

TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG VÀ LỰA CHỌN PHƯƠNG ÁN TỐI ƯU
TUYẾN HÀNG HẢI LUỒNG HẢI PHÒNG TRONG ĐIỀU KHIỂN TÀU BIỂN
SIMULATION AND OPTIMIZATION OF MARITIME ROUTES FOR SHIP
NAVIGATION IN HAI PHONG CHANNEL

PHẠM NGUYỄN ĐĂNG KHOA^{1*}, VŨ ĐĂNG THÁI²,
NGUYỄN PHƯỚC QUÝ PHONG³

¹Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh

²Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

³Trường Cao đẳng Hàng hải và Đường thủy II

*Email liên hệ: khoapnd@ut.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10/65154/jmst.953>

Tóm tắt

Bài báo đề xuất một mô hình tối ưu hóa lộ trình tàu biển nhằm đồng thời giảm tiêu thụ nhiên liệu và bảo đảm an toàn hàng hải. Cách tiếp cận được xây dựng dựa trên việc tích hợp dữ liệu Hệ thống nhận dạng tự động (AIS) và thông tin hải văn - khí tượng (metocean) để mô phỏng điều kiện hoạt động thực tế. Mức tiêu hao nhiên liệu được ước lượng từ quan hệ giữa tốc độ, lực cản thủy động và điều kiện môi trường, trong khi rủi ro hàng hải được đánh giá dựa trên mật độ giao thông và khu vực nguy hiểm. Bài toán tối ưu đa mục tiêu được giải bằng thuật toán di truyền không trội NSGA-II, cho phép tìm ra tập nghiệm Pareto thể hiện sự đánh đổi giữa thời gian hành trình, tiêu thụ nhiên liệu và mức độ rủi ro. Nghiên cứu được kiểm chứng trên kịch bản mô phỏng tàu hành hải qua luồng Hải Phòng, cho thấy mô hình có thể đề xuất các lộ trình thay thế với chi phí nhiên liệu giảm đáng kể mà vẫn duy trì mức an toàn cao. Kết quả góp phần cung cấp công cụ hỗ trợ ra quyết định cho sỹ quan điều khiển tàu biển và quản lý giao thông biển.

Từ khóa: Tối ưu lộ trình, NSGA-II, tiêu thụ nhiên liệu, an toàn hàng hải, dữ liệu AIS, dữ liệu metocean, luồng Hải Phòng.

Abstract

This paper proposes a ship route optimization model that simultaneously minimizes fuel consumption and ensures maritime safety. The approach integrates Automatic Identification System (AIS) data with metocean information to simulate realistic operating conditions. Fuel consumption is estimated from the relationship

between vessel speed, hydrodynamic resistance, and environmental conditions, while maritime risk is assessed based on traffic density and hazardous zones. The multi-objective optimization problem is solved using the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), yielding a Pareto set that represents trade-offs between voyage time, fuel consumption, and risk level. The proposed method is validated through a simulated scenario of a cargo vessel navigating the Hai Phong channel, demonstrating its capability to suggest alternative routes that significantly reduce fuel costs while maintaining high safety standards. The results provide a valuable decision-support tool for bridge officers and operational managers.

Keywords: Route optimization, NSGA-II, fuel consumption, maritime safety, AIS data, metocean data, Hai Phong channels.

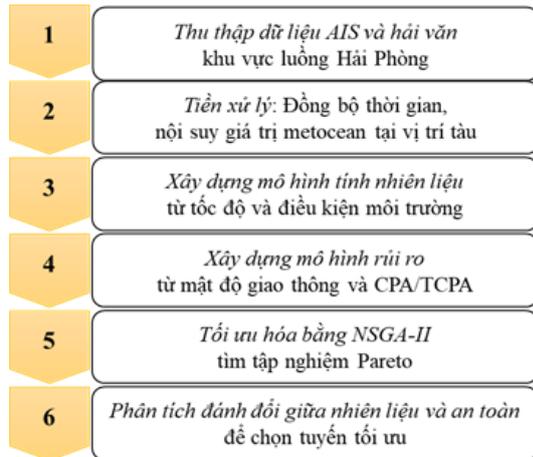
1. Đặt vấn đề

Sự gia tăng lưu lượng tàu thuyền tại các luồng hàng hải quan trọng, đặc biệt ở khu vực cửa biển và cảng biển, đặt ra thách thức lớn đối với công tác bảo đảm an toàn hàng hải. Luồng Hải Phòng là một trong những tuyến vận tải biển quan trọng nhất ở miền Bắc Việt Nam, với mật độ tàu dày đặc và điều kiện thủy văn, khí tượng phức tạp. Trong môi trường hoạt động này, nguy cơ va chạm tàu luôn tiềm ẩn, đặc biệt khi tầm nhìn hạn chế, dòng chảy mạnh hoặc khi tàu vận hành ở tốc độ cao trong không gian hạn chế.

