

**BỘ GIAO THÔNG VẬN TẢI    BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM**



**ĐOÀN HỮU KHÁNH**

**NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN THUẬT TOÁN**  
**ĐỊNH TUYẾN HÀNH TRÌNH TÀU THUYẾT NHẪM**  
**TỐI THIỂU HÓA NHIÊN LIỆU TIÊU THỤ**

**Tóm tắt luận án tiến sĩ kỹ thuật**

**Ngành:** Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa; **mã số:** 9520216

**Chuyên ngành:** Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa

Hải Phòng – 2024

Công trình được hoàn thành tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. Đinh Anh Tuấn

2. PGS.TS. Hoàng Đức Tuấn

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án tiến sĩ cấp Trường họp tại Trường Đại học Hàng hải Việt Nam vào hồi ... giờ ... phút ngày ... tháng ... năm ...

Có thể tìm hiểu luận án tại Thư viện Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của vấn đề nghiên cứu

Trong những năm gần đây, sự phát thải khí nhà kính từ tàu thủy đang là chủ đề nhận được rất nhiều sự quan tâm. Khi tàu hành trình nó phát ra các chất khí gây ô nhiễm như SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM và CO<sub>2</sub> [21]. Riêng với khí CO<sub>2</sub> phát ra từ các phương tiện vận chuyển đường thủy chiếm tới 3.3% tổng lượng khí CO<sub>2</sub> phát thải ra trên trái đất và con số này được dự báo sẽ tăng lên khoảng 150%÷250% vào năm 2025 [56]. Các chất khí thải này đều rất độc hại và ảnh hưởng xấu đến môi trường sống.

Vận tải đường biển là phương thức vận chuyển chính và rẻ nhất khi vận chuyển hàng hóa giữa các quốc gia và các lục địa. Tuy nhiên, hiện nay giá nhiên liệu đang ngày một tăng cao mà chi phí nhiên liệu là yếu tố tốn kém nhất trong việc vận hành tàu, chi phí này có thể lên tới tới 70% tổng chi phí khai thác tùy vào tải trọng và chủng loại tàu [24].

Hơn nữa, để tuân thủ phụ lục VI/nghị quyết MEPC.328(76) năm 2021 về việc sửa đổi, bổ sung đối với Phụ lục VI “Quy định về ngăn ngừa ô nhiễm không khí từ tàu” của Công ước MARPOL các hãng vận tải biển hầu hết đều đang sử dụng một biện pháp chính đó là giới hạn công suất máy chính. Tuy nhiên, khi cần vận chuyển hàng hóa nhanh chóng thì đây sẽ là một nhược điểm lớn. Vì vậy, trong những năm gần đây các nhà nghiên cứu đang đi tìm các giải pháp để vận hành tàu sao cho tối thiểu hóa nhiên liệu, mang lại hiệu quả khai thác lớn hơn.

Từ thực tế này, NCS đề xuất xây dựng một phương pháp để tìm những tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu cho tàu trước mỗi chuyến đi để nâng cao hiệu suất khai thác và giảm khí thải ô nhiễm ra môi trường. Cụ thể NCS đề xuất đề tài: “*Nghiên cứu phát triển thuật toán định tuyến hành trình tàu thủy nhằm tối thiểu hóa nhiên liệu tiêu thụ*” là một hướng đi có tính thực tiễn hiện nay.

### 2. Mục đích nghiên cứu của luận án

Mục đích nghiên cứu là xây dựng thuật toán định tuyến hành trình nhằm tối thiểu hóa nhiên liệu tiêu thụ góp phần nâng cao hiệu quả khai thác và giảm khí thải ô nhiễm ra môi trường.

### 3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án

*Đối tượng nghiên cứu:*

Đối tượng nghiên cứu là những tàu chở hàng rời, trọng tải lớn.

*Phạm vi nghiên cứu:*

Nghiên cứu các công trình trong và ngoài nước đã và đang nghiên cứu vấn đề này, ưu, nhược điểm của các công trình đó.

Nghiên cứu hệ phương trình 6 bậc tự do, mô hình toán hệ lực đẩy, mô hình toán các nhiễu môi trường có thể áp dụng cho các tàu chở hàng.

Nghiên cứu các mô hình tính toán nhiên liệu theo thời gian thực.

Nghiên cứu về mạng nơ-ron nói chung và mạng nơ-ron truyền thẳng MLP nói riêng.

Nghiên cứu về thuật toán tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu dựa trên thuật toán A\* và mô hình dự báo sử dụng mạng nơ-ron.

#### **4. Phương pháp nghiên cứu của luận án**

Để đạt được những mục tiêu đưa ra, luận án sử dụng các phương pháp phân tích, tổng hợp, mô hình hóa và mô phỏng.

#### **5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án**

*Đề tài có ý nghĩa khoa học:*

Về mặt phương pháp luận, luận án đưa ra một phương pháp để định tuyến hành trình cho tàu với mục tiêu giảm thiểu lượng nhiên liệu tiêu thụ. Cụ thể, thay vì sử dụng các bộ dữ liệu trong quá trình khai thác tàu trong quá khứ, phương pháp này đề xuất một phương pháp để tạo ra một bộ dữ liệu bằng một mô hình mô phỏng theo phương pháp HIL. Bên cạnh đó, luận án cũng đề xuất những thuật toán để định tuyến hành trình tối thiểu hóa nhiên liệu có ràng buộc thời gian cho tàu dựa trên mạng nơ-ron và thuật toán tìm kiếm A\*.

*Đề tài có ý nghĩa thực tiễn:*

Về mặt thực tiễn, luận án có ý nghĩa thiết thực trong giai đoạn hiện nay khi Việt Nam đang nỗ lực trở thành một quốc gia mạnh về kinh tế biển. Ngoài ra, nếu đề tài được nghiên cứu thành công thì sẽ góp phần giảm ô nhiễm môi trường, đem lại những hiệu quả lớn về kinh tế.

#### **6. Những đóng góp mới của luận án**

Luận án có 03 điểm đóng góp mới tiêu biểu, đó là:

Đầu tiên là xây dựng được một mô hình tính toán nhiên liệu tiêu thụ có thể áp dụng cho các tàu chở hàng sử dụng phương pháp nội suy và các công thức bán kinh nghiệm làm việc tin cậy với sai số thấp.

Thứ hai, luận án đã xây dựng được một mô hình dự báo được cả nhiên liệu tiêu thụ và thời gian hành trình sử dụng mạng nơ-ron.

Cuối cùng, luận án đề xuất thuật toán định tuyến hành trình tối thiểu hóa nhiên liệu tiêu thụ có ràng buộc thời gian ứng dụng trên một đồ thị di chuyển cong nhằm nâng cao tính chính xác, tin cậy.

#### **7. Kết cấu của luận án**

Luận án gồm 116 trang A4 (không kể phụ lục), thứ tự gồm các phần sau: mở đầu; nội dung chính (gồm 04 chương); kết luận và kiến nghị; các công trình khoa học đã công bố, tài liệu tham khảo và phụ lục.

### **CHƯƠNG 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN**

Chương này thực hiện việc phân tích, tổng hợp các tài liệu trong và ngoài nước liên quan đến vấn đề nghiên cứu của luận án để tìm ra những vấn đề còn tồn tại trong lĩnh vực này. Từ đó, đề xuất hướng nghiên cứu cho luận án.

Tổng hợp từ các tài liệu liên quan đến những giải pháp để nâng cao hiệu quả sử dụng nhiên liệu cho tàu thủy thì các giải pháp để nâng cao hiệu quả sử dụng nhiên liệu cho tàu trên thế giới và Việt Nam thường được chia làm 02 nhóm chính. Nhóm giải pháp thứ nhất là nâng cao hiệu quả sử dụng nhiên liệu từ quá trình thiết kế tàu và nhóm giải pháp thứ hai là trong quá trình vận hành, khai thác tàu [6, 16]. Từ việc phân tích các tài liệu trong và ngoài nước liên quan nêu trên, NCS thấy rằng:

Nhóm giải pháp thứ nhất gồm giải pháp chính như tối ưu hình dáng thân tàu [50, 69], tối ưu hóa hoạt động của máy chính [28, 62], sử dụng hệ lực đẩy hỗn hợp [40], sử dụng các nguồn năng lượng thay thế [29], v.v.. Những giải pháp này đòi hỏi phải được thực hiện từ trước và trong quá trình đóng mới tàu. Bởi vậy, luận án sẽ không đi theo hướng nghiên cứu này.

Các giải pháp trong nhóm thứ hai gồm có các giải pháp chính như vận hành tàu ở tốc độ thấp [45], tìm góc chúi tối ưu [39, 70], xây dựng phần mềm hỗ trợ ra quyết định [26, 46, 83] và tìm tuyến đường tối ưu dựa trên các thông tin dự báo thời tiết [64, 67, 77, 89].

Trong nhóm giải pháp thứ hai thì các giải pháp để tìm các tuyến đường tối ưu dựa trên các thông tin dự báo thời tiết là giải pháp dễ thực hiện, đem lại hiệu quả kinh tế. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu theo hướng này thì dữ liệu được sử dụng cho việc tính toán, dự báo nhiên liệu tiêu thụ là những dữ liệu ghi lại từ quá trình hoạt động của tàu. Những nguồn dữ liệu này có nhược điểm là độ chi tiết không cao, thời gian cập nhật dữ liệu giữa mỗi lần lớn (tối đa là 1 lần/ 1 ngày với bản tin báo cáo buổi trưa) và thường thiếu những đầu vào quan trọng. Bên cạnh đó, các tiêu chí tìm kiếm tuyến đường chưa có sự liên kết chặt chẽ với nhau khi hầu hết chỉ giải những bài toán đơn lẻ như chỉ tối thiểu hóa nhiên liệu, đến đích đúng giờ hay chỉ là tiêu chí an toàn.

*Từ những tồn tại nêu trên, luận án đề xuất một phương pháp để giải quyết vấn đề với ba bước như sau:*

Bước đầu tiên mà luận án sẽ thực hiện là nghiên cứu xây dựng một mô hình mô phỏng sử dụng công nghệ mô phỏng phần cứng trong vòng lặp HIL nhằm tạo ra một bộ dữ liệu thực hiện trong bước 2 để thay cho những bộ dữ liệu vận hành trong quá khứ của tàu.

