

MÔ PHỎNG TÍNH TOÁN VẬN CHUYỂN TRẦM TÍCH KHU VỰC LUỒNG HẢI PHÒNG VÀ LÂN CẬN SIMULATION OF SEDIMENT TRANSPORT PROCESSES IN THE HAIPHONG CHANNEL AND ADJACENT COASTAL AREAS

NGUYỄN XUÂN LONG*, ĐỖ VĂN CƯỜNG

Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: nguyenxuanlong@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.2025.i84.869>

Tóm tắt

Luồng hàng hải Hải Phòng giữ vai trò then chốt trong phát triển kinh tế biển và kết nối giao thương quốc tế tại khu vực miền Bắc. Tuy nhiên, hiện tượng bồi lắng trầm tích diễn ra thường xuyên đã và đang làm suy giảm độ sâu luồng, ảnh hưởng đến an toàn hàng hải và hiệu quả hoạt động cảng biển. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm xây dựng mô hình mô phỏng quá trình vận chuyển trầm tích, phục vụ quản lý duy tu luồng tàu và định hướng quy hoạch phát triển hạ tầng hàng hải một cách bền vững. Cách tiếp cận của nghiên cứu gồm hai bước: (1) thu thập, phân tích và tích hợp các dữ liệu đầu vào như địa hình đáy biển, đặc trưng thủy triều - dòng chảy, tính chất trầm tích và điều kiện khí tượng - hải văn; (2) thiết lập mô hình số sử dụng phần mềm MIKE 21/3 Coupled Model FM nhằm mô phỏng chi tiết trường dòng chảy và vận chuyển bùn cát trong không gian - thời gian. Mô hình được hiệu chỉnh và kiểm chứng bằng dữ liệu thực đo để nâng cao độ chính xác của kết quả. Kết quả mô phỏng cho thấy các khu vực có xu hướng bồi lắng mạnh bao gồm cửa Nam Trieu, khu vực cảng Lạch Huyện và vùng hạ lưu sông Cẩm. Những phát hiện này cung cấp cơ sở khoa học hữu ích cho việc đề xuất các giải pháp nạo vét định kỳ và kiểm soát tác động môi trường do bồi tụ trầm tích tại khu vực nghiên cứu.

Từ khóa: Vận chuyển trầm tích, an toàn hàng hải, bảo vệ môi trường.

Abstract

The Hai Phong channel plays a pivotal role in the development of the maritime economy and international trade connectivity in Northern Vietnam. However, frequent sediment deposition has been reducing channel depth, thereby affecting maritime safety and the operational efficiency of seaports. This study aims to develop

a simulation model of sediment transport to support the maintenance of the navigation channel and provide a scientific basis for sustainable maritime infrastructure planning. The research approach consists of two main steps: (1) collecting, analyzing, and integrating input data such as seabed topography, tidal and current characteristics, sediment properties, and hydro-meteorological conditions; and (2) constructing a numerical model using the MIKE 21/3 Coupled Model FM software to simulate detailed flow fields and sediment transport dynamics in both space and time. The model was calibrated and validated using observation data to enhance result accuracy. Simulation results reveal that key sediment deposition zones include the Nam Trieu estuary, the approach area to Lach Huyen Port, and the downstream section of the Cam River. These findings provide valuable scientific insights for proposing periodic dredging strategies and mitigating the environmental impacts of sediment accumulation in the study area.

Keywords: Sediment transport, maritime safety, environment protection.

1. Đặt vấn đề

Hải Phòng hiện là một trong những trung tâm kinh tế biển trọng yếu của Việt Nam, sở hữu mạng lưới gồm 52 cảng biển, đóng vai trò quan trọng trong chuỗi giao thương nội địa và quốc tế [1]. Trong số đó, luồng hàng hải kênh Hà Nam dù đã được nạo vét đạt độ sâu thiết kế -8,5m vẫn chỉ cho phép khai thác một chiều do nhiều đoạn chưa đảm bảo đồng đều về độ sâu. Hiện tượng bồi tụ trầm tích xảy ra thường xuyên tại đây gây ảnh hưởng đến hiệu quả khai thác, gia tăng chi phí duy tu và tiềm ẩn rủi ro mất an toàn trong vận hành tàu thuyền. Các bến số 3 và 4 của cảng Lạch Huyện chính thức đưa vào hoạt động trong quý I/2025, cùng với tiến độ hoàn thành giai đoạn 1 của bến số 5 và 6, đã

làm thay đổi điều kiện thủy động lực và đặc điểm phân bố chất lơ lửng trong khu vực, chịu tác động đồng thời từ dòng triều, nguồn nước cửa sông và hoạt động đổ bùn nạo vét.

