

# NGHIÊN CỨU TÍCH HỢP HỆ SINH THÁI DỮ LIỆU S-100 VÀO HỆ THỐNG GIÁM SÁT VÀ ĐIỀU PHỐI GIAO THÔNG HÀNG HẢI Ở VIỆT NAM

## RESEARCH ON INTEGRATING THE S-100 DATA ECOSYSTEM INTO VESSEL TRAFFIC SERVICE SYSTEMS IN VIETNAM

NGUYỄN XUÂN LONG, NGUYỄN MẠNH CƯỜNG, PHAN VĂN HƯNG\*

Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: phanvanhung@vamaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.942>

### Tóm tắt

Nghiên cứu này giải quyết thách thức trong việc chuyển đổi hạ tầng dữ liệu của hệ thống giám sát và điều phối giao thông hàng hải (VTS) tại Việt Nam từ tiêu chuẩn S-57 sang hệ sinh thái S-100 theo lộ trình của IHO. Bằng phương pháp mô phỏng số dựa trên dữ liệu thủy văn thực tế tại khu vực Cái Mép - Thị Vải, bài báo đề xuất mô hình tích hợp dữ liệu đa lớp (bao gồm S-101, S-102, S-104, S-111) để tính toán dự trừ chân hoa tiêu động theo thời gian thực.

Kết quả thực nghiệm cho thấy, so với mô hình VTS truyền thống, mô hình tích hợp S-100 giúp giảm sai số dự phòng độ sâu xuống 83%, cho phép tăng mớn nước khả dụng thêm 0,5m và mở rộng cửa sổ thời gian khai thác luồng thêm 29% trong một chu kỳ triều. Nghiên cứu cũng chỉ ra các rào cản kỹ thuật về hạ tầng không đồng nhất và đề xuất giải pháp vận hành nhiên liệu kép để đảm bảo an toàn hàng hải trong giai đoạn quá độ.

**Từ khóa:** S-100, VTS, An toàn hàng hải, e-Navigation, Dữ liệu thủy đạc, Cảng biển Việt Nam.

### Abstract

This study addresses the challenge of transitioning the data infrastructure of Vietnam's Vessel Traffic Service (VTS) system from the S-57 standard to the S-100 ecosystem, following the IHO roadmap. Using a numerical simulation method based on actual hydrographic data in the Cai Mep - Thi Vai area, the paper proposes a multi-layer data integration model (including S-101, S-102, S-104, S-111) to calculate real-time dynamic under-keel clearance.

Experimental results show that, compared to the traditional VTS model, the integrated S-100 model helps reduce the depth contingency error by 83%, allowing the available draft to be increased by 0.5m and extending the channel operational

time window by 29% within one tidal cycle. The study also points out technical barriers regarding heterogeneous infrastructure and proposes a dual operation solution to ensure maritime safety during the transition phase.

**Keywords:** S-100, VTS, Maritime safety, e-Navigation, Hydrographic data, Vietnamese ports.

### 1. Mở đầu

Đến nay, Việt Nam vẫn đang vận hành Hệ thống Giám sát và Điều phối Giao thông Hàng hải (VTS) trên nền tảng hải đồ điện tử (ENC) tiêu chuẩn S-57. Tuy nhiên, trước xu thế phát triển e-Navigation, container hóa và gia tăng kích cỡ tàu biển, tiêu chuẩn dữ liệu tĩnh S-57 đã bộc lộ nhiều hạn chế như phản ánh thông tin môi trường hàng hải không theo thời gian thực. Do đó, Tổ chức Thủy đạc Quốc tế (IHO) đã ban hành một lộ trình áp dụng hệ sinh thái chuẩn S-100, là nền móng quan trọng mở ra kỷ nguyên mới về dữ liệu địa không gian biển đa chiều theo thời gian thực. Vấn đề cấp thiết đặt ra hiện nay là xây dựng một mô hình tích hợp dữ liệu S-100 vào cơ sở hạ tầng VTS hiện có ở Việt Nam nhằm tận dụng cơ sở vật chất để tối ưu hóa hiệu quả bảo đảm an toàn và tăng khả năng khai thác đối với hệ thống cảng biển [1], [2], [3], [4].

### 2. Cơ sở lý thuyết về S-100 trong VTS

#### 2.1 Sự chuyển dịch từ tiêu chuẩn S-57 sang hệ sinh thái dữ liệu S-100

Trong hơn 20 năm qua, tiêu chuẩn S-57 (Tiêu chuẩn chuyển giao dữ liệu thủy văn kỹ thuật số của IHO) phiên bản 3.1 đã là tiêu chuẩn mà các nền tảng bản đồ điện tử (ENC) và hệ thống ECDIS trên toàn thế giới sử dụng. Tuy nhiên, trong kỷ nguyên của Cách mạng Công nghiệp lần thứ tư và định vị điện tử, cấu trúc cơ bản của S-57 được cho là có những hạn chế, khiến việc thay thế hoàn toàn bằng một tiêu chuẩn mới có tên là Mô hình dữ liệu thủy văn toàn cầu (S-100) trở nên cần thiết. Sự chuyển đổi này không chỉ đơn thuần là cập nhật phần mềm mà còn là sự thay đổi tư duy quản lý dữ liệu từ tĩnh sang động, từ biệt lập sang hệ sinh thái [1].