Ở bước 2, mô hình mô phỏng đã xây dựng sẽ được dùng để tạo nên một bộ dữ liệu với đa dạng các kịch bản như khi tàu vận hành trên biển để thay thế cho những dữ liệu quá khứ bằng cách thay đổi các thông số tàu, biên độ và hướng của các nhiễu môi trường. Bộ dữ liệu đó sẽ được sử dụng để huấn luyện cho một mô hình dự báo ANN sử dụng mạng nơ-ron được huấn luyện theo thuật toán lan truyền ngược với hai đầu ra là nhiên liệu tiêu thụ và thời gian hành trình.

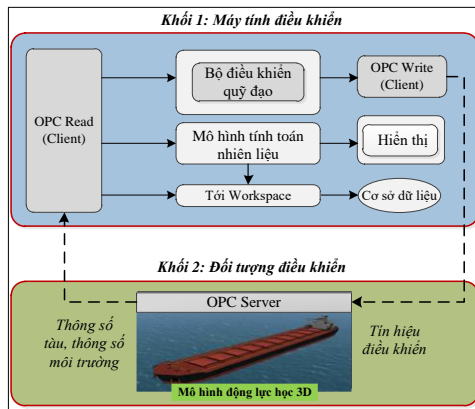
Tại bước cuối cùng, từ mô hình dự báo ANN đã được xây dựng ở bước 2 kết hợp thuật toán tìm kiếm A\*, thuật toán I được đề xuất để tìm tuyến đường

tối thiểu hóa nhiên liệu cho tàu. Trong khi đó, thuật toán II được đề xuất để gợi ý giá trị tốc độ đặt cho máy chính phù hợp giúp tàu có thể đến điểm đích theo đúng thời gian yêu cầu trên tuyến đường đã được gợi ý bởi thuật toán I.

## CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH MÔ PHÒNG THEO PHƯƠNG PHÁP HIL

Chương này thực hiện việc nghiên cứu, thiết kế một mô hình mô phỏng theo phương pháp HIL nhằm thực hiện hai mục đích là để tạo ra một bộ dữ liệu để thay thế cho bộ dữ liệu vận hành trong quá khứ của tàu và để kiểm chứng các thuật toán đề xuất.

### 2.1. Cấu trúc mô hình mô phỏng đề xuất



Hình 2.1. Cấu trúc mô hình mô phỏng HIL đề xuất

Dựa trên cấu trúc mô hình mô phỏng HIL truyền thống, cấu trúc mô hình đề xuất được mô tả như trên hình 2.1. Mô hình sẽ gồm hai khối chính như sau:

- Khối 1: đóng vai trò là một bộ điều khiển quỹ đạo thực để điều khiển mô hình tàu trong khối 2. Bên cạnh đó, một mô hình tính toán nhiên liệu cũng sẽ được xây dựng bên trong khối này.
- Khối 2: đóng vai trò là một mô hình tàu thay thế cho tàu thực. Mô hình tàu sẽ được xây dựng dưới dạng một đối tượng 3D sử dụng phần mềm Unity dựa trên hệ phương trình 6 bậc tự do (6-DOF) của tàu, mô hình toán của hệ lực đẩy, nhiều môi trường và hồ sơ kỹ thuật của tàu.

Ngoài ra, một giao diện truyền thông được xây dựng để truyền/nhận dữ liệu giữa đối tượng điều khiển (khối 2) và bộ điều khiển (khối 1) dựa trên sự kết hợp giữa phần mềm KEPServerEX và các khối OPC Read/Write trong thư viện OPC toolbox của phần mềm Matlab/Simulink với chu kỳ lấy mẫu được cài đặt là 100 ms.

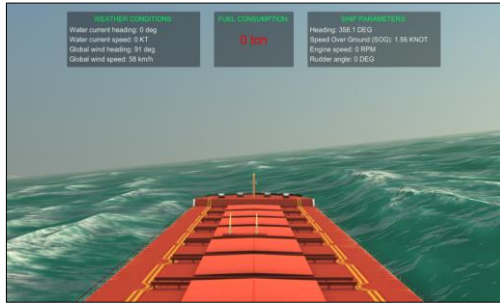
## 2.2. Xây dựng mô hình động lực học tàu trong môi trường 3D

Mô hình động lực học tàu sẽ được xây dựng để mô phỏng con tàu thật The Prosperity dựa trên hệ phương trình sáu bậc tự do (6-DOF) của tàu, các mô-men và lực của nhiễu môi trường và hệ lực đẩy (gồm chân vịt và bánh lái). Hệ phương trình 6-DOF mô tả động lực học của tàu như sau [30, 31]:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2.1)$$

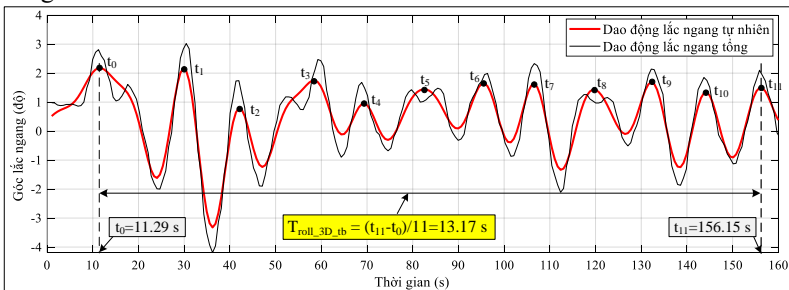
$$M_{RB}\dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_H + \tau_E + \tau$$

trong đó,  $\eta$  là véc-tơ vị trí và hướng;  $J(\eta)$  là ma trận chuyển đổi,  $v$  là véc-tơ vận tốc dài và vận tốc góc trong hệ trục tọa độ gắn với thân tàu,  $M_{RB}$  là ma trận quán tính,  $C_{RB}$  là ma trận Coriolis và lực hướng tâm,  $\tau_H, \tau_E, \tau$  lần lượt là các lực và mô-men: thủy động lực học, nhiễu môi trường và hệ lực đẩy.



Hình 2.2. Mô hình động lực học tàu đang được thử nghiệm

Hình 2.2 minh họa mô hình động lực học tàu đang được thử nghiệm với hướng gió là  $90^0$ , gió cấp 7/12 thang Beaufort. Trong khi đó, hình 2.3 thể hiện góc lắc ngang của mô hình tàu đã xây dựng khi chịu tác động của sóng và gió, dao động lắc ngang tổng được đưa qua một bộ lọc thông thấp để tách ra dao động lắc ngang tự nhiên phục vụ cho việc so sánh, đánh giá khi kiểm chứng mô hình.



Hình 2.3. Góc lắc ngang qua bộ lọc thông thấp

### 2.3. Xây dựng mô hình tính toán nhiên liệu tiêu thụ

Mô hình tính toán nhiên liệu tiêu thụ sẽ là một mô hình quan trọng, ảnh hưởng đến hiệu quả của phương pháp đề xuất. Khi tàu hoạt động, nhiên liệu tiêu thụ của máy chính trong một ngày được tính như sau:

$$TFC = \int_{i=0}^{24h} P_i \cdot SFOC_i \cdot dt \quad (2.2)$$

trong đó,  $TFC$  là nhiên liệu tiêu thụ trong một ngày (tấn),  $P_i$  là công suất tức thời của máy chính (kW),  $SFOC_i$  là suất tiêu hao nhiên liệu (g/kW.h).

Như vậy, muốn tính được nhiên liệu tiêu thụ thì cần tính được công suất tức thời và suất tiêu hao nhiên liệu tại mỗi thời điểm lấy mẫu  $i$ .

Với hướng nghiên cứu là các tàu chở hàng có bước chân vịt cố định, công suất của máy chính sẽ được tính như sau [8]:

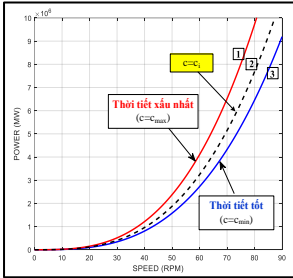
$$P = c \times n^3 \quad (2.3)$$

trong đó,  $P$  là công suất máy chính (W),  $n$  là tốc độ máy chính (rpm),  $c$  là một hằng số phụ thuộc vào lực cản bổ sung tác động lên tàu.

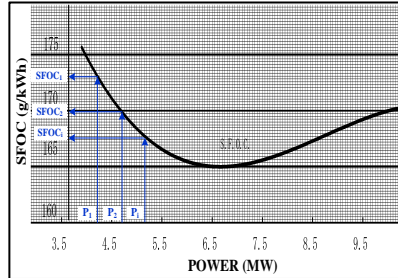
Khi tàu hoạt động, lực cản bổ sung ( $R_{added}$ ) tác động lên tàu được tính như sau [58]:

$$R_{added} = R_{AWM} + \sum_{i=1}^4 R_{AWR}^i + R_{wind} \quad (2.4)$$

trong đó,  $R_{AWM}$ ,  $R_{AWR}$  lần lượt là lực cản bổ sung do sóng bởi hiệu ứng bức xạ và hiệu ứng phản xạ,  $R_{wind}$  là lực cản do gió.



Hình 2.4. Các đường đồ thị làm việc của chân vịt



Hình 2.5. Đường công suất tiêu hao nhiên liệu

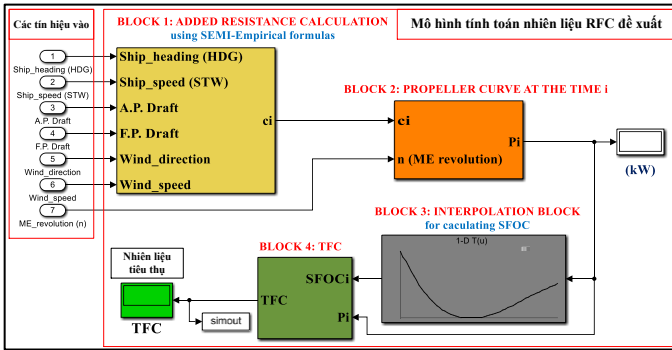
Giá trị lực cản bổ sung tàu  $R_{added}^i$  tại thời điểm tính toán  $i$  bất kỳ sẽ tính được từ các công thức bán kinh nghiệm tùy vào các thông số của tàu và độ lớn cũng như hướng của các nhiễu môi trường nên  $R_{added}^i \in [0, \max]$ . Bởi vậy. Hệ số  $c$  trong phương trình (2.3) tại thời điểm  $i$  sẽ được nội suy từ giá trị lực cản bổ sung tác động vào tàu nằm trong khoảng  $[0 \div R_{max}]$  như sau:



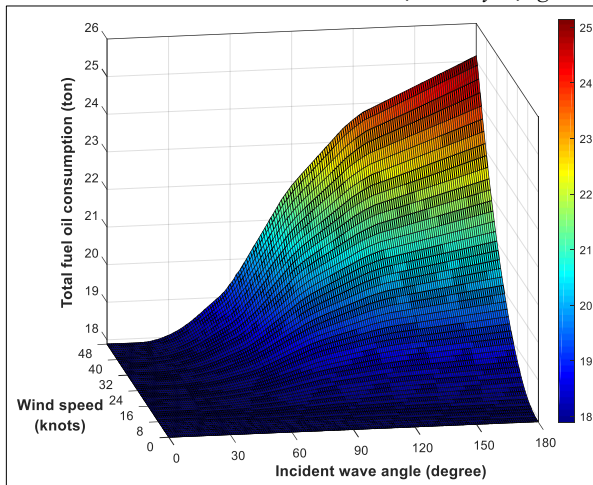
$$c_i = c_{min} + \frac{R_{added}^i \times (c_{max} - c_{min})}{R_{added}^{max}} \quad (2.5)$$

trong đó,  $c_{min}$  và  $c_{max}$  là hai hệ số  $c$  ứng với trường hợp thời tiết tốt và trường hợp thời tiết xấu nhất. Khi tàu làm việc dưới điều kiện không có nhiễu sẽ là cơ sở để tính toán ra hệ số  $c_{min}$  ứng với một tốc độ đặt  $n$  theo phương trình (2.3). Trong khi đó, giả định trong trường hợp thời tiết xấu nhất sẽ là cơ sở để tính toán hệ số  $c_{max}$ . Hình 2.4 minh họa các đường đồ thị làm việc của chân vịt được xây dựng cho tàu The Prosperity. Trong khi đó, hình 2.5 minh họa đường cong suất tiêu hao nhiên liệu của tàu thực được lấy từ bộ dữ liệu thử tàu.

Từ các cơ sở trên, mô hình đề xuất được thiết kế xây dựng trên phần mềm Matlab/Simulink như hình 2.6.



Hình 2.6. Mô hình tính toán nhiên liệu đã xây dựng



Hình 2.7. Nhiên liệu tiêu thụ của máy chính với các điều kiện khác nhau

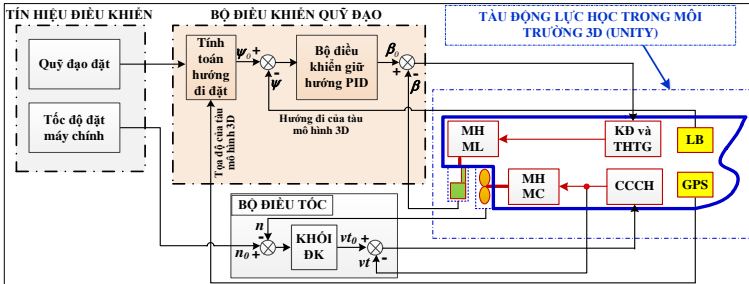
Khi chạy mô hình đề xuất và so sánh kết quả với những ngày tương ứng trong bản báo cáo buổi trưa của tàu thực thì sai số đều rất nhỏ, sai số trung bình khi thử nghiệm là 1.26%. Hình 2.7 thể hiện lượng nhiên liệu tàu tiêu thụ trong một ngày khi hướng gió và tốc độ gió thay đổi.

## 2.4. Xây dựng bộ điều khiển quỹ đạo

### 2.4.1. Xây dựng cấu trúc điều khiển

Vì tàu là một đối tượng có tính phi tuyến lớn, hoạt động trong môi trường chịu tác động của nhiều ngẫu nhiên như sóng, gió và dòng chảy. Bởi thế, các bộ điều khiển quỹ đạo được xây dựng cho tàu đều dựa trên cơ sở tuyến tính hóa mô hình tàu từ mô hình nguyên thủy 6-DOF. Dựa trên nghiên cứu [91] với bộ điều khiển quỹ đạo sử dụng logic mờ và bộ điều khiển PID dựa trên việc tuyến tính hóa mô hình tàu, cấu trúc điều khiển sẽ sử dụng trong nghiên cứu này được xây dựng như hình 2.8.

Trong cấu trúc đề xuất, quỹ đạo đặt cho bộ điều khiển quỹ đạo sẽ là một tập hợp các điểm chuyển hướng (waypoint) từ điểm khởi đầu đến điểm đích. Tọa độ những điểm waypoint này sẽ được gửi tới một bộ điều khiển quỹ đạo được xây dựng dựa trên logic mờ và bộ điều khiển PID. Cụ thể, khối *Tính toán hướng đi đặt* sử dụng logic mờ sẽ có nhiệm vụ sẽ tính toán ra hướng đi đặt  $\psi_0$  dựa trên quỹ đạo đặt và tọa độ hiện tại của mô hình tàu.



Hình 2.8. Cấu trúc điều khiển đề xuất

Trong khi đó, *Bộ điều khiển giữ hướng PID* có nhiệm vụ nhận hướng đi đặt ( $\psi_0$ ) và tín hiệu hướng đi hiện tại ( $\psi$ ) của mô hình tàu để tính toán ra bề lái đặt ( $\beta_0$ ), dựa trên tín hiệu góc bề lái hiện tại ( $\beta$ ) thì tín hiệu sai lệch sẽ được gửi tới khối khuếch đại và thực hiện trung gian (*KĐ và THTG*) và tới mô hình máy lái (MHML).

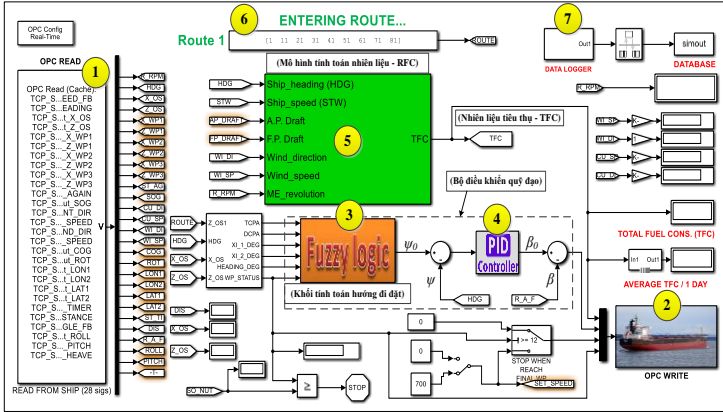
Bên cạnh đó, các giá trị tốc độ đặt ( $n_0$ ) sẽ được gửi tới khối *Bộ điều tốc* để cài đặt những giá trị tốc độ mong muốn khác nhau gửi đến cơ cấu chấp hành (*CCCH*) và mô hình máy chính (*MHMC*) cũng được xây dựng trong mô hình tàu đề xuất. Ngoài phản hồi tốc độ, bộ điều tốc sẽ nhận tín hiệu phản hồi vị trí  $vt$  của *CCCH* và so sánh với tín hiệu đặt vị trí  $vt_0$  của khối điều khiển (*KHỐI ĐK*) để gửi tín hiệu đến *CCCH*.

### 2.4.2. Xây dựng bộ điều khiển quỹ đạo

Bộ điều khiển quỹ đạo được xây dựng trong phần mềm Matlab/Simulink như trên hình 2.9 [91]. Trước tiên, hướng đi tính toán ( $\psi_0$ ) gửi đến Bộ điều khiển giữ hướng PID sẽ được tính toán như sau:

$$\psi_0 = \psi_1 + (\psi_2 - \psi_1) \times CDH \quad (2.6)$$

trong đó,  $\psi_1, \psi_2$  lần lượt là góc giữa đường đi ngắn nhất đến điểm chuyển hướng (WP) gần nhất WP1 và gần thứ hai WP2 với hướng bắc,  $\psi_0$  là hướng đi tính toán sẽ được gửi đến Bộ điều khiển giữ hướng PID. Trong khi đó, hệ số  $CDH$  ( $0 \leq CDH \leq 1$ ) sẽ được tính toán bằng thuật toán logic mờ dựa trên hai thông số là thời gian tiếp cận gần nhất (TCPA) và khoảng cách tiếp cận gần nhất (DCPA).



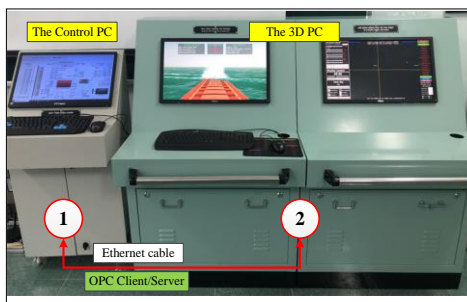
Hình 2.9. Bộ điều khiển quỹ đạo đã xây dựng trong Matlab/Simulink

Sau khi sử dụng thuật toán logic mờ để xác định được hệ số  $CDH$  thì hướng đi mong muốn  $\psi_0$  sẽ được tính toán và so sánh với hướng đi hiện tại  $\psi$  để tính toán ra sai lệch hướng đi. Để điều khiển hướng đi cho tàu theo hướng mong muốn  $\psi_0$ , bộ điều khiển PID sẽ tính toán ra góc bẻ lái đặt gửi tới mô hình máy lái của tàu 3D như sau:

$$\beta_0 = K_p (\Delta\psi) + K_I \int_0^t (\Delta\psi) dt + K_D \frac{d\Delta\psi}{dt} \quad (2.7)$$

trong đó,  $K_p, K_I, K_D$  lần lượt là các hệ số tỷ lệ, tích phân và vi phân, những hệ số này được tự động thay đổi dựa vào bộ hệ số tối ưu theo các điều kiện thời tiết và tải trọng khác nhau mà tàu thực The Prosperity đang sử dụng kết hợp với phương pháp gán điểm cực để kiểm chứng [30]. Ngoài ra,  $\Delta\psi = \psi_0 - \psi$  là sai lệch hướng đi.

## 2.5. Xây dựng mô hình mô phỏng theo phương pháp HIL



Hình 2.10. Mô hình mô phỏng đã được xây dựng theo phương pháp HIL

Mô hình mô phỏng đã được xây dựng như hình 2.10. Trong đó, khối 1 là máy tính điều khiển gồm một màn hình nối với một máy tính công nghiệp đóng vai trò là một bộ điều khiển thực. Khối 2 là máy tính chạy phần mềm Unity chứa mô hình động lực học tàu The Prosperity. Những kịch bản khác nhau như tọa độ tàu chủ, các thông số môi trường (sóng, gió, dòng chảy), v.v. có thể được cài đặt từ khối 2.