Hệ thống nhận dạng tự động (AIS) đã trở thành công cụ tiêu chuẩn toàn cầu trong giám sát giao thông hàng hải, cung cấp dữ liệu liên tục về vị trí, tốc độ và hướng đi của tàu. Tuy nhiên, dữ liệu AIS thuần túy chưa phản ánh đầy đủ các yếu tố môi trường như sóng,

gió và dòng chảy, vốn ảnh hưởng đáng kể đến quỹ đạo di chuyển và khả năng điều động của tàu. Dữ liệu hải văn - khí tượng (metocean) có thể bổ sung thông tin này, giúp nâng cao độ chính xác trong mô phỏng và dự báo nguy cơ va chạm. Việc tích hợp dữ liệu AIS và metocean cho phép tính toán khoảng cách tiếp cận gần nhất (CPA) và thời gian tới CPA (TCPA) một cách sát thực tế hơn, từ đó phát hiện sớm tình huống nguy hiểm.

Tính đến thời điểm hiện tại, trên thế giới, một số nghiên cứu hướng tới mục tiêu tối ưu thời gian hành trình hay giảm thiểu tiêu hao nhiên liệu [4], [5], có sử dụng thuật toán tiến hóa NSGA-II cho mục tiêu đó trên vùng biển rộng lớn [3], tích hợp vào ECDIS [2], hay tận dụng dữ liệu AIS cho tính toán tối ưu tuyến đường [6], tính tới cả các điều kiện khí tượng thủy văn [1], [7]. Tuy nhiên, chưa có nghiên cứu công bố nào kể cả tại Việt Nam hay trên thế giới kết hợp tối ưu hóa đa mục tiêu vừa giảm tiêu hao nhiên liệu vừa nâng cao an toàn hàng hải và được triển khai trong phạm vi nhỏ như khu vực luồng Hải Phòng, đặc biệt sử dụng dữ liệu AIS kết hợp metocean và giải bằng thuật toán tiến hóa NSGA-II.



Hình 1. Lý thuyết thực hiện nghiên cứu (giai đoạn 2015-2024)

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

2.1. Quy trình thực hiện nghiên cứu

Lý thuyết quy trình thực hiện nghiên cứu được thể hiện trong Hình 1.

Cụ thể, nghiên cứu được thực hiện theo 6 bước chính: Đầu tiên, thu thập dữ liệu AIS và hải văn (metocean) khu vực khảo sát. Sau đó, thực hiện tiền xử lý gồm 2 thao tác chính là đồng bộ thời gian các tàu tại khu vực để có được bản đồ mật độ 2D đồng nhất và nội suy giá trị metocean tương ứng tại vị trí

mỗi tàu. Bước thứ ba, xây dựng mô hình tính nhiên liệu từ tốc độ và điều kiện môi trường tương ứng, mô hình xử lý này sẽ cho ra kết quả tiêu hao nhiên liệu từ công thức (3). Đồng thời, bước thứ tư là xây dựng mô hình rủi ro từ mật độ giao thông và CPA/TCPA chủ yếu đã được mô tả theo công thức (4). Sau khi đã có giá trị tiêu hao nhiên liệu và rủi ro tương ứng, bước tiếp theo là tối ưu hóa bằng NSGA-II để tìm tập nghiệm Pareto thể hiện các kết quả phù hợp trước khi đưa ra kết quả tối ưu nhất. Cuối cùng là phân tích đánh đổi giữa nhiên liệu và an toàn để chọn tuyến tối ưu.

2.2. Mô hình tiêu hao nhiên liệu

Mức tiêu thụ nhiên liệu của tàu thường được ước lượng thông qua mối quan hệ giữa tốc độ hành trình, lực cản và công suất máy chính. Tổng lực cản R_{total} của tàu trong điều kiện môi trường được tính theo công thức (1) sau:

$$R_{total} = R_{calm} + R_{wind} + R_{wave} + R_{current} \quad (1)$$

Trong đó:

R_{calm} : Lực cản trong điều kiện nước lặng, hàm theo tốc độ tàu V .