Trước đó, một số nghiên cứu đã tiếp cận hiện tượng vận chuyển trầm tích tại vùng biển Hải Phòng - Hạ Long. Ví dụ, công trình của Vũ Duy Vĩnh [2] và Phạm Hải An [3] đã sử dụng các mô hình Delft3D và ECOMSED để mô phỏng động lực trầm tích lơ lửng tại khu vực Đồ Sơn và cửa sông ven bờ. Ngoài ra, một số nghiên cứu khác tập trung vào ảnh hưởng của việc khai thác vật liệu đáy biển hoặc đánh giá sự biến động địa hình tại các khu vực như cảng cá Trân Châu, cửa sông Nam Triệu và sông Cẩm [4-6].

Tuy nhiên, hầu hết các công trình trước đó vẫn còn hạn chế về mặt không gian mô phỏng, chưa bao phủ các khu vực trọng điểm như tuyến Kênh Hà Nam hay khu vực cảng Lạch Huyện. Đồng thời, việc tích hợp dữ liệu đo đạc thực tế về thủy triều, dòng chảy và đặc tính trầm tích theo mùa vẫn chưa được khai thác đầy đủ. Đặc biệt, số lượng nghiên cứu áp dụng mô hình số có độ phân giải cao nhằm phục vụ công tác quy hoạch và vận hành duy tu luồng một cách hiệu quả còn rất ít.

Xuất phát từ những tồn tại nêu trên, nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu xây dựng một mô hình số có khả năng mô phỏng chi tiết quá trình vận chuyển trầm tích tại khu vực Kênh Hà Nam và các bến cảng Lạch Huyện. Mô hình được phát triển trên cơ sở kết hợp dữ liệu đo đạc hiện trường với các điều kiện động lực điển hình nhằm phân tích quy luật bồi lắng - vận chuyển trầm tích. Qua đó, nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học hỗ trợ ra quyết định trong công tác quản lý luồng hàng hải tại một trong những khu vực có tần suất vận tải biển cao nhất cả nước.

2. Tài liệu và phương pháp thực hiện mô phỏng

2.1. Tài liệu

Dữ liệu địa hình phục vụ nghiên cứu khu vực cảng Hải Phòng và vùng lân cận được thu thập từ nhiều nguồn khác nhau. Trong đó, bản đồ và hải đồ tỷ lệ 1:5000 được thực hiện khảo sát vào năm 2009, là một phần của Báo cáo thiết kế kỹ thuật chi tiết cho dự án xây dựng hạ tầng cảng Lạch Huyện được hoàn thiện vào năm 2013 [7]. Đồng thời dữ liệu địa hình có bổ sung các dữ liệu về độ sâu đáy luồng và khu vực lân cận cảng theo số liệu đến năm 2025 trong đó có bao gồm có dữ liệu địa hình của đê chắn sóng cảng Lạch Huyện, sơ đồ cảng Lạch Huyện qua Google Earth. Ngoài ra, các thông tin khí tượng, thủy văn cùng số liệu thực đo liên quan đến vận chuyển bùn cát và trầm tích cũng được khai thác từ báo cáo nói trên. Bên cạnh

đó, dữ liệu độ sâu đáy biển được lấy từ nguồn GEBCO - một cơ sở dữ liệu toàn cầu công khai có tính đồng bộ và độ tin cậy cao, đã được nhiều tổ chức quốc tế kiểm chứng và sử dụng trong nghiên cứu khoa học biển. Cơ sở dữ liệu GEBCO được sử dụng trong nghiên cứu này chủ yếu để bổ sung cho các khu vực ven bờ xa và vùng biển ngoài khơi, nơi không có số liệu khảo sát chi tiết. Các dữ liệu này làm nền tham chiếu sơ bộ cho toàn bộ mô hình trước khi chèn lưới chi tiết cho khu vực luồng tàu và cảng.