Hạn chế cốt lõi của S-57 và nhu cầu thay thế: Tiêu chuẩn S-57 được thiết kế chủ yếu cho mục đích dẫn đường trên ECDIS với cấu trúc dữ liệu vector đóng băng (frozen). Hạn chế lớn nhất của S-57 là sự cứng nhắc trong Danh mục đối tượng (Object Catalogue). Việc bổ sung một đối tượng mới (ví dụ: một loại phao báo hiệu mới hoặc vùng biển hạn chế mới) đòi hỏi phải cập nhật toàn bộ tiêu chuẩn và phần mềm lõi của hệ thống hiển thị, một quy trình có thể kéo dài nhiều năm. Hơn nữa, S-57 chỉ hỗ trợ tốt dữ liệu vector 2D, hoàn toàn bất lực trong việc tích hợp dữ liệu lưới độ phân giải cao, dữ liệu 3D, hoặc các dữ liệu biến đổi theo thời gian thực như thủy triều và dòng chảy.

Kiến trúc linh hoạt của S-100 dựa trên ISO 19100. Ngược lại, S-100 được xây dựng dựa trên bộ tiêu chuẩn địa lý quốc tế ISO 19100, tạo ra một khung làm việc mở và linh hoạt. Đặc điểm kỹ thuật mang tính cách mạng của S-100 là sự tách biệt hoàn toàn giữa dữ liệu và cách hiển thị dữ liệu.

- Cơ chế thư viện đăng ký: S-100 sử dụng cơ chế IHO Geospatial Information Registry. Điều này cho phép định nghĩa các đối tượng mới một cách linh hoạt mà không làm phá vỡ cấu trúc hệ thống. Đối với VTS tại Việt Nam, điều này có nghĩa là chúng ta có thể định nghĩa các lớp dữ liệu đặc thù (như vùng nuôi trồng thủy sản ven biển, các khu vực nạo vét đặc biệt) mà không cần chờ IHO phê duyệt toàn cầu.

- Đa dạng định dạng mã hóa: Trong khi S-57 bị giới hạn ở định dạng ISO 8211 cũ kỹ, S-100 hỗ trợ nhiều định dạng mã hóa tiên tiến:

+ *ISO 8211*: Dùng cho dữ liệu vector (S-101 ENC).

+ *HDF5 (Hierarchical Data Format 5)*: Dùng cho dữ liệu lưới và mảng lớn (S-102 Bathymetry, S-111 Surface Currents). HDF5 cho phép truy xuất dữ liệu cực nhanh, điều kiện tiên quyết để hệ thống VTS có thể hiển thị mô hình đáy biển 3D thời gian thực mà không bị trễ (latency).

+ *GML (Geography Markup Language)*: Dùng cho việc trao đổi dữ liệu linh hoạt trên nền tảng web.

Từ S-57 ENC đến S-101 ENC và hơn thế nữa.

Sản phẩm kế thừa trực tiếp của S-57 ENC là S-101 ENC. S-101 khắc phục các điểm yếu của người tiền nhiệm bằng cách giới thiệu các tính năng máy đọc tốt hơn, tối ưu hóa quy trình cập nhật và cung cấp khả năng hiển thị thông minh hơn. Tuy nhiên, sức mạnh thực sự nằm ở khả năng tương tác.

Trong môi trường S-57, dữ liệu độ sâu chỉ là các điểm rời rạc hoặc đường đẳng sâu thưa thớt. Trong

môi trường S-100, lớp hải đồ nền (S-101) có thể chạy song song và chồng lớp hoàn hảo với lớp dữ liệu độ sâu chi tiết (S-102) và lớp mực nước (S-104).

Sự tích hợp này tạo ra khái niệm Sản dữ liệu hàng hải hợp nhất. Đối với các điều hành viên VTS tại các cảng biển phức tạp như Hải Phòng hay TP. Hồ Chí Minh, sự chuyển dịch này thay đổi hoàn toàn nhận thức tình huống. Thay vì nhìn vào một bản đồ phẳng với các con số độ sâu tĩnh, họ sẽ quan sát được mô hình địa hình đáy biển chi tiết đang thay đổi theo mực nước thực tế, cho phép đưa ra các quyết định điều phối chính xác đến từng centimet cho các tàu có mớn nước lớn.

Tóm lại, sự chuyển dịch sang S-100 là nền tảng kỹ thuật bắt buộc để hiện thực hóa e-Navigation [1], [5], [6], [7]. Nó chuyển đổi hệ thống VTS từ vai trò thụ động sang một trung tâm dữ liệu thông minh, có khả năng tích hợp đa nguồn dữ liệu để giải quyết bài toán an toàn hàng hải trong điều kiện mật độ giao thông và biến đổi khí hậu ngày càng phức tạp.

## 2.2. Vai trò của VTS trong kỷ nguyên số

Trong kỷ nguyên số hóa cách mạng Công nghiệp 4.0, vai trò của hệ thống VTS đang trải qua một sự thay đổi mô hình căn bản. Theo định hướng chiến lược e-Navigation của IMO, VTS không còn giới hạn ở chức năng quan sát thụ động và liên lạc thoại qua VHF, mà đang phát triển thành một trung tâm dữ liệu phức hợp, đóng vai trò cốt lõi trong chuỗi cung ứng logistics và an toàn hàng hải [8], [9].

- *Tự động hóa việc trao đổi thông tin*

Thách thức lớn nhất của các hệ thống VTS truyền thống tại Việt Nam hiện nay là sự quá tải thông tin và phụ thuộc quá nhiều vào giao tiếp thoại. Trong điều kiện thời tiết xấu hoặc mật độ tàu cao, việc trao đổi thông tin qua VHF dễ dẫn đến hiểu nhầm hoặc nhiễu sóng.