R_{wind} , R_{wave} , $R_{current}$: Các thành phần lực cản bổ sung do gió, sóng và dòng chảy, tính từ dữ liệu metocean.

Công suất yêu cầu P_{req} để duy trì tốc độ V được xác định bởi công thức (2):

$$P_{req} = \frac{R_{total} * V}{\eta} \quad (2)$$

Với η là hiệu suất truyền động.

Lượng nhiên liệu tiêu thụ trong quãng đường d được tính theo công thức (3):

$$Fuel = \frac{P_{req} * t * SFOC}{1000} \quad (3)$$

Trong đó SFOC (Specific Fuel Oil Consumption) là mức tiêu hao nhiên liệu riêng (g/kWh).

2.3. Mô hình rủi ro hàng hải

Rủi ro hàng hải trong nghiên cứu này được định lượng dựa trên mật độ giao thông và nguy cơ va chạm, trong đó:

- Mật độ giao thông (Traffic Density): Tính từ dữ liệu AIS bằng cách chia vùng nghiên cứu thành lưới (grid) và đếm số lần tàu xuất hiện trong mỗi ô.

- Nguy cơ va chạm (Collision Risk): Xác định từ chỉ số CPA/TCPA giữa các tàu; rủi ro tăng khi CPA nhỏ hơn ngưỡng an toàn và TCPA nhỏ hơn thời gian phản ứng tối thiểu.

Chỉ số rủi ro tổng hợp:

$$Risk\ Index = w_1 * f_{density} + w_2 * f_{\frac{CPA}{TCPA}} \quad (4)$$

Với w_1, w_2 là trọng số phản ánh tầm quan trọng của từng yếu tố.

2.4. Bài toán tối ưu đa mục tiêu

Bài toán được mô hình hóa với hai hàm mục tiêu chính:

$$\min F_1 = Fuel(Route) \quad (5)$$

$$\min F_2 = Risk(Route) \quad (6)$$

Các điều kiện ràng buộc để đảm bảo việc tính toán là đảm bảo không vượt qua các giới hạn an toàn:

$$Route \in \text{Tập các tuyến khả thi} \quad (7)$$

$$V_{min} \leq V \leq V_{max} \quad (8)$$

$$CPA \geq D_{safe} \quad (9)$$

2.5. Thuật toán NSGA-II

Một cá thể x được biểu diễn bởi tọa độ các waypoint trung gian:

$$x = (x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, \dots, x_n, y_n)$$

tạo thành tuyến đường $P(x)$ từ điểm xuất phát đến điểm đích [8].

Hai hàm mục tiêu:

1) Tiêu hao nhiên liệu ($F1$)

Công suất thủy động được ước lượng theo quan hệ:

$$P \propto V_{tw}^\alpha \quad (10)$$

Trong đó V_{tw}^α là vận tốc tàu so với nước, α thường nằm trong khoảng 2.5 đến 3.5.

Nhiên liệu tiêu thụ dọc tuyến:

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^{m-1} P_i \cdot \frac{L_i}{V_{g,i}} \quad (11)$$

Với L_i là độ dài đoạn, $V_{g,i} = V_{tw} + u_i$, e_i là tốc độ thực địa (SOG), u_i là vector dòng chảy, e_i là vector đơn vị theo hướng đoạn.

2) Rủi ro hàng hải ($F2$)

Dùng KDE với hạt nhân Gaussian:

$$\rho(P) = \sum_{j=1}^k \exp\left(-\frac{\|p-\mu_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

Bảng 1. Thông tin dữ liệu AIS theo dõi và thu thập của mỗi tàu

MMSI	Timestamp	Latitude	Longitude	SOG	COG	Heading	NavStatus
100000001	8/12/2025 0:00	20.76951	106.8116	9.385548	53.51521	53.51521	Under way
100000001	8/12/2025 0:01	20.77106	106.8139	9.605253	54.1219	54.1219	Under way
100000001	8/12/2025 0:02	20.77263	106.8162	9.730097	51.24541	51.24541	Under way
100000001	8/12/2025 0:03	20.77432	106.8185	10.01204	53.24007	53.24007	Under way
100000001	8/12/2025 0:04	20.77598	106.8208	9.839446	51.33101	51.33101	Under way
100000001	8/12/2025 0:05	20.77769	106.8231	9.649489	50.15647	50.15647	Under way
100000001	8/12/2025 0:06	20.77941	106.8253	9.664343	49.74814	49.74814	Under way
...