Hình 1. Địa hình khu vực nghiên cứu

Thông tin về gió được thu thập từ trạm quan trắc Hòn Dấu và cập nhật đến năm 2023. Mực nước và chế độ thủy triều được tổng hợp từ các tài liệu chuyên ngành, với giá trị trung bình nhiều năm nhằm đảm bảo tính đại diện. Các thông số khí tượng khác được trích xuất từ cơ sở dữ liệu tái phân tích toàn cầu ERA5 do Trung tâm Dự báo Thời tiết Trung hạn Châu Âu (ECMWF) cung cấp, sau đó xử lý trung bình và nội suy tuyến tính theo thời gian để đồng bộ với lưới tính toán. Biên sông được thiết lập dựa trên số liệu mực nước đo tại các trạm Cửa Cấm và Do Nghi, đây là hai cửa sông chính chảy vào và cung cấp lượng trầm tích bồi lắng cho khu vực luồng Hà Nam và cảng Lạch Huyện. Trong khi đó, điều kiện biên biển và khu vực vịnh Hạ Long, nơi có ảnh hưởng trực tiếp đến chế độ thủy triều - dòng chảy ven bờ và kết nối với khu vực tính toán, đồng thời được xác định thông qua kết quả mô phỏng từ mô hình MIKE.

2.2. Phương pháp

a) Nguyên lý tính toán của Mô-đun thủy lực (HD)

Mô-đun HD giải hệ phương trình Navier-Stokes nông (shallow water equations), dưới dạng trung bình theo chiều sâu (2D) hoặc chia lớp theo chiều đứng (3D) [8].

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Trong đó: h là chiều sâu cột nước (m); u, v là vận tốc dòng chảy theo phương x, y (m/s).

Phương trình động lượng theo phương x, y :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \nu_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{c_f u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} + f_x + S_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \nu_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{c_f v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} + f_y + S_y \quad (3)$$

Trong đó: η là mực nước biển (m); g là gia tốc trọng trường (m/s^2); d là độ sâu đáy biển; ν_h là hệ số khuếch tán động học (m^2/s); c_f là hệ số ma sát đáy; f là tham số Coriolis (1/s); S_x, S_y là thành phần ngoại lực theo phương x, y (m/s^2); t là thời gian (s).

b) Nguyên lý tính toán của Mô-đun vận chuyển bùn (MT)

Mô hình giải phương trình vận chuyển trầm tích dạng đối lưu - khuếch tán [9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C = \nabla \cdot (\varepsilon \nabla C) + \frac{E - D}{h} \quad (4)$$

Với, C là nồng độ trầm tích lơ lửng ($SSC, kg/m^3$); u là vận tốc dòng chảy (m/s); ε là hệ số khuếch tán; E là tốc độ xoáy ($kg/m^2/s$); D là tốc độ lắng ($kg/m^2/s$).

c) Nguyên lý tính toán của Mô-đun vận chuyển cát (ST)

Phương trình vận chuyển trầm tích (dạng tổng quát):

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \nabla \cdot q_s = 0 \quad (5)$$

Trong đó, z_b cao độ đáy biển (m); p độ rỗng lớp đáy (porosity); q_s vector tải lượng trầm tích (gồm tải lượng lơ lửng và tải lượng đáy).

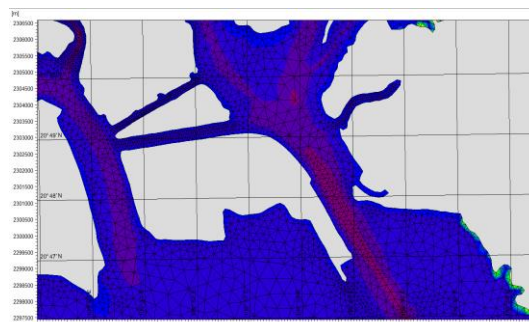
3. Kết quả

3.1. Kết quả mô phỏng thủy lực

Để tạo lưới phục vụ tính toán thủy động lực, tác giả sử dụng mô-đun MIKE Zero [10] trong bộ công cụ phần mềm MIKE. Phần lưới tính là lưới tam giác phi cấu trúc được chia chi tiết hơn tại các khu vực ven bờ, kênh Hà Nam, đê chắn sóng.