Trong kỷ nguyên số, VTS đóng vai trò là hạ tầng kết nối hạ tầng và kết nối tàu - bờ. Việc áp dụng hệ sinh thái S-100 cho phép VTS chuyển đổi các thông tin cảnh báo an toàn, điều tiết luồng lạch từ dạng văn bản/lời nói sang dữ liệu số [10]. Thay vì điều hành viên VTS phải gọi điện thông báo khu vực phao số 0 có độ sâu hạn chế, hệ thống sẽ tự động đóng gói và truyền phát thông tin vùng nguy hiểm dưới dạng một lớp phủ dữ liệu động (dynamic overlay) theo chuẩn S-124 hoặc S-104. Dữ liệu này được truyền qua các kênh liên lạc số (như AIS-ASM, VDES hoặc 4G Maritime) và tự động hiển thị chồng lớp lên nền hải đồ S-101 sẵn có trên ECDIS của tàu, giúp giảm thiểu tối đa yếu tố lỗi con người [11].

- *Triển khai danh mục dịch vụ hàng hải*

Theo hướng dẫn của IALA, VTS hiện đại là nền tảng chính để triển khai các danh mục dịch vụ hàng hải (MSPs). Trong bối cảnh Việt Nam, việc tích hợp S-100 vào VTS là điều kiện tiên quyết để thực hiện hiệu quả các dịch vụ sau:

**MSP 1 (VTS Information Service):** Cung cấp thông tin môi trường, khí tượng thủy văn thời gian thực với độ chính xác cao nhờ dữ liệu S-100, thay vì các bản tin dự báo chung chung.

**MSP 2 (Navigational Assistance Service):** Hỗ trợ dẫn đường chính xác. Với dữ liệu địa hình đáy biển chi tiết (S-102), VTS có thể hỗ trợ các siêu tàu (mega-ships) đi qua các đoạn luồng hẹp với biên độ an toàn cực nhỏ mà các phương pháp truyền thống không dám thực hiện.

**MSP 3 (Traffic Organization Service):** Tối ưu hóa luồng hàng. VTS số hóa có khả năng tính toán cửa sổ thời gian cho tàu ra vào dựa trên thủy triều thực tế, giúp giảm thời gian chờ đợi và tiết kiệm nhiên liệu cho chủ tàu.

- *Chuyển đổi từ phản ứng sang dự báo*

Giá trị lớn nhất của VTS trong kỷ nguyên số là khả năng nhận thức tình huống dự báo. Các hệ thống cũ chỉ hiển thị vị trí hiện tại của tàu. Hệ thống VTS tích hợp S-100, kết hợp với các thuật toán học máy, có khả năng mô phỏng kịch bản tương lai. Hệ thống có thể dự báo nguy cơ va chạm hoặc mắc cạn trước khi nó xảy ra 15-20 phút dựa trên vector chuyển động của tàu và dữ liệu dòng chảy bề mặt (S-111).

Tóm lại, trong kỷ nguyên số, VTS không chỉ là mắt thần giám sát biển khơi, mà là bộ não điều phối. Nó chuyển hóa dữ liệu thô từ môi trường biển (thông qua chuẩn S-100) thành thông tin thông minh hỗ trợ ra quyết định, đảm bảo sự cân bằng giữa hiệu quả khai thác cảng biển và an toàn hàng hải tuyệt đối.

**3. Phương pháp nghiên cứu và mô hình tích hợp**

**3.1. Mô hình đánh giá rủi ro tích hợp**

Nghiên cứu đề xuất mô hình định lượng rủi ro an toàn hàng hải ( $R$ ) trong vùng nước cảng biển dưới dạng hàm số của xác suất xảy ra sự cố ( $P$ ) và mức độ thiệt hại ( $C$ ):

$$R = P(E) \times C(E) \quad (1)$$

Trong môi trường VTS truyền thống (S-57), xác suất  $P(E)$  chịu ảnh hưởng lớn bởi biến số độ không đảm bảo của dữ liệu ( $\epsilon_{data}$ ). Khi tích hợp hệ sinh thái dữ liệu S-100, mục tiêu là cực tiểu hóa  $\epsilon_{data}$  để giảm  $P(E)$ .

Ta thiết lập công thức tính Dự trữ chân hoa tiêu động (Dynamic Under Keel Clearance -  $UKC_{dyn}$ ) làm tham số an toàn cốt lõi. Trong môi trường S-100,  $UKC_{dyn}$  được xác định chính xác theo thời gian thực ( $t$ ):

$$UKC_{dyn}(t) = [Z_{S102}(x, y) + h_{S104}(t)] - [T_{static} + \delta_{squat}(v) + \delta_{motion}] \quad (2)$$

Trong đó:

$Z_{S102}(x, y)$ : Độ sâu đáy biển tại vị trí  $(x, y)$  từ dữ liệu lưới phân giải cao S-102 (thay vì điểm độ sâu rời rạc S-57);

$h_{S104}(t)$ : Mực nước thời gian thực từ dữ liệu S-104;

$T_{static}$ : Mớn nước tĩnh của tàu;

$\delta_{squat}(v)$ : Độ sụt găm tàu do vận tốc  $v$ .

$\delta_{motion}$ : Ảnh hưởng của sóng và lắc ngang/dọc.