Trong đó μ_j là tọa độ điểm mật độ cao, σ là tham số trơn.

Rủi ro tích lũy:

$$F_2(x) = \sum_{i=1}^{m-1} \bar{p}_i \cdot L_i \quad (13)$$

Với \bar{p}_i là mật độ trung bình trên đoạn i .

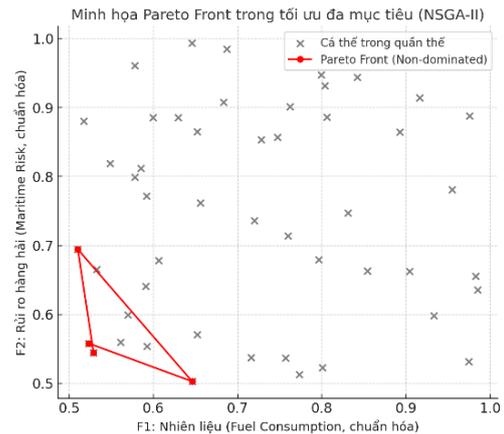
Phân loại không trội (Non-dominated sorting)

Một nghiệm x^a không bị trội bởi x^b nếu:

$$\begin{cases} \forall j, F_j(x^a) \leq F_j(x^b) \\ \exists k: F_k(x^a) < F_k(x^b) \end{cases} \quad (14)$$

Tập nghiệm không trội cấp 1 (Pareto front) gồm các cá thể không bị trội bởi bất kỳ cá thể nào khác trong quần thể. Thuật toán lặp lại việc phân tầng (front 1, front 2,...) cho đến khi xếp hạng toàn bộ cá thể [8].

Cuối cùng là chọn lọc và bảo toàn (*elitism*), cá thể được chọn dựa trên thứ hạng front và khoảng cách đám đông (*crowding distance*) để duy trì đa dạng [8]. Kết quả sau khi tính toán với thuật toán NSGA-II được mô tả ví dụ trong Hình 2.

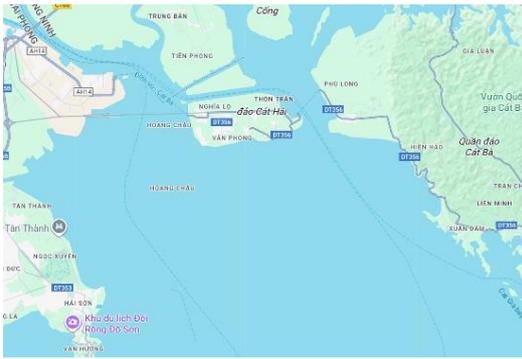


Hình 2. Ví dụ minh họa kết quả của Pareto Front trong tối ưu đa mục tiêu

3. Dữ liệu và kịch bản tính toán mô phỏng

3.1. Phạm vi nghiên cứu mô phỏng

Khu vực luồng hàng hải Hải Phòng được chọn làm vùng thử nghiệm được mô tả như Hình 3. Cụ thể:



Hình 3. Khu vực bồi cảnh luồng Hải Phòng áp dụng mô phỏng

Giới hạn tọa độ:

- Vĩ độ: 20,68 độ Bắc đến 20,88 độ Bắc;
- Kinh độ: 106,75 Đông đến 107,05 độ Đông.

Đặc điểm của khu vực: Cửa vào luồng chính, mật độ tàu cao, nhiều khúc cua, tác động mạnh của thủy triều và dòng chảy.

3.2. Dữ liệu AIS

Dữ liệu AIS cung cấp thông tin thời gian thực về vị trí, tốc độ, hướng và trạng thái điều hướng của tàu.

Trong nghiên cứu, dữ liệu AIS được thu thập từ nguồn dữ liệu công khai và sử dụng như nguồn dữ liệu mô phỏng tái tạo hành vi tàu trong khu vực luồng Hải Phòng.