Giữa hai khối được kết nối với nhau sử dụng một cáp mạng Ethernet. Máy tính 3D ở khối 2 được cài đặt phần mềm KEPServerEX. Giao thức truyền thông giữa bộ điều khiển trong khối 1 và mô hình tàu trong khối 2 và thời gian lấy mẫu được cài đặt như trong bảng 2.1.

Bảng 2.1. Giao thức truyền thông và thời gian lấy mẫu

Thông số /Đối tác truyền thông	Bộ điều khiển ở khối 1	Mô hình tàu ở khối 2
Giao thức truyền thông với KEPServerEx	OPC Client/Server	Modbus TCP/IP
Thời gian lấy mẫu	100 ms	100 ms

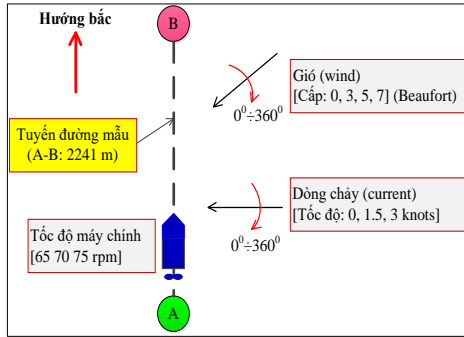
Vì tàu là một đối tượng có quán tính khá lớn nên thời gian lấy mẫu trên là đủ để đảm bảo được tính thời gian thực của mô hình điều khiển.

Mô hình đã xây dựng được kiểm nghiệm với 10 kịch bản với hướng và biên độ nhiễu khác nhau tác động vào tàu. Khi so sánh các kết quả mô phỏng với tập dữ liệu báo cáo buổi trưa của tàu The Prosperity trong từng trường hợp cụ thể, kết quả so sánh đều cho những sai số rất thấp.

## CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG THUẬT TOÁN ĐỊNH TUYẾN HÀNH TRÌNH TÀU THỦY NHẪM TỐI THIỂU HÓA NHIÊN LIỆU TIÊU THỤ

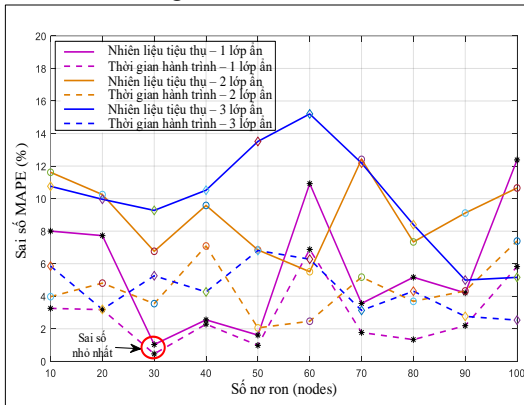
Trong chương này, một mô hình dự báo nhiên liệu tiêu thụ và thời gian di chuyển cho tàu sử dụng mô hình mạng nơ-ron truyền thẳng MLP sẽ được xây dựng. Dựa trên mô hình dự báo đã xây dựng và thuật toán tìm kiếm A\*, 02 thuật toán để tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu sẽ được đề xuất.

### 3.1. Xây dựng mô hình dự báo nhiên liệu tiêu thụ và thời gian hành trình



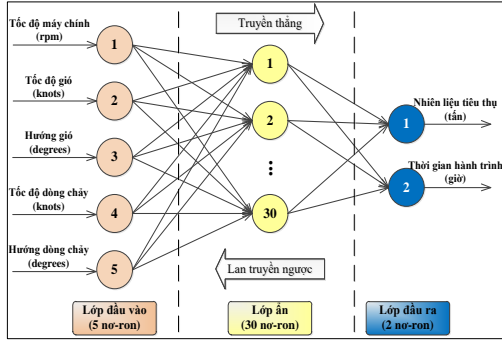
Hình 3.1. Điều khiển tàu đi qua tuyến đường mẫu để xây dựng bộ dữ liệu

Trước tiên, một bộ dữ liệu sẽ được tạo ra để thay thế cho các bộ dữ liệu vận hành trong quá khứ của tàu thực sử dụng mô hình mô phỏng HIL đã xây dựng. Bằng cách thay đổi các thông số tàu và thông số môi trường được minh họa như trên hình 3.1, một bộ dữ liệu gồm 3456 mẫu sẽ được tạo ra để huấn luyện cho mô hình mạng nơ-ron.



Hình 3.2. Ảnh hưởng của việc thay đổi số lớp ẩn và số nơ-ron đến sai số MAPE

Với nhiều ưu điểm và mức độ phổ biến, mạng nơ-ron truyền thẳng MLP là mô hình mạng được chọn lựa để sử dụng trong nghiên cứu này. Theo nhiều nghiên cứu, số lượng lớp ẩn và số nơ-ron trong mỗi lớp ẩn đó lại tùy thuộc vào mỗi bộ dữ liệu [44, 74, 86]. Chính bởi vậy, 30 mô hình với số lượng lớp ẩn và số nơ-ron khác nhau trong lớp ẩn khác nhau được huấn luyện với bộ dữ liệu đã được tạo ra trước đó. Sau đó, 30 mô hình đã luyện sẽ được sử dụng để dự báo với cùng một bộ dữ liệu thử. Mô hình được lựa chọn là mô hình có 1 lớp ẩn và 30 nơ-ron khi mô hình đó dự báo đầu ra với sai số MAPE nhỏ nhất trong tất cả 30 mô hình đã luyện được minh họa như trên hình 3.2.



Hình 3.3. Cấu trúc mạng MLP được chọn với 01 lớp ẩn và 30 nơ-ron

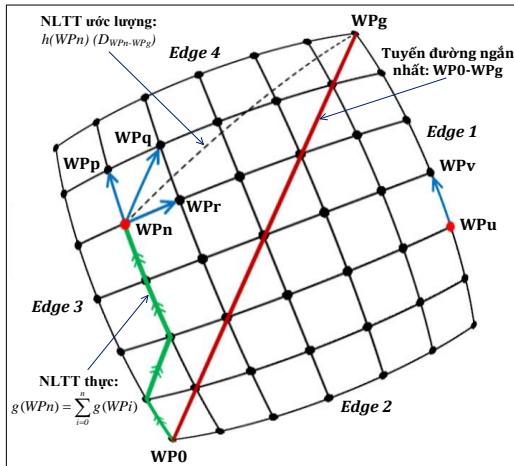
Bởi vậy, mô hình dự báo nhiên liệu và thời gian hành trình được chọn gồm một lớp đầu vào (5 nơ-ron), một lớp ẩn (30 nơ-ron) và một lớp đầu ra (2 nơ-ron), cấu trúc mô hình này thể hiện như hình 3.3.

### 3.2. Xây dựng thuật toán tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu tiêu thụ

#### 3.2.1. Xây dựng đồ thị di chuyển

Trước tiên, để thuật toán có thể hoạt động, một đồ thị di chuyển sẽ cần được xây dựng giữa điểm khởi đầu WP0 và điểm đến WPg.

Trên thực tế, tuyến đường ngắn nhất giữa hai điểm bất kỳ trên trái đất là những đường cong nằm trên cung vòng lớn. Bởi vậy, nghiên cứu này sẽ xây dựng bài toán tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu trên một mặt cong. Đường đi ngắn nhất giữa 2 waypoint bất kỳ sẽ là cung tròn có độ dài được tính theo công thức Haversine. Đồ thị di chuyển được xây dựng giữa WP0 và WPg như thể hiện trên hình 3.4.



Hình 3.4. Đồ thị di chuyển được xây dựng giữa WP0 và WPg

Đường cong màu đỏ là đường đi ngắn nhất giữa WP0 và WPg (nằm trên cung vòng lớn). Từ một điểm waypoint WPn bất kỳ, tàu có thể được di chuyển theo ba hướng là tới các điểm WPP, WPq và WPr. Trong khi đó, những điểm waypoint nằm trên Edge 1 và Edge 4 như WPU thì chỉ có một hướng di chuyển là từ WPU tới WPv. Ngoài ra,  $g(WPn)$  là nhiên liệu tàu tiêu thụ (NLTT) khi nó di chuyển từ WP0 đến WPn,  $h(WPn)$  là NLTT ước lượng nếu tàu di chuyển từ WPn đến WPg.

### 3.2.2. Xây dựng hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu được xây dựng để tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu có ràng buộc về thời gian hành trình tối đa được xây dựng dựa trên cơ sở lý thuyết của thuật toán A\* và bộ dữ liệu đã được xây dựng với hai đầu ra là nhiên liệu tiêu thụ và thời gian hành trình, cụ thể như sau:

$$\text{Minimum} : f(WPn) = h(WPn)_{FC} + \sum_{i=0}^n g(WPi)_{FC} \quad (3.1)$$

Với điều kiện ràng buộc là:

$$\sum_{i=0}^g g(WPi)_{ST} \leq t_{\max} \quad (3.2)$$

trong đó,  $f(WPn)$  là chi phí tổng thể ước lượng của đường đi từ WP0 qua WPn đến điểm đích WPg,  $h(WPn)_{FC}$  là nhiên liệu tiêu thụ ước lượng để tàu di chuyển từ WPn tới WPg,  $g(WPi)_{FC}$  là nhiên liệu tiêu thụ để tàu di chuyển từ điểm WP(i-1) đến WPi,  $\sum_{i=0}^g g(WPi)_{ST}$  là tổng thời gian hành trình của tàu từ WP0 đến WPg trên tuyến đường tối ưu đã tìm,  $t_{\max}$  là thời gian hành trình tối đa cho phép.

Dựa trên hàm mục tiêu này, kết hợp với đồ thị di chuyển và các ma trận chi phí NLTT thực  $\mathbf{G}$ , ma trận chi phí NLTT ước lượng  $\mathbf{H}$  sẽ là cơ sở để xây dựng các thuật toán đề xuất.

### 3.2.3. Xây dựng thuật toán tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu

Thuật toán định tuyến hành trình tối thiểu hóa nhiên liệu tiêu thụ (thuật toán I) được đề xuất có mã giả được trình bày như bảng 3.1.

Thuật toán I sẽ tạo ra hai tập là `open_list` (lưu trữ tất cả waypoints sẽ được duyệt đến để tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu) và `closed_list` (chứa những waypoints đã được duyệt qua khi tìm kiếm). Khi bắt đầu, WP0 sẽ được đưa vào `open_list`. Nhiên liệu tiêu thụ  $f(WP0)$  từ WP0 đến WPg sẽ được gán bằng nhiên liệu tiêu thụ ước lượng  $h(WP0)$  từ WP0 đến WPg.