Hệ thống an toàn khi và chỉ khi  $UKC_{dyn}(t) \geq UKC_{min}$  (tiêu chuẩn an toàn quy định). S-100 cho phép giám sát bất đẳng thức này liên tục với độ tin cậy >95%.

**3.2. Kiến trúc tích hợp dữ liệu đa tầng**

Để xử lý khối lượng dữ liệu lớn từ S-100, nghiên cứu đề xuất kiến trúc hệ thống VTS gồm 03 lớp theo chuẩn mô hình e-Navigation (Hình 1):

**Lớp 1: Thu thập và Chuẩn hóa**

Nhóm dữ liệu nền: Tiếp nhận dữ liệu thủy đặc tính (S-101, S-102) từ Cơ sở dữ liệu quốc gia hoặc các Trung tâm phân phối hải đồ điện tử khu vực (RENC) để làm nền bản đồ cho hệ thống VTS.

Nhóm dữ liệu dịch vụ: Thu thập và xử lý thời gian thực luồng dữ liệu động (S-104, S-111, S-124) từ mạng lưới cảm biến IoT và trạm quan trắc khí tượng thủy văn tại khu vực quản lý của cảng vụ. Đây là nguồn dữ liệu tại chỗ mà trạm VTS đóng vai trò là máy chủ cung cấp dịch vụ cho tàu thuyền.

**Lớp 2: Xử lý trung tâm**

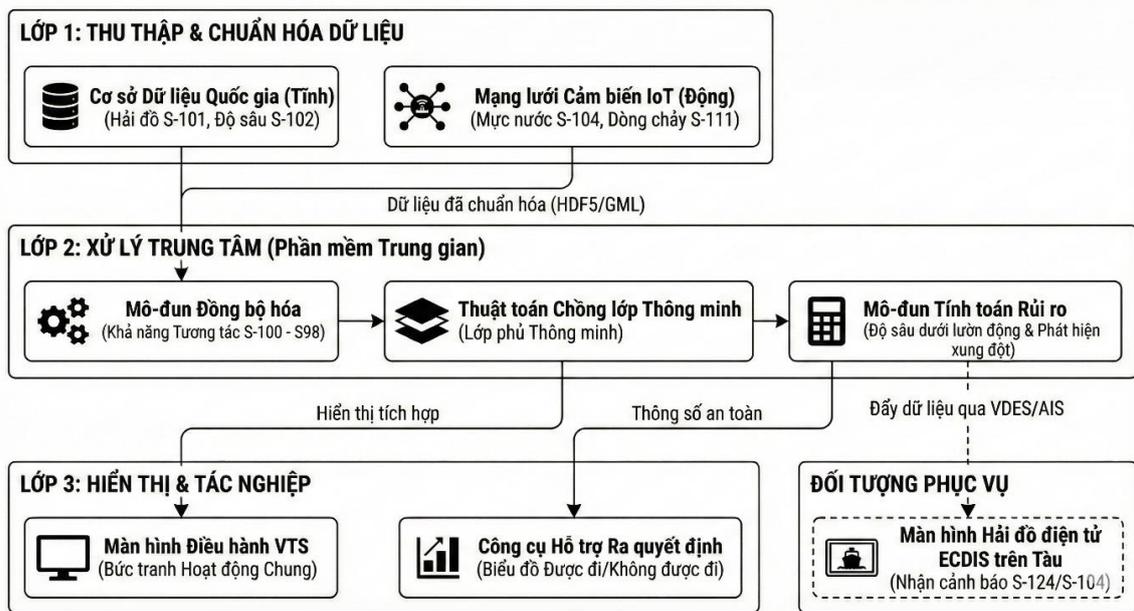
Thực hiện thuật toán Chồng lớp thông minh: Ưu tiên hiển thị dữ liệu có độ chính xác cao nhất (ví dụ: S-102 đè lên S-101 tại vùng trùng lặp).

Module phát hiện xung đột: So sánh vector chuyển động của tàu với dữ liệu không gian 3D/4D để đưa ra cảnh báo sớm.

**Lớp 3: Hiển thị và tác nghiệp**

Giao diện VTS (GUI) hiển thị bức tranh toàn cảnh (Common Operational Picture).

Cung cấp công cụ hỗ trợ ra quyết định: Biểu đồ Go/No-Go cho tàu lớn dựa trên tính toán  $UKC_{dynamic}$ .



Hình 1. Sơ đồ khối kiến trúc tích hợp hệ thống VTS trên nền tảng S-100

#### 4. Phân tích tác động thực tiễn tại các vùng nước trọng điểm của Việt Nam: nghiên cứu điển hình

Tính cấp thiết của việc tích hợp S-100 vào hệ thống VTS tại Việt Nam không đồng nhất trên toàn bộ bờ biển, mà phụ thuộc vào đặc thù địa hình và thủy văn từng khu vực. Nghiên cứu này lựa chọn phân tích hai kịch bản điển hình đại diện cho hai thách thức lớn nhất của ngành hàng hải Việt Nam: vấn đề sa bồi tại Hải Phòng và chế độ thủy văn phức tạp tại cụm cảng nước sâu Cái Mép - Thị Vải.

##### 4.1. Kịch bản 1: Quản trị rủi ro sa bồi tại luồng Lạch Huyện thông qua S-102

Khu vực cảng Hải Phòng, đặc biệt là luồng Lạch Huyện, chịu tác động mạnh mẽ của cơ chế sa bồi tự nhiên, khiến độ sâu luồng hàng hải biến động liên tục.