Thông tin AIS thu thập và sử dụng được mô tả trong Bảng 1, gồm các thông tin định lượng:

- MMSI - Mã nhận dạng tàu; Thời gian (UTC);
- Tọa độ tàu (Latitude, Longitude);
- Tốc độ đối với mặt đất - SOG (Speed Over Ground);
- Hướng di chuyển - COG (Course Over Ground);
- Hướng mũi tàu - Heading;
- Trạng thái tàu - Navigation Status.

Dữ liệu này được dùng để xác định mật độ giao thông, tính CPA/TCPA và phục vụ mô hình tính toán rủi ro xảy ra va chạm.

3.3. Dữ liệu metocean

Dữ liệu metocean được sử dụng để mô tả điều kiện môi trường tác động đến lực cản và tiêu hao nhiên liệu. Các thông số chính gồm:

- 1) Gió: Tốc độ, hướng.
- 2) Sóng: Chiều cao sóng, chu kỳ sóng, hướng sóng.
- 3) Dòng chảy bề mặt: Tốc độ, hướng.

Nguồn dữ liệu có thể từ nhiều nguồn như: Mô hình hải dương toàn cầu (HYCOM, Copernicus Marine

Service); trạm trắc hoặc radar biển ven bờ; hay dữ liệu mô phỏng cho thử nghiệm.

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng dữ liệu metocean linh hoạt từ những nguồn khác nhau để áp dụng cho nhiều điều kiện mô phỏng khác nhau. Giá trị của metocean được nội suy về vị trí và thời điểm của từng bản ghi AIS để tính lực cản bổ sung và điều chỉnh tốc độ hiệu dụng của tàu.

3.4. Thiết lập kịch bản mô phỏng

Mục tiêu của mô phỏng là đánh giá hiệu quả của mô hình tối ưu hóa đa mục tiêu trên các điều kiện hoạt động thực tế. Các thông số kịch bản gồm:

- i) *Thông số tàu chủ:* Tàu container trọng tải 14.000DWT (tương đương 1.020 TEU) dài 148m, mớn nước 6,2m, công suất máy chính 4750kW, tốc độ tại thời điểm bắt đầu tính toán mô phỏng là 9,3knots.
- ii) *Số lượng tàu:* 2-6 tàu di chuyển đồng thời.
- iii) *Thời gian hành trình mô phỏng:* 2-6 giờ, đủ để phản ánh biến động môi trường.

iv) *Lưới không gian:* Luồng được chia thành các ô lưới (grid) $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ để tính mật độ tàu và chi phí nhiên liệu trên từng đoạn.

v) *Ma trận chi phí:*

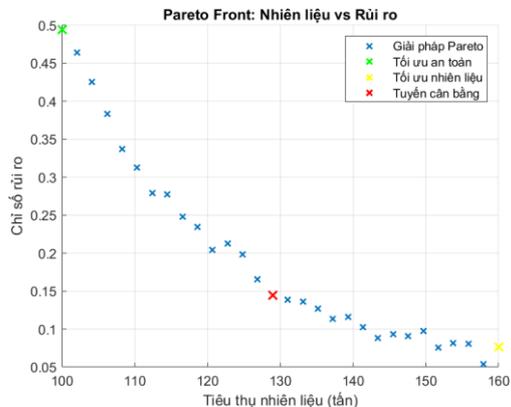
- Thành phần 1: Chi phí nhiên liệu (g/kWh) dựa trên lực cản và tốc độ hiệu dụng. Thông số được trực quan bằng lượng tiêu thụ trong toàn bộ tuyến đường xác định (đơn vị là Tấn).

- Thành phần 2: Chỉ số rủi ro (0-1) dựa trên mật độ AIS và CPA/TCPA.

vi) *Điều kiện ràng buộc:*

- Giới hạn tốc độ: 6-15 knots.
- Tránh vùng nguy hiểm (đá ngầm, khu neo đậu, khu vực cấm).

vii) *Đầu ra mô phỏng:*



Hình 4. Pareto Front đặc trưng khu vực cửa luồng Hải Phòng

- Tập nghiệm Pareto giữa nhiên liệu và rủi ro;
- Lộ trình tối ưu đề xuất;
- Biểu đồ đánh đổi giữa hai mục tiêu.