Một vòng lặp `while` sẽ được sử dụng từ dòng 1 đến dòng 29 để tìm những điểm WP trên tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu và lưu vào `closed_list`, `closed_list` sẽ trả về kết quả chính là tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu gồm một tập hợp các điểm từ WP0 đến WPg.

Khi vận chuyển hàng hóa, sẽ có những chuyến hành trình mà tàu bị giới hạn bởi thời gian vận chuyển hàng hóa. Với ràng buộc thời gian được xét đến tại hàng 4 của bảng 3.1, nếu tổng thời gian hành trình của tàu trên tuyến đường

tối ưu đã tìm được bởi thuật toán đề xuất không thỏa mãn điều kiện thời gian hành trình tối đa ( $t_{max}$ ).

*Bảng 3.1. Mã giả thuật toán I tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu*

<p><b>Input:</b> A graph <math>G=(V \text{ waypoints})</math>, the starting waypoint (WP0) and the arrival waypoint (WPg), <math>t_{max}</math>;</p> <p><b>Output:</b> The optimal fuel route (OFR) from WP0 to WPg;</p> <p><b>Initial:</b></p> <p>open_list=(WP0); closed_list= <math>\emptyset</math>;</p> <p><math>g(\text{WP0})=0</math>; <math>h(\text{WP0})=\text{heuristic\_cost}(\text{WP0}, \text{WPg})</math>;</p> <p><math>f(\text{WP0})=h(\text{WP0})+g(\text{WP0})=h(\text{WP0})</math>;</p>
<pre> 1. While open_list <math>\neq \emptyset</math> 2.     Find the waypoint with the least <math>f(\text{WPn})</math> in the open_list; 3.     If (WPn == WPg) 4.         Return <i>The-first-optimal-fuel-route:First-OFR</i> ; 5.     If( <math>\sum_{i=0}^g g(\text{WPi})_{ST} \leq t_{max}</math> ) 6.         <i>OFR =First-OFR</i>; 7.     else 8.         Find <i>Second-optimal-fuel-route: Second-OFR</i>; 9.         <i>OFR =Second-OFR</i>; 10.    Endif 11.    else 12.        remove WPn from open_list; 13.        add WPn to closed_list; 14.    Endif 15.    For <math>\text{WPm} \in \text{neighbors}(\text{WPn})</math> do % <math>m=p, q, \text{ or } r</math> 16.        current_cost = <math>g(\text{WPn})+\text{cost}(\text{WPn}, \text{WPm})</math>; 17.        If (<math>\text{WPm} \in \text{open\_list} \ \&amp; \ g(\text{WPm}) &gt; \text{current\_cost}</math>) 18.            remove WPm from open_list; 19.        endif 20.        If (<math>\text{WPm} \in \text{closed\_list} \ \&amp; \ g(\text{WPm}) &gt; \text{current\_cost}</math>) 21.            remove WPm from closed_list; 22.        endif 23.        If (<math>\text{WPm} \notin \text{open\_list} \ \&amp; \ \text{WPm} \notin \text{closed\_list}</math>) 24.            add WPm to open_list; 25.            <math>g(\text{WPm}) = \text{current\_cost}</math>; 26.            <math>h(\text{WPm}) = \text{heuristic\_cost}(\text{WPm}, \text{WPg})</math>; 27.            <math>f(\text{WPm}) = g(\text{WPm}) + h(\text{WPm})</math>; 28.        endif 29.    endfor 30. Endwhile 31. Return "Route can not be found"; </pre>

Một thuật toán con được đề xuất để tìm một tuyến đường tối thiểu nhiên liệu khác (không tiết kiệm nhiên liệu như tuyến đường đầu tiên đã tìm) sẽ



được tính toán để đảm bảo thỏa mãn điều kiện ràng buộc đưa ra, mã giả của thuật toán này được thể hiện như trong bảng 3.2.

Bảng 3.2. Mã giả thuật toán con tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu khác thỏa mãn điều kiện ràng buộc

<b>Initial:</b>	
$Current-TFC = +\infty$ ; $p =$ number of waypoints of <i>First-OFR</i> ;	
1.	For $i=1$ to $p$
2.	Remove waypoint $WP_i \in G$ in <i>First-OFR</i> ;
3.	Run <b>ALGORITHM I</b> with graph $G'=(V-WP_i)$ to find <i>OFR</i> ; with: total fuel consumption = $TFC_i$ , total sailing time = $t_i$ ;
4.	If ( $t_i \leq t_{max}$ and $TFC_i \leq Current-TFC$ )
5.	$Second-OFR = OFR_i$ ;
6.	$Current-TFC = TFC_i$ ;
7.	endif
8.	endfor

Trong khi đó, có những chuyến hành trình mà không yêu cầu thời gian vận chuyển hàng hóa nhanh. Khi thuật toán I đã đề xuất được tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu thỏa mãn điều kiện ràng buộc  $t_{max}$ , nếu tổng thời gian hành trình yêu cầu lớn hơn tổng thời gian hành trình với tốc độ khởi tạo 70 rpm trên tuyến đường tối ưu đã tìm được bởi thuật toán I, thuật toán II được đề xuất để tìm một tốc độ đặt cho máy chính phù hợp nhằm giúp tàu có thể tới điểm đến đúng giờ và tiết kiệm tối đa được nhiên liệu tiêu thụ được thể hiện như trong bảng 3.3.

Khi khởi tạo, tốc độ máy chính sẽ được gán  $n_i = 70$  rpm. Ở bước thứ nhất của thuật toán II, mô hình dự báo ANN sẽ được sử dụng để dự báo tổng thời gian hành trình ( $t_i$ ) ứng với tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu đã được tìm ra và tốc độ máy chính ( $n_i$ ) như sau:

$$t_i = \sum_{f=0}^g time(WPf) \quad (3.3)$$

trong đó,  $time(WPf)$  là thời gian hành trình từ  $WP(f-1)$  đến  $WPf$  được dự báo bởi mô hình ANN đã xây dựng,  $WP(f-1)$  và  $WPf$  là những waypoints kề nhau trong tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu đã tìm được bởi thuật toán I.

Ở bước tiếp theo, thuật toán sẽ tính toán giá trị  $\Delta t$  là hiệu của thời gian yêu cầu ( $t_r$ ) và thời gian  $t_i$  ứng với tốc độ  $n_i$ . Nếu  $|\Delta t| \leq DB$  (giá trị deadband) thì tốc độ đề xuất  $n_s = 70$  rpm. Ngược lại, nếu  $|\Delta t| > DB$  sẽ có hai trường hợp xảy ra:

- Trường hợp 1: Nếu  $\Delta t > 0$  thì có nghĩa là nếu tàu chạy với tốc độ mặc định sẽ dư thời gian so với tổng thời gian yêu cầu thì thuật toán II sẽ giảm tốc độ máy chính  $n_i$  xuống 0.1 rpm sau mỗi bước lặp. Giá trị tốc độ mới này sẽ được đưa đến quay về bước thứ nhất để mô hình ANN sẽ dự báo thời gian di chuyển  $t_i$  ứng với giá trị tốc độ  $n_i$  mới.

• Trường hợp 2: Nếu  $\Delta t < 0$  thì nếu tàu chạy với tốc độ mặc định thì tàu sẽ không đến được điểm đích đúng giờ. Do vậy, thuật toán II sẽ tăng tốc độ máy chính  $n_i$  lên 0.1 rpm sau mỗi bước lặp. Quá trình sau đó sẽ diễn ra tương tự như trong trường hợp 1.

Cả hai trường hợp trên sẽ được lặp lại cho đến khi nào  $|\Delta t| \leq DB$  thì tốc độ máy chính đề xuất  $n_s$  sẽ được gán bằng  $n_i$  tại thời điểm đó.

*Bảng 3.3. Mã giả thuật toán tìm tốc độ máy chính phù hợp (thuật toán II)*

<b>Input:</b> Optimal routes were found by Algorithm I; $n_i=n_d$ (70 rpm);
<b>Output:</b> Suggested main engine (ME) speed
<pre> 1. Using the ANN model to predict the sailing time <math>t_i</math> for the optimal    route just found corresponding to the ME speed <math>n_i</math>; 2. Calculate the <math>\Delta t = t_r - t_i</math> % <math>t_r</math> is the required time 3. If <math> \Delta t  &gt; DB</math> % <math>DB</math> is the deadband value 4.   If <math>\Delta t &gt; 0</math> 5.     <math>n_i = n_i - 0.1</math>; 6.     goto 1; 7.   else 8.     <math>n_i = n_i + 0.1</math>; 9.     goto 1 10.  endif 11.  else 12.    Get the suggested speed: <math>n_s = n_i</math>; 13.  endif 14.  end </pre>

## CHƯƠNG 4. THỬ NGHIỆM THUẬT TOÁN ĐỀ XUẤT VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Trong chương này, các kịch bản thử nghiệm sẽ được xây dựng. Ngoài ra, các thuật toán đề xuất trong chương 3 sẽ được thử nghiệm và kiểm chứng sử dụng mô hình mô phỏng HIL.

### 4.1. Xây dựng các kịch bản thử nghiệm và điều kiện ràng buộc

Nhằm mục đích thử nghiệm thuật toán đề xuất, các kịch bản thử nghiệm được xây dựng với hai điểm WP0 và WPg là hai vị trí trên biển Đông có tọa độ như trên hình 4.1. Trong đó, khoảng cách giữa là hai điểm WP0 và WPg là một cung tròn thuộc cung vòng lớn có độ dài cung tròn giữa chúng là 20.953 km. Vì độ dài cung tròn này rất nhỏ so với bán kính trái đất ( $\approx 6371$  km) nên đồ thị di chuyển được xây dựng giữa hai điểm này nhìn sẽ gần như là một lưới phẳng. Đồ thị di chuyển đó và các giả thiết về các điều kiện thời tiết cho từng khu vực được thể hiện như trong hình 4.2.

Các điều kiện thời tiết trong khu vực thử nghiệm được giả định cho từng kịch bản cụ thể như dưới đây:

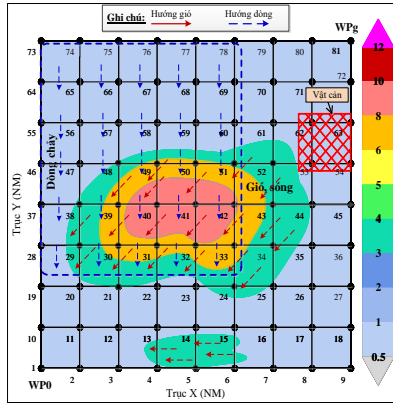
- Kịch bản 1: Sóng và gió sẽ có ở những khu vực có màu sắc khác nhau. Những mũi tên màu đỏ, nét đứt thể hiện hướng của sóng và gió. Tốc độ gió và chiều cao sóng sẽ tương ứng với thang Beaufort (WMO) thể hiện bằng những màu sắc khác nhau được đặt bên phải.