Bất cập hiện tại đối với hệ thống VTS hiện tại vận hành dựa trên Hải đồ điện tử (ENC) chuẩn S-57. Quy trình cập nhật dữ liệu độ sâu lên S-57 có độ trễ thông tin rất lớn, thường kéo dài từ 3-6 tháng kể từ khi đo đạc đến khi phát hành cập nhật. Để đảm bảo an toàn, Cảng vụ Hàng hải buộc phải áp dụng độ sâu công bố thấp hơn nhiều so với độ sâu thực tế để dự phòng rủi ro sa bồi, dẫn đến lãng phí năng lực khai thác của luồng lạch. Tàu thuyền thường phải giảm tải hoặc chờ thủy triều cao, gây thiệt hại kinh tế.

Giải pháp đột phá từ S-102: Tích hợp S-102 cho phép VTS xây dựng mô hình Thủy đặc tức thời. Dữ

liệu từ các tàu nạo vét duy tu hoặc tàu khảo sát được xử lý và chuyển đổi sang định dạng lưới S-102 chất lượng cao. Dữ liệu này được đẩy trực tiếp vào lớp nhân của hệ thống VTS, đề lên lớp nền S-57/S-101 cũ.

Tác động định lượng: Hệ thống VTS có thể hiển thị chính xác dải luồng khả dụng với độ phân giải cao. Điều này cho phép giảm biên độ dự phòng độ sâu một cách khoa học từ 1,0m xuống 0,5m mà vẫn đảm bảo an toàn.

Như vậy, S-102 biến VTS thành công cụ tối ưu hóa khai thác, cho phép tàu có mớn nước lớn hơn hành trình an toàn mà không cần chờ nạo vét quy mô lớn.

##### 4.2. Kịch bản 2: Tối ưu hóa cửa sổ vận hành cho tàu Mega-ships tại Cái Mép - Thị Vải thông qua S-104 và S-111

Cái Mép - Thị Vải là cửa ngõ quốc tế tiếp nhận các tàu mẹ (Ultra Large Container Ships - ULCS) với mớn nước lên tới 16.5m. Tại đây, thách thức không nằm ở sa bồi mà ở chế độ thủy triều bán nhật triều không đều và dòng chảy phức tạp.

Công tác điều phối VTS hiện dựa chủ yếu vào Bảng thủy triều. Đây là dữ liệu dự báo dựa trên các hằng số điều hòa, không tính đến các yếu tố khí tượng tức thời (nước dâng do bão, nước rút do gió mùa). Sai số giữa dự báo và thực tế tại khu vực này có thể lên tới ±30cm - một con số rất nguy hiểm đối với các tàu có UKC cực thấp.

Giải pháp đồng bộ hóa S-104 và S-111 được đề xuất:

- S-104: Thay thế bảng thủy triều tĩnh bằng dữ liệu mực nước thời gian thực từ mạng lưới trạm quan trắc IoT dọc luồng. Hệ thống VTS sẽ tính toán UKC thực tế từng giây. Mở rộng cửa sỏ thủy triều. Nếu mực nước thực tế cao hơn dự báo 20cm, VTS có thể cho phép tàu xuất bến sớm hơn 30-45 phút, tránh việc tàu phải nằm chờ thêm 12 giờ cho con nước sau.

- S-111: Đối với tàu ULCS dài trên 350m di chuyển chậm trong luồng hẹp, lực dạt ngang do dòng chảy là cực lớn. S-111 cung cấp vector dòng chảy chi tiết, giúp VTS và Hoa tiêu tính toán góc dạt chính xác, ngăn ngừa nguy cơ tàu bị đẩy ra khỏi luồng hàng hải tại các khúc cong ngặt nghèo như khúc cong Gò Gia.

**4.3. Kết quả mô phỏng và thảo luận**

Để đánh giá hiệu quả của mô hình tích hợp, nghiên cứu tiến hành chạy mô phỏng số trên phần mềm giả lập VTS với dữ liệu thủy văn thực tế thu thập tại luồng Cái Mép - Thị Vải trong tháng 12/2024.

Tham số đầu vào của mô phỏng:

- Đối tượng tàu mẫu: Tàu Container 18.000TEU ( $L=399m, B=59m, T_{design}=16,0m$ ).

- Khu vực: Đoạn luồng cong Gò Gia (khu vực có dòng chảy phức tạp).

- Kịch bản A: Sử dụng dữ liệu S-57 (độ sâu năm 2023) và Bảng thủy triều tĩnh.

- Kịch bản B: Sử dụng dữ liệu S-102 (độ sâu khảo sát mới nhất) và S-104/S-111 (thủy văn thời gian thực).

*Kết quả về dự trữ chân hoa tiêu động:* Kết quả tính toán UKC trong chu kỳ 24 giờ cho thấy sự khác biệt rõ rệt về độ chính xác giữa hai mô hình.

Đường biểu diễn UKC của kịch bản B (S-100) có độ mịn cao hơn và bám sát thực tế biến thiên của mực nước. Trong khi kịch bản A tạo ra các bước nhảy bậc thang (do nội suy bảng thủy triều theo giờ), kịch bản B phản ánh liên tục sự dâng/rút của nước. Kết quả cho thấy tại thời điểm triều rút, mô hình S-100 phát hiện ra một số điểm cạn cục bộ mà S-57 bỏ qua, giúp ngăn ngừa nguy cơ mắc cạn tiềm ẩn (Bảng 1).