Khu vực mô phỏng luồng Hải Phòng và lân cận có kinh độ giới hạn là $106^{\circ}48' E$ và $106^{\circ}58' E$, vĩ độ giới hạn là $20^{\circ}46' N$ và $20^{\circ}51' N$ trong hệ thống trắc đạc UTM-48 được minh họa trong Hình 2. Lưới tính toán là lưới tam giác phi cấu trúc, trong đó khu vực ven bờ và các âu chắn sóng là khu vực có mức độ bồi lấp sa bồi nhanh hơn nên sẽ được tạo lưới chi tiết hơn với diện tích tối đa của mỗi ô là $1.5 km^2$. Vùng nghiên cứu

bao gồm 14522 nút và 24851 phần tử, trong đó góc nhỏ nhất cho phép là 32° , thời gian mô phỏng vào mùa khô từ 03/01/2022 đến 20/01/2022 (17 ngày) và mùa mưa từ 04/7/2022 đến 21/7/2022 (17 ngày) nhằm đại diện cho điều kiện thủy văn điển hình, đồng thời đảm bảo mô hình hội tụ ổn định và tiết kiệm tài nguyên tính toán. Khoảng thời gian giữa các bước là 600 giây để vừa đảm bảo độ chi tiết của mô hình mô phỏng, và không làm chậm tốc độ tính toán của cấu hình máy tính (Bảng 1).



Hình 2. Lưới tính toán khu vực nghiên cứu

Bảng 1. Thông số tính toán đầu vào của mô hình

Thông số	Giá trị
Lưới và mực nước	14522 nút, 24851 phần tử
Thời gian mô phỏng	Mùa khô: 03/01/2022 00:00 - 20/01/2022 08:40 (17 ngày) Mùa mưa: 04/07/2022 00:00 - 21/07/2022 08:40 (17 ngày)
Khoảng thời gian giữa các bước	600 giây
Bước thời gian	2500
Độ hội tụ	Số CFL = 0.85
Độ nhớt rối	Công thức Smagorinsky, Constant 0.28 m^2/s
HD: Lực cản	Số Manning

Kết quả mô phỏng mực nước thời kỳ mùa mưa và mùa khô như trong Hình 3 và 4. Để kiểm chứng độ chính xác, tác giả so sánh với mực nước quan trắc tại trạm Hòn Dấu cho thấy tỉ lệ tương đồng cao về pha và biên độ, thể hiện độ tin cậy của mô hình thủy động lực làm đầu vào cho mô hình vận chuyển trầm tích (Hình 5 và 6). Trong Bảng 1, các tham số được mặc định như hệ số ma sát đáy được biểu diễn bằng hệ số Manning, độ nhớt rối kế thừa từ mô hình Smagorinsky, có giá trị là $0,28 m^2/s$. Ngoài ra, tác giả đã thực hiện hiệu chỉnh các tham số như lực Coriolis biến đổi theo điều kiện địa hình, thể hiện tính địa phương của khu vực được mô phỏng và độ hội tụ $CFL=0,85$ dựa trên kinh nghiệm và thực tiễn sử dụng mô hình MIKE.

3.2. Kết quả mô phỏng vận chuyển trầm tích

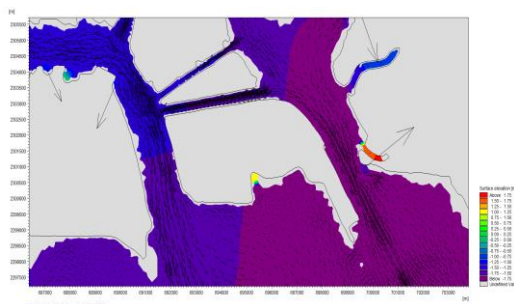
Quá trình vận chuyển trầm tích trong điều kiện mùa khô được thể hiện qua Hình 7 và 8. Cụ thể, tại thời điểm ngày 07 tháng 01 năm 2022, phân bố nồng độ bùn lơ lửng (Suspended Sediment Concentration - SSC) dao động trong khoảng từ 0 đến 0,08 kg/m³ (Hình 7), phản ánh mức độ bồi lắng tương đối thấp do động lực dòng chảy và lượng trầm tích đầu vào hạn chế trong mùa này. Song song đó, Hình 8 mô phỏng phân bố cát lơ lửng vào ngày 06 tháng 01 năm 2022 cho thấy giá trị SSC nằm trong khoảng từ 0 đến 0,8 kg/m³, chủ yếu tập trung tại các khu vực bị khuấy động bởi triều hoặc hoạt động tàu thuyền.