- Kịch bản 2: Ngoài sóng và gió như kịch bản 1 thì còn có thêm sự ảnh hưởng của dòng chảy. Khu vực có dòng chảy là khu vực được thể hiện bằng hình chữ nhật, nét đứt màu xanh. Các mũi tên màu xanh, nét đứt thể hiện hướng của dòng chảy. Tốc độ của dòng chảy được giả thiết là 2 knots trong cả khu vực hình chữ nhật này.

- Kịch bản 3: Đây là kịch bản tương tự như kịch bản 2, tuy nhiên có thêm những khu vực nguy hiểm, có thể xảy ra đâm va. Cụ thể, những khu vực đó được giả định nằm ở các điểm waypoint 53, 54, 62 và 63.



Hình 4.1. Tọa độ điểm WPO và WPg trong khu vực thử nghiệm



Hình 4.2. Đồ thị di chuyển và các điều kiện thử nghiệm trong 3 kịch bản

Trong cả 3 kịch bản, tốc độ đặt cho máy chính được giả thiết là 70 rpm, đây là tốc độ khai thác phổ biến nhất của tàu The Prosperity.

Bên cạnh đó, thời gian hành trình tối đa cho phép ở cả ba kịch bản được lựa chọn là  $t_{max} = 3986$  s. Giá trị thời gian này được chọn dựa trên những giá trị thời gian hành trình tối đa với vận tốc máy chính tương tự của tàu thực trong bản tin báo cáo buổi trưa trong khoảng thời gian 02 năm, giá trị này sẽ là điều kiện ràng buộc của thuật toán I.

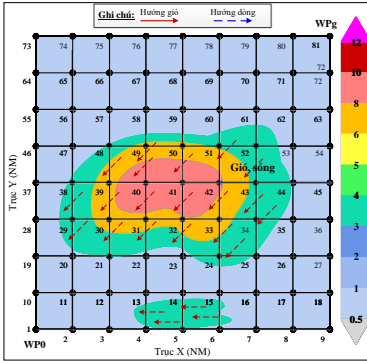
Dựa trên các kịch bản đề xuất, 03 ma trận gồm **WE\_DATA\_1** (cho kịch bản 1), **WE\_DATA\_23** (cho kịch bản 2 và kịch bản 3) được xây dựng để thể hiện hướng và tốc độ của các nhiễu môi trường khi tàu di chuyển từ một điểm WPI đến một điểm WPj trong đồ thị di chuyển đã được quy ước để sử dụng làm dữ liệu vào cho các thuật toán đề xuất.

## 4.2. Thử nghiệm các thuật toán

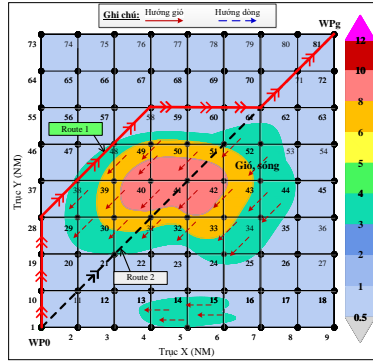
### 4.2.1. Thử nghiệm thuật toán I

Với các ma trận **G1**, **G2**, **G3** và **H** đã được tính toán, kết quả cho từng kịch bản khi chạy thuật toán I được trình bày như sau.

Với kịch bản 1 như hình 4.3, thuật toán I đề xuất tuyến đường Route 1 qua các điểm: 1(WP0)-10-19-28-38-48-58-59-60-61-71-81(WPg) như trên hình 4.4. Để kiểm tra hiệu quả của thuật toán I trong trường hợp này, tàu sẽ được điều khiển đi qua tuyến đường ngắn nhất Route 2.

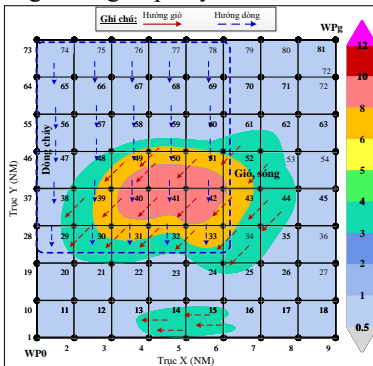


Hình 4.3. Kịch bản 1

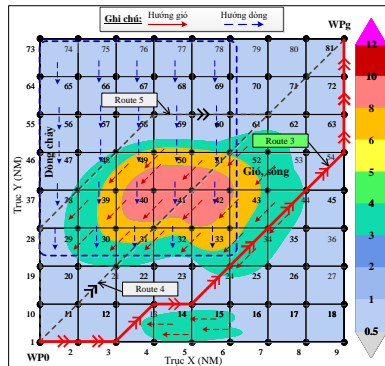


Hình 4.4. Thuật toán I gợi ý Route 1

Với kịch bản 2 như hình 4.5, khi xét thêm sự ảnh hưởng của dòng chảy, thuật toán I gợi ý tàu nên di chuyển theo tuyến đường Route 3 qua các điểm: 1(WP0)-2-3-13-14-24-34-44-54-63-72-81(WPg) thể hiện như trong hình 4.6. Tương tự như trong kịch bản 1, Route 4 (tương tự Route 2) và Route 5 (tương tự như Route 1) sẽ được sử dụng để kiểm tra sự hiệu quả của thuật toán I trong trường hợp này.

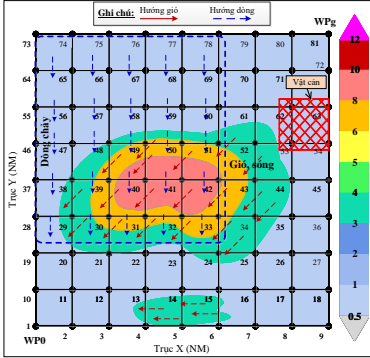


Hình 4.5. Kịch bản 2

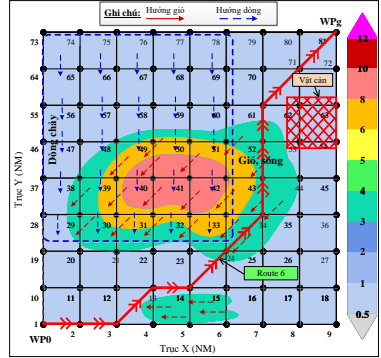


Hình 4.6. Thuật toán I gợi ý Route 3

Trong khi đó, ở kịch bản cuối cùng, với sự xuất hiện của các vật cản ở các điểm waypoint: 53, 54, 62 và 63 như trên hình 4.7, thuật toán I gợi ý cho tàu tuyến đường là Route 6 đi qua các điểm: 1(WP0)-2-3-13-14-24-34-43-52-61-71-81(WPg) như trên hình 4.8 để tránh những nguy cơ có thể xảy ra va chạm.



Hình 4.7. Kịch bản 3



Hình 4.8. Thuật toán I gợi ý Route 6

4.2.2. Thử nghiệm thuật toán II

Sáu trường hợp để tìm tốc độ phù hợp cho 03 tuyến đường đã được gợi ý bởi thuật toán I là Route 1, Route 3 và Route 6 sẽ được sử dụng để thử nghiệm thuật toán II. Với mỗi tuyến đường sẽ đưa ra 2 giá trị thời gian yêu cầu ( $t_r$ ) tàu phải tới WPg khác nhau. Cụ thể, mỗi tuyến đường sẽ đưa ra một giá trị của  $t_r$  nhỏ hơn thời gian  $t_d$  ( $t_d$  là tổng thời gian mà mô hình ANN dự báo tàu cần để có thể di chuyển từ WP0 tới WPg với  $n=70$  rpm). Do đó, thuật toán II sẽ phải gợi ý cho tàu một tốc độ  $> 70$  rpm sao cho tàu có thể tới WPg đúng giờ. Ngược lại, một giá trị của  $t_r$  lớn hơn  $t_d$  sẽ được đưa ra cho cả 03 tuyến đường, thuật toán II sẽ tính toán và gợi ý cho tàu một tốc độ máy chính nhỏ nhất có thể sao cho tàu vừa tiết kiệm nhiên liệu mà vẫn có thể tới điểm đến đúng giờ.

Bảng 4.1. Thử nghiệm thuật toán II với 02 giá trị thời gian yêu cầu ( $t_r$ )

Stt	Trường hợp	Tốc độ $n_d = 70$ rpm		Thời gian yêu cầu $t_r$ (s)	Tốc độ $n_s$ (rpm)
		$t_{3D}$ (s)	NL (kg)		
1	1 (R1)	3886.50	805.61	3780.00	72.30
2	2 (R1)			4200.00	64.40
3	3 (R3)	3888.25	807.05	3780.00	72.40
4	4 (R3)			4200.00	64.50
5	5 (R6)	3885.75	807.41	3780.00	72.30
6	6 (R6)			4200.00	64.50

Kết quả khi chạy thuật toán II được thể hiện như trong bảng 4.1 khi thời gian yêu cầu trong cả 3 tuyến đường đều được giả định với 2 giá trị là  $t_r=3780$  s và  $t_r=4200$  s. Ta thấy rằng, khi  $t_r > t_d$ , thuật toán II đưa ra các tốc độ gợi ý nhỏ hơn tốc độ 70 rpm. Ngược lại, khi  $t_r < t_d$ , thuật toán II sẽ gợi ý các giá trị

tốc độ lớn hơn 70 rpm cho mỗi tuyến đường để tàu có thể đến được điểm đích đúng giờ.

### 4.3. Kiểm chứng, đánh giá thuật toán đề xuất

#### 4.3.1. Kiểm chứng, đánh giá thuật toán I

Bảng 4.2 và hình 4.9 tổng hợp kết quả nhiên liệu tiêu thụ và thời gian di chuyển cho cả 6 tuyến đường từ R1 đến R6.