*Hiệu quả về khoảng thời gian khai thác:*

Áp dụng tiêu chuẩn an toàn  $UKC \geq UKC_{min}$ , chúng ta xác định được khoảng thời gian cho tàu 18.000TEU ra vào luồng.

- Kịch bản A: Cửa sỏ an toàn là 4 giờ 15 phút trong một chu kỳ triều.

- Kịch bản B: Cửa sỏ an toàn mở rộng lên 5 giờ 30 phút.

Kết quả chỉ ra việc tích hợp S-100 giúp tăng thêm 75 phút (khoảng 29%) thời gian vận hành an toàn. Bởi vì, dữ liệu S-104 cho thấy mực nước thực tế tại thời điểm triều lên cao hơn dự báo 15cm, và dữ liệu S-102 cho thấy rãnh luồng thực tế sâu hơn hải đồ cũ 10cm do nạo vét tự nhiên của dòng chảy. Hệ thống VTS tận dụng được các tham số này để cho phép tàu hành trình sớm hơn.

*Đánh giá rủi ro va chạm và dạt luồng:*

- Sử dụng dữ liệu dòng chảy bề mặt S-111 để mô phỏng quỹ đạo tàu tại khúc cong:

- Mô hình cho thấy với vận tốc dòng chảy  $V_c > 2,5$  hải lý/giờ, tàu bị dạt ngang khoảng  $5^\circ$ .

- Hệ thống VTS tích hợp S-100 đã tự động kích hoạt cảnh báo sớm 15 phút, đề xuất góc lái bù chính xác.

- Chỉ số rủi ro (R): Giảm từ mức  $R_{high}$  (nguy cơ cao) xuống  $R_{acceptable}$  (chấp nhận được) nhờ loại bỏ yếu tố bất ngờ về dòng chảy.

Thảo luận về kết quả mô phỏng khẳng định giả thuyết nghiên cứu: Việc chuyển đổi sang hệ sinh thái S-100 không chỉ là cải tiến về mặt hiển thị mà mang lại lợi ích định lượng cụ thể.

Về độ tin cậy: Giảm độ bất định (Uncertainty) của dữ liệu đầu vào giúp thu hẹp biên độ an toàn bắt buộc mà không làm tăng rủi ro thực tế.

Về khía cạnh kinh tế: Việc tăng môn nước khả dụng thêm 0,5m tương đương với việc tàu có thể chở thêm khoảng 1.000 - 1.500 tấn hàng hóa trên mỗi chuyến, hoặc giảm chi phí nạo vét duy tu nhờ tận dụng độ sâu chính xác.

**Bảng 1. So sánh thông số vận hành giữa mô hình S-57 và S-100**

Thông số đánh giá	Kịch bản A (S-57 + Thủy triều tĩnh)	Kịch bản B (S-100 Thủy triều theo thời gian thực)	Hiệu quả định lượng
Sai số độ sâu ( $\sigma_z$ )	$\pm 0.30m$	$\pm 0.05m$	Giảm 83%
Sai số mực nước ( $\sigma_h$ )	$\pm 0.25m$	$\pm 0.02m$	Giảm 92%
UKC tối thiểu yêu cầu	1.60 m (10% môn nước)	1.10m (Dựa trên rủi ro xác suất)	Tối ưu hóa 31%
Môn nước khả dụng tối đa	14.5m	15.0m	Tăng 0.5m

Việc áp dụng hệ sinh thái S-100 vào VTS tại Việt Nam không chỉ là vấn đề công nghệ, mà là sự chuyển đổi mô hình quản lý từ phòng ngừa thụ động sang quản trị rủi ro chủ động.

Kết quả định lượng này có sự tương đồng cao với các nghiên cứu quốc tế gần đây. Cụ thể, nghiên cứu thực nghiệm của Giglio và cộng sự (2025) [1] tại các cảng Châu Âu cũng chỉ ra rằng việc áp dụng S-100 giúp tối ưu hóa chi phí vận hành tàu khoảng 15-20%. Tương tự, Baldauf và Hong (2016) [5] đã khẳng định vai trò của e-Navigation trong việc giảm thiểu 30% nguy cơ va chạm trong luồng hẹp. Sự thống nhất giữa kết quả mô phỏng tại Cái Mép - Thị Vải với các công bố quốc tế này đã củng cố thêm độ tin cậy của giải pháp đề xuất, khẳng định tính khả thi của lộ trình IHO trong điều kiện thực tiễn Việt Nam.

## 5. Thách thức kỹ thuật và giải pháp triển khai trong bối cảnh Việt Nam

Việc chuyển đổi từ tiêu chuẩn S-57 sang hệ sinh thái S-100 không đơn thuần là một bản cập nhật phần mềm, mà là sự tái cấu trúc toàn diện hạ tầng dữ liệu hàng hải. Quá trình này tại Việt Nam đối mặt với những thách thức đa chiều, bao gồm sự không đồng nhất của hạ tầng công nghệ hiện hữu, rủi ro an ninh mạng và các khoảng trống trong hành lang pháp lý.