Ngược lại, trong điều kiện mùa mưa, Hình 9 và 10 cho thấy mức độ vận chuyển trầm tích cao hơn rõ rệt. Tại thời điểm ngày 16 tháng 07 năm 2022, nồng độ bùn lơ lửng được ghi nhận trong khoảng 0,08 đến 0,16 kg/m³ (Hình 9), phản ánh tác động mạnh mẽ của lưu

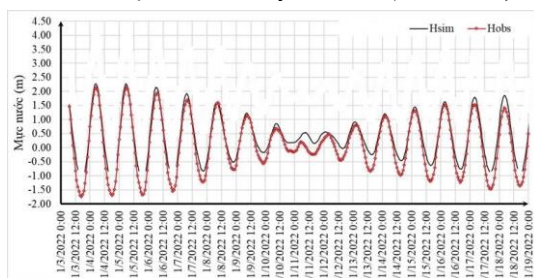
lượng nước sông và lượng mưa gia tăng trong giai đoạn này. Trong khi đó, mô phỏng vào ngày 04 tháng 07 năm 2022 cho thấy nồng độ cát lơ lửng đạt từ 0,8 đến 1,2 kg/m³ (Hình 10), cho thấy mức vận chuyển cao do sự kết hợp giữa dòng chảy sông, sóng và hoạt động thủy văn mùa mưa.

4. Thảo luận

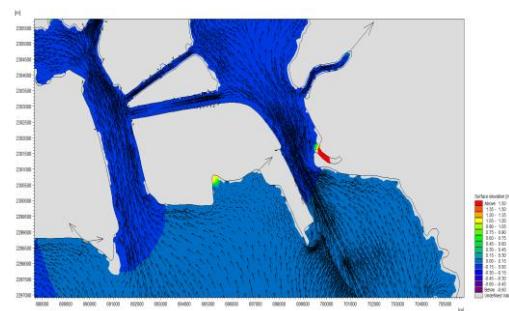
Vào mùa khô, lưu lượng nước từ sông đổ ra giảm rõ rệt, dẫn đến việc vận chuyển trầm tích diễn ra chủ yếu theo chiều ngang, dọc theo tuyến luồng chính. Do thiếu lực đẩy mạnh từ thượng nguồn, các hạt bùn cát dễ lắng đọng tại những vị trí có địa hình bất lợi như khúc cua, vùng nước tĩnh hay các hố sâu trong lòng luồng. Tại các khu vực có vận tốc dòng nhỏ - như vùng quay tàu hoặc gần cửa sông - thường xảy ra tình trạng bồi tích cục bộ. Trong điều kiện dòng chảy yếu, quá trình lắng diễn ra chủ động hơn, khiến lượng bùn mịn và hạt sét dễ dàng tích tụ ở đáy. Hầu hết trầm tích lơ



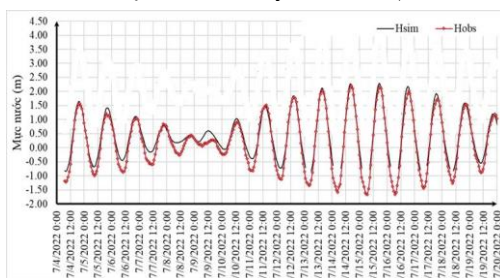
Hình 3. Mực nước thời kỳ mùa khô (03/01/2022)



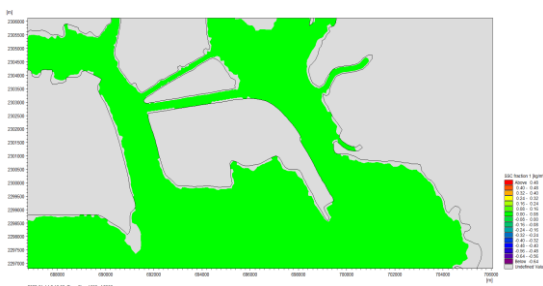
Hình 5. So sánh mực nước thực đo (Hobs) và mô phỏng (Hsim) tại trạm Hòn Dấu giai đoạn từ 03/01/2022 đến 19/01/2022