Kết quả chi tiết khi chạy mô hình mô phỏng HIL với hành trình gợi ý đề xuất bởi thuật toán I được trình bày trong bảng 4.2. Với kịch bản I, thuật toán I đã gợi ý Route 1 là tuyến đường có tổng lượng nhiên liệu tiêu thụ nhỏ nhất. Trong trường hợp này nếu đi theo hành trình Route 1 thì tổng lượng nhiên liệu tiêu thụ được dự báo bởi mô hình ANN là 810.56 kg FO, thời gian di chuyển dự báo là 3908.64 s.

Bảng 4.2. Kết quả tổng hợp với cả 6 tuyến đường

Tuyến	NLTT (kg)			TG (s)		
	Dự báo	Mô hình 3D	Sai số	Dự báo	Mô hình 3D	Sai số
R1	810.56	805.61	0.61%	3908.64	3886.50	0.57%
R2	830.67	812.35	2.26%	3567.33	3513.75	1.52%
R3	813.70	807.05	0.82%	3913.68	3888.25	0.65%
R4	855.48	840.77	1.75%	3664.79	3623.50	1.14%
R5	833.81	827.87	0.72%	4020.31	3993.75	0.67%
R6	816.36	807.41	1.11%	3912.86	3885.75	0.70%

Tổng lượng nhiên liệu tiêu thụ khi chạy mô hình tàu là 805.61 kg FO, sai số 0.61% so với giá trị mô hình ANN dự báo. Trong khi đó, 3886.50 s là thời gian mà mô hình tàu 3D mất để di chuyển từ WP0 đến WPg theo quỹ đường gợi ý này, sai số so với giá trị dự báo của mô hình ANN là 0.57%. Như vậy, ta thấy rằng mô hình dự báo ANN đề xuất cho kết quả dự báo khá tin cậy với sai số nhỏ.

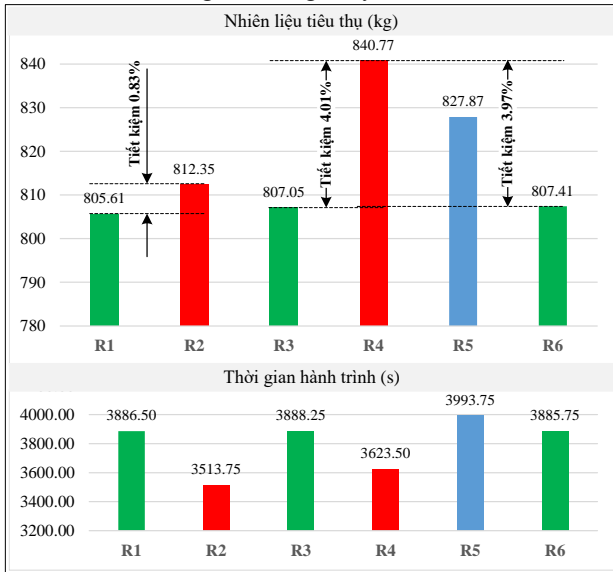
Để kiểm chứng hiệu quả của thuật toán I, quỹ đạo điều khiển được cài đặt để điều khiển mô hình tàu động lực học đi qua tuyến đường ngắn nhất Route 2. Kết quả khi chạy tuyến đường này được tổng hợp trong bảng 4.2. Khi tàu được điều khiển đi qua hành trình này, tổng lượng nhiên liệu tiêu thụ của tàu là 812.35 kg FO (sai số 2.26 % với giá trị dự báo). Trong khi đó, tổng thời gian hành trình của mô hình tàu 3D là 3513.75 s (sai số 1.52 % so với giá trị dự báo).

Như vậy, hiệu quả của thuật toán I trong kịch bản này không cao khi tàu chỉ tiết kiệm được 0.83 % nhiên liệu khi nó đi qua Route 1 so với tuyến đường ngắn nhất. Tàu mất nhiều thời gian di chuyển hơn nhưng tàu lại tiết kiệm được nhiên liệu hơn (tuy không nhiều) và an toàn hơn khi không phải di chuyển qua vùng thời tiết có sóng rất lớn.

Với trường hợp xét thêm sự ảnh hưởng của dòng chảy trong kịch bản 2, thuật toán I gợi ý hành trình Route 3. Tổng lượng nhiên liệu tiêu thụ của tàu khi chạy mô hình HIL với Route 3 là 807.05 kg FO (sai số 0.82 % so với giá

trị dự báo). Trong khi đó, 3888.25 s là thời gian để di chuyển từ WP0 đến WP81 theo quỹ đường gợi ý này (sai số so với giá trị dự báo là 0.65 %). Như vậy, ta thấy rằng ở kịch bản này, sai số giữa giá trị dự báo và dữ liệu chạy mô hình 3D cũng khá nhỏ.

Để kiểm chứng hiệu quả của thuật toán I, tàu được điều khiển đi qua Route 4 và Route 5. Route 4 và Route 5 có tọa độ tương tự như Route 2 và Route 1 nhưng có thêm sự ảnh hưởng của dòng chảy.



Hình 4.9. Nhiên liệu tiêu thụ và thời gian di chuyển của 06 tuyến hành trình

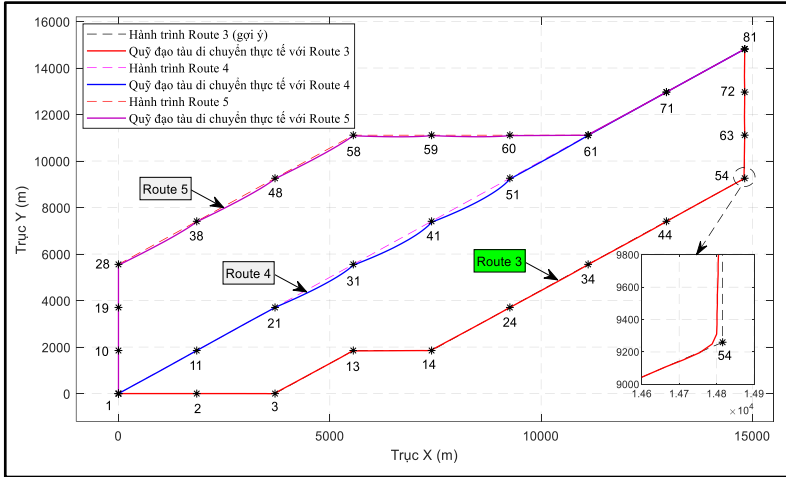
Khi đi qua Route 4, tàu tiêu thụ 840.77 kg FO (sai số 1.75 % so với dự báo). Trong khi đó, thời gian hành trình của tàu là 3623.50 s (sai số 1.14 % so với dự báo). Trong khi đó, khi đi qua Route 5 thì lượng nhiên liệu tiêu thụ của tàu là 827.87 kg FO (sai số 0.72 % với dự báo), tổng thời gian di chuyển của tàu là 3993.75 s (sai số 0.67 % so với dự báo).

Như vậy, trường hợp này thì tàu đã tiết kiệm được 4.01 % nhiên liệu so với Route 4 và 2.51 % so với Route 5, hiệu quả của thuật toán I trong trường hợp này là rất rõ rệt.

Các điều kiện thời tiết trong kịch bản 3 đều giống như kịch bản 2. Tuy nhiên, với giả định các điểm waypoint WP53, WP54, WP62 và WP63 có chương ngại vật và có nguy cơ xảy ra va chạm nếu đi vào. Với trường hợp này, thuật toán I đã gợi ý cho tàu tuyến đường Route 6.

Khi chạy mô hình HIL điều khiển tàu đi qua Route 6 thì tổng lượng nhiên liệu tiêu thụ là 807.41 kg FO, sai số 1.11 % so với giá trị mô hình ANN dự báo. Trong khi đó, 3885.75 s là thời gian mà tàu mất để di chuyển từ WP0

đến WPg theo quãng đường gợi ý này, sai số so với giá trị dự báo của mô hình ANN là 0.70 %. Như vậy, tương tự như hai kịch bản trước, ở kịch bản cuối cùng này thì sai số giữa giá trị dự báo và dữ liệu chạy mô hình 3D cũng không lớn.



Hình 4.10. Quỹ đạo đặt và quỹ đạo thực khi tàu di chuyển qua Route 3, 4, 5

Khi tàu chạy qua Route 6 sẽ tiết kiệm được 3.97 % nhiên liệu so với trường hợp nó chạy qua Route 4. Tuy nhiên, nó lại tiêu thụ nhiều nhiên liệu hơn 0.04 % khi chạy qua Route 3. Lượng nhiên liệu nhiều hơn này khá nhỏ và hoàn toàn chấp nhận được khi tàu đi qua một hành trình an toàn hơn, tránh được những nguy cơ xảy ra đâm va nếu đi vào khu vực nguy hiểm có thể xảy ra đâm va hay mắc cạn.

Hình 4.10 minh họa quỹ đạo đặt và quỹ đạo thực khi điều khiển mô hình tàu đi qua các tuyến đường Route 3, 4, 5.

#### 4.3.2. Kiểm chứng, đánh giá thuật toán II

Khi chạy mô hình mô phỏng HIL với các hành trình là R1, R3 và R6. Trong mỗi hành trình tàu đều được kiểm chứng với 2 tốc độ máy chính gợi ý ( $n_s$ ) bởi thuật toán II, kết quả thu được được thể hiện như trong bảng 4.3 và hình 4.11.

Với các tốc độ gợi ý khác nhau cho máy chính, thời gian hành trình của tàu khi chạy mô hình mô phỏng HIL có sai số rất nhỏ so với thời gian hành trình yêu cầu. Cụ thể, sai số nhỏ nhất là 0.38% với trường hợp 6. Ngược lại, sai số lớn nhất chỉ là 0.51% với trường hợp 1.