Thách thức kỹ thuật lớn nhất nằm ở tính tương thích giữa hệ thống cũ và chuẩn dữ liệu mới. Hệ thống VTS tại các cảng biển Việt Nam hiện nay đa phần vận hành trên nhân xử lý S-57, với năng lực phần cứng được thiết kế cho dữ liệu vector nhẹ. Trong khi đó, các tập dữ liệu S-100, đặc biệt là S-102 (độ sâu) và S-111 (dòng chảy), có cấu trúc phức tạp và dung lượng lớn, đòi hỏi năng lực xử lý cao gấp nhiều lần. Việc nạp trực tiếp dữ liệu S-100 vào các hệ thống chưa được nâng cấp có nguy cơ gây quá tải bộ nhớ đệm và tạo ra độ trễ trong quá trình xử lý thời gian thực, điều tối kỵ trong công tác điều phối an toàn hàng hải. Để giải quyết đồng thời bài toán hạ tầng và trách nhiệm pháp lý, nghiên cứu đề xuất áp dụng mô hình vận hành nhiên liệu kép trong giai đoạn quá độ 2025-2030. Theo đó, hệ thống VTS sẽ vận hành song song: Dữ liệu pháp lý: Vẫn sử dụng hải đồ S-57 truyền thống làm cơ sở pháp lý để xác định trách nhiệm khi xảy ra sự cố, đảm bảo tuân thủ quy định hiện hành. Dữ liệu hỗ trợ: Các lớp dữ liệu S-100 (S-102, S-104) đóng vai trò là công cụ tham khảo nâng cao độ chính xác. Cách tiếp cận này giúp các điều hành viên VTS và Cảng vụ an tâm về mặt pháp lý, tránh các rủi ro trách nhiệm trong khi chờ đợi hành lang pháp lý mới được hoàn thiện.

Bên cạnh rào cản hạ tầng, vấn đề an ninh mạng và tính toàn vẹn dữ liệu trở nên cấp thiết khi VTS chuyển từ mô hình đóng sang hệ thống kết nối mở. Việc tích hợp dữ liệu thời gian thực từ mạng lưới IoT làm gia tăng bề mặt tấn công. Nguy cơ tin tặc xâm nhập để thay đổi thông số độ sâu hoặc vị trí báo hiệu hàng hải là hoàn toàn hiện hữu, có thể dẫn đến các sự cố hàng hải nghiêm trọng. Do đó, việc triển khai S-100 bắt buộc phải tuân thủ nghiêm ngặt Cơ chế bảo vệ dữ liệu S-100 phần 15 (S-100 Part 15 - Data Protection Scheme) với mô hình bảo mật 2 lớp cụ thể. Giải pháp này yêu cầu mọi gói dữ liệu động (S-104/S-111) do trạm VTS tạo ra phải được ký số bởi cơ quan có thẩm quyền (như Cục Hàng hải và Đường thủy Việt Nam) và được xác thực tự động bởi hệ thống đích (ECDIS trên tàu) nhằm đảm bảo tính nguyên vẹn và chống chối bỏ, tương tự như quy trình xác thực hải đồ S-101 từ các RENC hiện nay.

Cuối cùng là thách thức về yếu tố con người và cơ sở pháp lý. Sự gia tăng đột biến các lớp dữ liệu động có thể dẫn đến tình trạng quá tải nhận thức cho điều hành viên VTS nếu không được quản lý tốt. Giải pháp kỹ thuật cần hướng tới việc phát triển các thuật toán lọc thông minh, chi hiển thị các lớp dữ liệu hỗ trợ khi tàu đi vào vùng nguy hiểm hoặc theo yêu cầu tác nghiệp cụ thể. Song song với đó, các cơ quan quản lý nhà nước cần sớm hoàn thiện hành lang pháp lý, quy định rõ trách nhiệm và giá trị pháp lý của dữ liệu điện tử trong việc điều tra và phân định trách nhiệm khi xảy ra tai nạn hàng hải, tạo cơ sở vững chắc cho việc áp dụng dữ liệu số thay thế hải đồ giấy truyền thống.

## 6. Kết luận và kiến nghị

### 6.1. Kết luận

Nghiên cứu đã chỉ ra rằng việc tích hợp hệ sinh thái dữ liệu S-100 vào hệ thống Giám sát và điều phối giao thông hàng hải (VTS) không chỉ là một yêu cầu kỹ thuật tuân theo lộ trình của Tổ chức Thủy đặc Quốc tế (IHO), mà là một giải pháp cốt lõi để giải quyết các bài toán đặc thù của ngành hàng hải Việt Nam.

Kết quả phân tích mô hình cho thấy sự chuyển dịch từ cấu trúc dữ liệu tĩnh S-57 sang cấu trúc dữ liệu động đa chiều S-100 (bao gồm S-101, S-102, S-104, S-111) mang lại hai tác động chiến lược:

- Nâng cao năng lực an toàn: Giảm thiểu rủi ro va chạm và mắc cạn thông qua việc loại bỏ các điểm mù thông tin về độ sâu và dòng chảy, chuyển đổi phương thức vận hành VTS từ giám sát thụ động sang quản trị rủi ro chủ động.

- Tối ưu hóa hiệu quả kinh tế: Việc áp dụng tính toán dự trữ chân hoa tiêu động ( $UKC_{dynamic}$ ) cho phép

mở rộng cửa sổ thời gian khai thác luồng và tiếp nhận tàu trọng tải lớn an toàn, đặc biệt tại các khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của sa bồi (như Hải Phòng) và chế độ thủy triều phức tạp (như Cái Mép - Thị Vải).

Tuy nhiên, quá trình chuyển đổi này đối mặt với các thách thức đáng kể về sự không đồng nhất của hạ tầng công nghệ cũ, nguy cơ an ninh mạng và các khoảng trống trong hành lang pháp lý hiện hành.