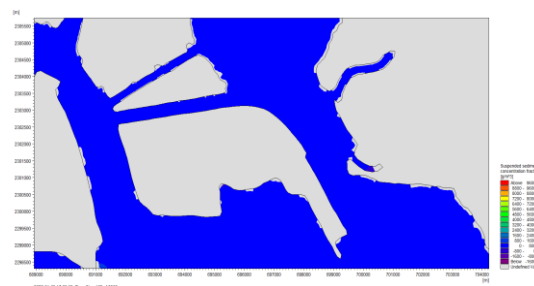
Hình 4. Mực nước thời kỳ mùa mưa (05/07/2022)



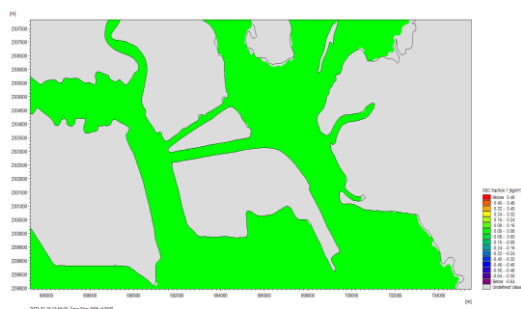
Hình 6. So sánh mực nước thực đo (Hobs) và mô phỏng (Hsim) tại trạm Hòn Dấu giai đoạn từ 04/07/2022 đến 20/07/2022



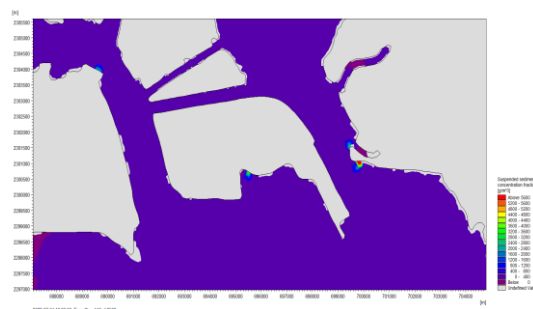
Hình 7. Hàm lượng SSC bùn (mùa khô)



Hình 8. Hàm lượng SSC cát (mùa khô)



Hình 9. Hàm lượng SSC bùn (mùa mưa)



Hình 10. Hàm lượng SSC cát (mùa mưa)

lững trong mùa này có nguồn gốc từ tái huy động đáy do hoạt động hàng hải, xói lở bờ biển và một phần nhỏ từ triều - sóng. Với khu vực cảng Lạch Huyện, dù không xuất hiện bồi lắng diện rộng trong mùa khô, vẫn ghi nhận các điểm tích tụ tại những nơi có điều kiện thủy động lực không thuận lợi.

Ngược lại, vào thời điểm mùa mưa, lượng nước chảy từ thượng lưu tăng mạnh kéo theo một khối lượng lớn trầm tích mịn, chủ yếu do rửa trôi và sạt lở đất. Dưới ảnh hưởng của dòng sông lớn và lượng mưa cao, vật liệu này có xu hướng vận chuyển hướng ra biển dọc theo luồng chính. Đồng thời, sự tác động của sóng và dòng ven khiến trầm tích lan tỏa ra các khu vực xung quanh như Đình Vũ và Nam Triệu. Điều này dẫn đến phạm vi bồi lắng mở rộng, không chỉ giới hạn trong vùng quay mà còn ảnh hưởng đến toàn tuyến luồng vào cảng. Nếu thiếu kế hoạch nạo vét chủ động, hiện tượng suy giảm độ sâu luồng có thể diễn ra nhanh chóng, cản trở việc tiếp nhận tàu lớn tại khu vực cảng nước sâu.

5. Kết luận

Bằng cách ứng dụng bộ công cụ MIKE 21/3 Coupled FM, nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình số mô phỏng quá trình vận chuyển trầm tích tại khu vực luồng Hải Phòng và các vùng lân cận. Mô hình cho phép tái hiện các đặc trưng dòng chảy và phân bố trầm tích trong cả hai mùa mưa - khô đảm bảo độ tin cậy, đồng thời làm rõ tác động của điều kiện thủy động lực lên hiện tượng bồi lắng cục bộ tại các khu vực trọng điểm.