Trong khi đó, nếu thời gian yêu cầu lớn hơn so với thời gian mà tàu được dự báo đi với tốc độ mặc định 70 rpm thì tàu có thể tiết kiệm được nhiên liệu lên đến 11.41 % (trường hợp 2 so với trường hợp 1) và vẫn tới điểm đến đúng yêu cầu với sai số chỉ là 0.49 %. Tuy rằng, thời gian hành trình của tàu trong

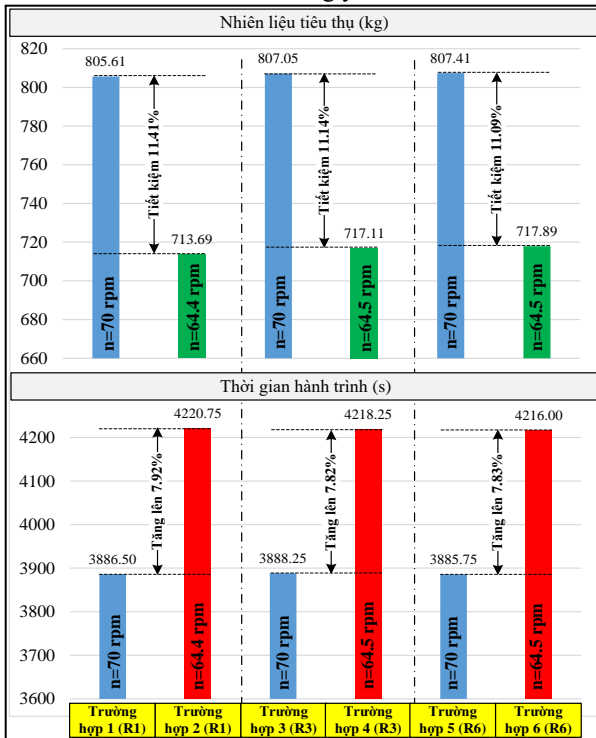


trường hợp này tăng lên 7.92 % so với khi chạy cùng tuyến đường R1 với vận tốc 70 rpm thể hiện trong hình 4.11.

Bảng 4.3. Kiểm chứng thuật toán II với 02 giá trị của thời gian yêu cầu ( $t_r$ ) cho mỗi tuyến

TH	Với $n_d = 70$ rpm		$t_r$ (s)	$n_s$ (rpm)	Với $n_s$ (rpm)		Sai số TG (%)
	$t_{3D}$ (s)	NL (kg)			$t_{3D}$ (s)	NLTT (kg)	
1 (R1)	3886.50	805.61	<b>3780</b>	72.30	<b>3760.75</b>	844.93	<b>0.51%</b>
2 (R1)			<b>4200</b>	64.40	<b>4220.75</b>	713.69	0.49%
3 (R3)	3888.25	807.05	<b>3780</b>	72.40	<b>3762.75</b>	849.61	0.46%
4 (R3)			<b>4200</b>	64.50	<b>4218.25</b>	717.11	0.43%
5 (R6)	3885.75	807.41	<b>3780</b>	72.30	<b>3763.25</b>	848.02	0.44%
6 (R6)			<b>4200</b>	64.50	<b>4216.00</b>	717.89	<b>0.38%</b>

Thuật toán này sẽ rất có ý nghĩa trong những trường hợp mà thời gian hành trình cho phép lớn. Trong trường hợp đó, thuật toán II sẽ tìm được tốc độ nhỏ nhất có thể để có thể giúp cho tàu vừa tiết kiệm được nhiên liệu tiêu thụ mà vẫn tới được điểm đích theo đúng yêu cầu.



Hình 4.11. So sánh lượng nhiên liệu tiết kiệm hơn nhưng thời gian tiêu tốn hơn khi tàu hoạt động ở tốc độ thấp hơn 70 rpm khi  $t_r > t_d$

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### **Kết luận:**

Luận án đã trình bày một phương pháp để tìm tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu tiêu thụ cho tàu thủy nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng nhiên liệu, mang lại hiệu quả kinh tế khi khai thác và giảm ô nhiễm môi trường. Cụ thể, luận án đã đạt được một số kết quả chính như dưới đây.

Trước tiên, luận án đã xây dựng được một mô hình động lực học tàu trong môi trường 3D dựa trên mô hình toán 6 bậc tự do có xét đến cả mô hình toán của cơ cấu chấp hành và các nhiễu môi trường mà hầu hết các nghiên cứu trước đây đều bỏ qua.

Bên cạnh đó, một mô hình tính toán nhiên liệu tiêu thụ áp dụng cho các tàu chở hàng cũng được xây dựng sử dụng phương pháp nội suy và các công thức bán kinh nghiệm làm việc tin cậy với sai số thấp.

Dựa vào hai mô hình trên và một bộ điều khiển quỹ đạo, một mô hình mô phỏng ứng dụng phương pháp HIL cũng được xây dựng để tạo ra một bộ dữ liệu và thử nghiệm các thuật toán. Bộ dữ liệu được tạo ra bằng mô hình mô phỏng HIL được sử dụng để huấn luyện cho một mô hình mạng nơ-ron trong các thuật toán đề xuất.

Với các cơ sở trên, hai thuật toán đã được đề xuất gồm thuật toán I để tìm tuyến đường nhằm tối thiểu hóa nhiên liệu tiêu thụ có ràng buộc về thời gian hành trình tối đa. Bên cạnh đó, thuật toán II cũng được đề xuất để tìm tốc độ máy chính phù hợp trên các tuyến đường tối thiểu hóa nhiên liệu đã tìm được để giúp tàu vừa đạt được mục tiêu đó là tiết kiệm nhiên liệu nhất có thể và vẫn có thể tới điểm đến đúng giờ.

Kết quả khi thử nghiệm thuật toán I cho thấy thuật toán hoạt động hiệu quả khi mang tiết kiệm lên đến **4.01** % trong kịch bản 2. Trong khi đó, thuật toán II có thể tiết kiệm nhiên liệu lên tới **11.41** % khi thời gian hành trình cho phép lớn hơn 7.92% trong trường hợp 2.

### **Kiến nghị:**

Luận án đã sử dụng mô hình mô phỏng HIL để tạo ra bộ dữ liệu nghiên cứu. Tuy nhiên, để giới hạn phạm vi nghiên cứu thì một số thông số đã được giả thiết không đổi như các thông số môn nước và tải trọng tàu. Ngoài ra, khu vực thử nghiệm các thuật toán cũng chưa lớn khi mới giả định điểm khởi đầu và điểm đến cách nhau  $\approx 21$  km.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án là thử nghiệm thuật toán đề xuất dưới tàu thực The Prosperity để so sánh và đánh giá hiệu quả của thuật toán so với các phương pháp định tuyến hiện hành của tàu.

Bên cạnh đó, luận án sẽ phát triển một công cụ dựa trên giao diện lập trình ứng dụng (API) để đưa dữ liệu từ các trang web dự báo thời tiết vào phần mềm Matlab để phát triển thành một hệ thống định tuyến hành trình có thể hoạt động online.

# CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

## I. Công bố trong nước

1. Đoàn Hữu Khánh\*, Đinh Anh Tuấn, Hoàng Đức Tuấn, (2022): *Xây dựng, phân tích động lực học của mô hình tàu container 3D 6 bậc tự do dưới tác động của sóng và gió*, Tạp chí KHCNHH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 72, 11-2022, trang 15-21.
2. Đoàn Hữu Khánh\*, Đinh Anh Tuấn, Hoàng Đức Tuấn, (2022): *Nghiên cứu, xây dựng mô hình thử nghiệm các bộ điều khiển cho các tàu chở hàng, tàu chở container có tương tác với các nhiễu loạn từ môi trường*, Tạp chí Giao thông vận tải, số 729, 5/2023, trang 146-149.
3. Đoàn Hữu Khánh\*, Đinh Anh Tuấn, Hoàng Đức Tuấn, (2023): *Nghiên cứu xây dựng mô hình tính toán nhiên liệu tiêu thụ theo thời gian thực cho tàu thủy sử dụng phương pháp nội suy*, Tạp chí KHCNHH-Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, số 76, 11-2023.
4. Đoàn Hữu Khánh, (2024): *Nghiên cứu, đánh giá ảnh hưởng của các nhiễu môi trường đến vận tốc và nhiên liệu tiêu thụ của tàu sử dụng phương pháp HIL*, Tạp chí Giao thông vận tải, số 64, 3-2024.
5. Đoàn Hữu Khánh\*, Đinh Anh Tuấn, Hoàng Đức Tuấn, (2024): *Nghiên cứu xây dựng phương pháp tìm tuyến đường tối ưu nhiên liệu cho tàu thủy sử dụng mạng nơ-ron và thông tin dự báo thời tiết*, Hội nghị - Triển lãm quốc tế lần thứ 7 về Điều khiển và Tự động hóa (VCCA 2024), trang 1-8.

## II. Công bố quốc tế

6. K. D. Huu, T. D. Anh and T. H. Duc, (2023): *A Real-Time Model Using Interpolation Method and Semi-Empirical Formulas to Estimate Fuel Consumption for Cargo Ships*, 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 932-937. (Scopus)  
<http://doi.org/10.1109/ICIEAM57311.2023.10139155>
7. K. D. Huu, T. D. Anh and T. H. Duc, (2023): *A 3D Dynamic Model Applied for Cargo Ships to Study Ship Motion Control*, 2023 17th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, Romania, 2023, pp. 1-4. (Scopus)  
<http://doi.org/10.1109/EMES58375.2023.10171777>
8. K. D. Huu, T. D. Anh, and T. H. Duc, (2023): *A Hardware-In-The-Loop Simulator to Design and Test Ship Motion Controllers*, 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 398-403. (Scopus)  
<http://doi.org/10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272955>
9. K. D. Huu, T. D. Anh, and T. H. Duc, (2023): *A Neural Network-Based Model to Predict Fuel Consumption and Sailing Time for Cargo Ships*, 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 386-391. (Scopus)  
<http://doi.org/10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272784>

10. Huu-Khanh Doan, Anh-Tuan Dinh, and Duc-Tuan Hoang, (2024): *A route planning method using neural network and HIL technology applied for cargo ships*, International Journal of Electrical and Electronics Research, Volume 12, Issue 1, pp. 111-118. (Scopus)  
<https://doi.org/10.37391/IJEER.120116>
11. Huu-Khanh Doan, Anh-Tuan Dinh, (2024): *A Two-Criteria Weather Routing Method Based on Neural Network and A-star Algorithm*, Majlesi Journal of Electrical Engineering, Volume 18, Issue 2, pp. 1-10. (Scopus)  
<https://dx.doi.org/10.57647/j.mjee.2024.1802.30>
12. K. D. Huu, (2024): *A Speed Prediction Model Using A HIL Simulator and Neural Network for Cargo Ships*, 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 267-272. (Scopus)  
<https://doi.org/10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272784>
13. K. D. Huu, (2024): *Research on Ship Weather Routing Method Based on Dijkstra Algorithm and Neural Network*, 2024 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2024, pp. 739-744. (Scopus)  
<https://doi.org/10.1109/ICIEAM60818.2024.10553838>
14. Huu-Khanh Doan, Manh-Hung Nguyen, Anh-Tuan Dinh, Thi-Hong Bui, (2024): *Research on building an algorithm to find optimal fuel route with time constraints applied to cargo ships*, International Conference on Advanced Intelligent Maritime Safety and Technology (Ai-MAST 2024), Haiphong, Vietnam, pp.141-149.