## 6.2. Kiến nghị

Trên cơ sở phân tích khoa học và thực tiễn, nhóm tác giả đề xuất các giải pháp cụ thể đối với cơ quan quản lý nhà nước và các bên liên quan:

- Xây dựng Lộ trình Chuyển đổi số Quốc gia về Thủy đạc: Cục Hàng hải Việt Nam cần sớm ban hành lộ trình áp dụng S-100 tương thích với kế hoạch của IHO, trong đó ưu tiên chấp nhận giá trị pháp lý của các tập dữ liệu số (S-10x) tương đương với hải đồ truyền thống trong công tác điều tra và xử lý tai nạn.

- Triển khai Thí điểm tại Cái Mép - Thị Vải: Thiết lập dự án thí điểm nâng cấp trạm VTS Cái Mép để vận hành theo cơ chế Nhiên liệu kép, tích hợp thử nghiệm dữ liệu S-104 (mực nước) và S-111 (dòng chảy) thời gian thực để đánh giá hiệu quả hỗ trợ tàu Mega-ships.

- Chuẩn hóa Hạ tầng An ninh mạng: Xây dựng quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về bảo mật dữ liệu hàng hải, bắt buộc áp dụng cơ chế ký số và xác thực dữ liệu theo tiêu chuẩn S-100 Part 15 cho mọi hệ thống VTS mới đầu tư.

- Hợp tác Đào tạo và R&D: Các cơ sở đào tạo như Trường Đại học Hàng hải Việt Nam cần tiên phong đưa nội dung S-100 vào chương trình giảng dạy cho sỹ quan hàng hải và điều hành viên VTS, đồng thời phối hợp với doanh nghiệp phát triển các thuật toán AI hỗ trợ lọc và xử lý dữ liệu lớn trên nền tảng S-100.

Việc thực hiện đồng bộ các giải pháp trên sẽ tạo tiền đề vững chắc để Việt Nam tiến tới mô hình Cảng biển thông minh (Smart Port) và sẵn sàng cho kỹ nguyên Tàu tự hành (MASS) trong tương lai gần.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.08**.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] D. Giglio, V. Palma, and A. Tei, (2025), *Evaluating the operational and economic impact of the introduction of S-100 and e-Navigation within shipping companies*, Case Studies on Transport Policy, Vol.19, p. 101331.  
doi: 10.1016/j.cstp.2024.101331.

[2] International Hydrographic Organization, (2022), *Roadmap for the S-100 Implementation Decade (2020 - 2030)*. [Online]. Available: [https://iho.int/uploads/user/About%20IHO/Council/S-100\\_ImplementationStrategy/S-100%20Roadmap\\_Annex\\_2\\_v2.0\\_July2022.pdf](https://iho.int/uploads/user/About%20IHO/Council/S-100_ImplementationStrategy/S-100%20Roadmap_Annex_2_v2.0_July2022.pdf).

[3] NOAA, (2025), *The world of S-100: Updated framework of maritime data standards to be released in 2018 - Office of Coast Survey*, [Online]. Available: <https://nauticalcharts.noaa.gov/updates/the-world-of-s-100-updated-framework-of-maritime-data-standards-to-be-released-in-2018/>. (Accessed Aug. 08, 2025).

[4] UK Hydrographic Office, (2025), *S-100: Shaping the future of navigation | ADMIRALTY*, [Online]. Available: <https://www.admiralty.co.uk/s-100-shaping-future-navigation>.

[5] M. Baldauf and S.-B. Hong, (2016), *Improving and Assessing the Impact of e-Navigation applications*, International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, Vol.4, pp.1-12.  
doi: 10.1016/j.enavi.2016.06.001.

[6] D. Breton, J. Barry, and L. Vandehei, (2016), *Improving Canada's Marine Navigation System through e-Navigation*, International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, Vol.4, pp.23-30.  
doi: 10.1016/j.enavi.2016.06.003.

[7] K. An, (2016), *E-navigation Services for Non-SOLAS Ships*, International Journal of e-Navigation and Maritime Economy, Vol.4, pp.13-22.  
doi: 10.1016/j.enavi.2016.06.002.

[8] M. D. Nguyen and S. J. Kim, (2020), *Application of game theory to analyze the competition and cooperation scenarios among container terminals in Northern Vietnam*, The Asian Journal of Shipping and Logistics, Vol.36, No.1, pp.13-19.  
doi: 10.1016/j.ajsl.2019.08.001.

[9] T. T. Nguyen, (2016), *An Investigation of the Vietnamese Shipping Industry and Policy Recommendations for Profound Participation into ASEAN Integration*, The Asian Journal of Shipping and Logistics, Vol.32, No.2, pp.81-88.  
doi: 10.1016/j.ajsl.2016.05.001.

[10] N. X. Long and P. Van Hung, (2025), *Energy efficiency and carbon emissions assessment of container terminal equipment at Tan Cang - Cai*

*Mep Thi Vai*, International Journal of Sustainable Engineering, Vol.18, No.1, p. 2580726.

doi: 10.1080/19397038.2025.2580726.

- [11] D. Žagar and F. Dimc, (2025), *E-navigation: integrating physiological readings within the ship's bridge infrastructure*, Transportation Research Procedia, Vol.83, pp.343-348.

doi: 10.1016/j.trpro.2025.02.045.

Ngày nhận bài:	22/12/2025
Ngày nhận bản sửa:	01/01/2026
Ngày duyệt đăng:	12/01/2026