Chl-a từ Sentinel-2 có mức độ phù hợp với số liệu thực đo, cho phép sử dụng như một nguồn thông tin bổ sung cho mô hình trong điều kiện nghiên cứu hiện tại. Việc bổ sung Chl-a vào Kịch bản 2 làm thay đổi kết quả mô phỏng chất lượng nước, trong đó TN có sự cải thiện rõ rệt về mức độ phù hợp với số liệu thực đo, thể hiện qua sự giảm đáng kể của RMSE và MAE và sự gia tăng của R^2. Đối với TP, kết quả chưa cho thấy sự cải thiện đồng nhất theo các chỉ tiêu đánh giá, do đó cần tiếp tục kiểm chứng với số liệu quan trắc đầy đủ hơn.

Nhìn chung, kết quả bước đầu cho thấy việc bổ sung thông tin Chl-a từ viễn thám có tiềm năng làm cho mô phỏng chất lượng nước đầy đủ hơn về mặt sinh học, đồng thời mở ra khả năng kết hợp dữ liệu viễn thám với mô hình chất lượng nước để hỗ trợ giám sát trạng thái và xu thế chất lượng nước theo không gian. Khi được cập nhật định kỳ, các kết quả mô phỏng có thể được thể hiện trên WebGIS, cung cấp thông tin phục vụ giám sát và hỗ trợ ra quyết định quản lý tài nguyên nước. Tuy nhiên, đây mới là nghiên cứu thử nghiệm ban đầu; việc xây dựng công thức Chl-a chuyên biệt cho hệ thống sông Thạch Hãn, mở rộng chuỗi số liệu Sentinel-2 và quan trắc thực địa, cũng như đánh giá sâu hơn ảnh hưởng của Chl-a đến TN và TP cần được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] M. Rode, U. Suhr, G. Wriedt (2007a), "Multi-objective calibration of a river water quality model - Information content of calibration data", *Ecological Modelling*, **204(1-2)**, pp.129-142, DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.12.037.

[2] M. Rode, U. Suhr (2007b), "Uncertainties in selected river water quality data", *Hydrology and Earth System Sciences*, **11(2)**, pp.863-874, DOI: 10.5194/hess-11-863-2007.

[3] M.G. Bennett, S.S. Lee, K.A. Schofield, et al. (2021), "Response of chlorophyll a to total nitrogen and total phosphorus concentrations in lotic ecosystems:

A systematic review", *Environmental Evidence*, **10(1)**, DOI: 10.1186/s13750-021-00238-8.

[4] J. Llodrà-Llabrés, J. Martínez-López, T. Postma, et al. (2023), "Retrieving water chlorophyll-a concentration in inland waters from Sentinel-2 imagery: Review of operability, performance and ways forward", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **125**, DOI: 10.1016/j.jag.2023.103605.

[5] E. Choe, J.W. Lee, S.U. Cheon (2015), "Monitoring and modelling of chlorophyll-a concentrations in rivers using a high-resolution satellite image: A case study in the Nakdong river, Korea", *International Journal of Remote Sensing*, **36(6)**, pp.1645-1660, DOI: 10.1080/01431161.2014.995270.

[6] D.T. Ngo, K.Q. Nguyen, H.D. Nguyen, et al. (2024), "The application of Sentinel-2 satellite imagery to construct a model to estimate the concentration of Chlorophyll-a in surface water in the Hinh River basin, Vietnam", *Modeling Earth Systems and Environment*, **10(4)**, pp.5813-5829, DOI: 10.1007/s40808-024-02102-3.

[7] R. Shi, H. Zhang, R. Yue, et al. (2017), "A wavelet theory based remote sensing inversion of chlorophyll a concentrations for inland lakes in arid areas using TM image data", *Acta Ecologica Sinica*, **37(3)**, pp.1043-1053, DOI: 10.5846/stxb201508251766 (in Chinese).

[8] C.X. Huy, P.V. Chung, D.T.P. Thao, et al. (2022), "Using VNREDSat-1 satellite imagery to determine the distribution of chlorophyll-a concentration in the lagoon and Thuan An estuary area, Thua Thien Hue province", *Journal of Science on Natural Resources and Environment*, **44**, pp.121-128 (in Vietnamese).

[9] D.T. Loi, V.T.K. Anh, N.V. Manh (2024), "Application of remote sensing and GIS to identify chlorophyll-a in the West Lake area - Hanoi city", *HNUE Journal of Science: Social Sciences*, **69(2)**, pp.113-121, DOI: 10.18173/2354-1067.2024-0032 (in Vietnamese).

[10] N.B. Chang, Z. Xuan, Y.J. Yang (2013), "Exploring spatiotemporal patterns of phosphorus concentrations in a coastal bay with MODIS images and machine learning models", *Remote Sensing of Environment*, **134**, pp.100-110, DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.002.

[11] N.T.P. Thao, P.K. Loan, N.T.T. Ha, et al. (2025), "Assessment of eutrophication in Yen So lake using Sentinel-2 images and Co-kriging*", Journal of*

Mining and Earth Sciences, **66(5)**, pp.52-62, DOI: 10.46326/JMES.2025.66(5).05 (in Vietnamese).

[12] F. Ni, G. Liu, J. Ye, et al. (2009), "ArcGIS-based rural drinking water quality health risk assessment", *Journal of Water Resource and Protection*, **1(5)**, pp.351-361, DOI: 10.4236/jwarp.2009.15042.

[13] L. Jin, Y.W. Li, Q.G. Li (2014), "Research on the water safety early warning for rural safe drinking water projects in Qingdao", *Applied Mechanics and Materials*, **668-669**, pp.1513-1516, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.668-669.1513.

[14] Susquehanna River Basin Commission (2015), *2013-2014 Large River Assessment Project*, Publication No. 302, Susquehanna River Basin Commission, https://www.srbc.gov/our-work/reports-library/technical-reports/302-large-river-assessment/docs/large-river-assessment.pdf, accessed 24 April 2026.

[15] N.D. Tuan (2008), *Research on Building an Automatic Monitoring System for Wastewater Quality in Export Processing Zones and Industrial Parks in Ho Chi Minh City*, 180pp (in Vietnamese).

[16] Institute of Marine Environment and Resources (2024), *Research on Developing an Automatic Monitoring and Early Warning System for Water Quality of The Gia, Re and Da Do Rivers to Supply Domestic Water for Hai Phong City*, Independent National-Level Science and Technology Project, Code: ĐTĐL.CN-18/21 (in Vietnamese).

[17] Quang Tri Department of Agriculture and Environment (2025), *Summary Report on Natural Resources and Environment Monitoring Results of Quang Tri Province (Former) in 2025*, 166pp (in Vietnamese).