Kết quả thu được cho thấy: Vào mùa mưa, do lưu lượng sông lớn và điều kiện thủy văn phức tạp, trầm tích được chuyển tải mạnh từ sông ra biển, gây tích tụ tại các khu vực có vận tốc dòng thấp như vùng quay và cửa Nam Triệu. Trong mùa khô, dù tổng lượng trầm tích vận chuyển nhỏ hơn, vẫn xuất hiện hiện tượng lắng đọng tại những khu vực bị ảnh hưởng bởi sóng triều hoặc hoạt động tàu thuyền.

Cách tiếp cận mô phỏng vật lý cho phép đánh giá khách quan sự thay đổi địa hình đáy và mức độ bồi tụ theo thời gian. Tuy nhiên, độ tin cậy của kết quả phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu đầu vào (sóng, gió, đặc tính vật liệu đáy), cũng như năng lực xử lý của hệ thống mô hình hóa. Đồng thời nghiên cứu cũng bị hạn chế bởi dữ liệu thu thập và thực hiện mô phỏng năm 2022.

Trong tương lai, nhóm nghiên cứu định hướng nâng cấp mô hình theo hướng tích hợp dữ liệu đo thời gian thực đối với số liệu quan trắc, địa hình đáy và nồng độ trầm tích lơ lửng (SSC) và tối ưu hóa hiệu năng tính toán. Ngoài ra, sử dụng mô hình đã hiệu chỉnh để mô phỏng các kịch bản kỹ thuật khác nhau (thay đổi hướng đồ bùn, bố trí đề dẫn dòng, tối ưu tần suất nạo vét), từ đó lựa chọn phương án hiệu quả nhất nhằm đáp ứng yêu cầu giám sát, dự báo bồi lắng phục vụ quản lý luồng tàu, bảo trì hạ tầng và bảo vệ môi trường ven biển một cách hiệu quả hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Quyết định số 318/QĐ-BXD ngày 26 tháng 03 năm 2025 về việc công bố danh mục bến cảng thuộc các cảng biển Việt Nam.
- [2] Vũ Duy Vĩnh (2012). *Nghiên cứu đặc điểm vận chuyển trầm tích lơ lửng vùng ven biển Hải Phòng bằng mô hình Delft3D*. Luận văn Thạc sĩ, Viện Tài nguyên và Môi trường Biển, Viện Hàn Lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.
- [3] Phạm Hải An (2010). *Triển khai ứng dụng mô hình ECOMSED tính toán vận chuyển trầm tích lơ lửng khu vực cửa sông ven biển Hải Phòng*. Luận văn Thạc sĩ, Đại học Quốc gia Hà Nội.
- [4] N. M. Hai, S. Ouillon, and V. D. Vinh (2021). *Seasonal variation of suspended sediment and its relationship with turbidity in Cam - Nam Trieu estuary, Hai Phong (Vietnam)*. Vietnam Journal of Marine Science and Technology, Vol.21, No.3, pp. 269-281.

- [5] L. T. Hai, M. V. Cong, and N. Q. D. Anh (2019). *Forecast of Sedimentation in Tran Chau Fishing Port, Hai Phong, Vietnam*. Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC 2019), Singapore: Springer, pp.571-578.
- [6] N. M. Hai, D. G. Khanh, V. D. Vinh, and T. D. Lan (2019). *Impact of sand mining on sediment transport and morphological change of Hai Phong coastal area*. Vietnam Journal of Marine Science and Technology, Vol.19, No.3B, pp.91-104.
- [7] Cơ quan Hợp tác Quốc tế Nhật Bản (JICA) và Công ty Tư vấn Kỹ thuật Cảng và Đường thủy (PEC) (2013). *Báo cáo nghiên cứu thiết kế chi tiết dự án xây dựng hạ tầng cảng Lạch Huyện*. Hải Phòng, Việt Nam.
- [8] DHI, *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module Scientific Documentation*. Hørsholm, Denmark: Danish Hydraulic Institute, 2014.
- [9] DHI, *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Sediment Transport Module Scientific Documentation*. Hørsholm, Denmark: Danish Hydraulic Institute, 2014.
- [10] DHI, *MIKE Zero, Mesh Generator, Step-by-step training guide*, Danish Hydraulic Institute, 2017.

Ngày nhận bài:	29/07/2025
Ngày nhận bản sửa lần 1:	19/08/2025
Ngày nhận bản sửa lần 2:	04/09/2025
Ngày duyệt đăng:	04/09/2025