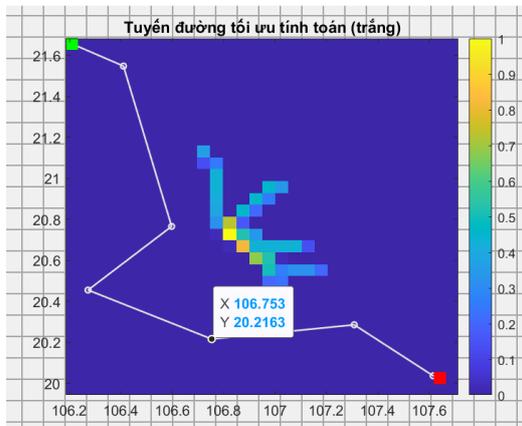
vii) Công cụ tính toán mô phỏng: Phần mềm tính toán mô phỏng Matlab với các hàm thuật toán trong ứng tích hợp và dữ liệu xây dựng bổ sung.

4. Kết quả tính toán và thảo luận

4.1. Kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu

Mô hình NSGA-II được áp dụng cho kịch bản 2-6 tàu di chuyển liên tục trong luồng Hải Phòng, với dữ liệu AIS và metocean mô phỏng trong 4 giờ. Kết quả cho thấy thuật toán hội tụ sau khoảng 120 thế hệ, thu được tập nghiệm Pareto biểu diễn mối quan hệ đánh đổi giữa tiêu thụ nhiên liệu và rủi ro hàng hải. Một trường hợp cụ thể được thể hiện trong Hình 4.

Từ kết quả mô tả trong Hình 4 cho thấy: Các nghiệm ở phía trái của Pareto front ưu tiên tiết kiệm nhiên liệu nhưng chấp nhận rủi ro cao hơn. Các nghiệm ở phía phải ưu tiên an toàn với chi phí nhiên liệu tăng do tránh vùng mật độ tàu cao hoặc dòng chảy bất lợi. Và một số nghiệm cân bằng (*balanced solutions*) đạt giảm nhiên liệu khoảng 12% so với tuyến ngắn nhất, đồng thời giảm rủi ro tới gần 25% so với tuyến tiết kiệm nhiên liệu tuyệt đối.

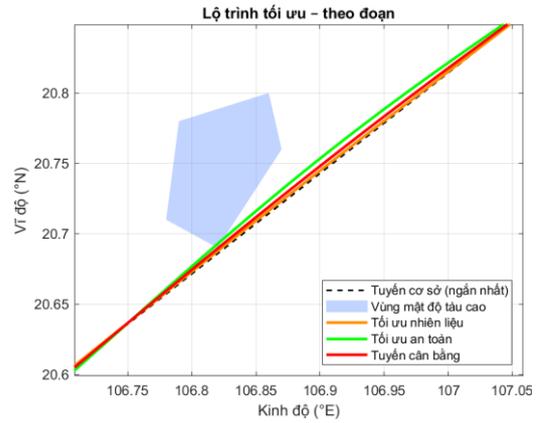


Hình 5. Tuyến đường tối ưu mà mô hình đề xuất

Biểu đồ Pareto cũng cho thấy quan hệ phi tuyến giữa hai mục tiêu: Giảm 5% nhiên liệu thường chỉ làm tăng rủi ro từ 3 đến 4%. Tuy nhiên, giảm thêm 10% nhiên liệu so với mức này có thể làm rủi ro tăng hơn 15%, cho thấy ngưỡng đánh đổi không hiệu quả. Ngược lại, giảm rủi ro từ 25% xuống 10% so với mức cao nhất đòi hỏi tăng tiêu thụ nhiên liệu hơn 20%.

4.2. Tính toán lộ trình tối ưu

Trong phạm vi bài báo không thể hiện hết được toàn bộ thời gian và kết quả tính toán nên tác giả lựa



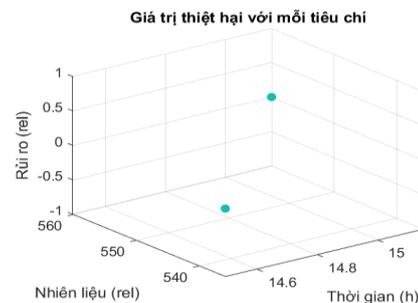
Hình 6. Lộ trình tối ưu chi tiết theo đoạn

chọn một thời điểm ngẫu nhiên và điểm đầu (màu xanh lá cây) điểm cuối (màu đỏ) bất kỳ, với các điểm nhiều màu sắc đại diện cho dữ liệu vị trí tàu ở cùng thời điểm và trạng thái rủi ro cũng như bị ảnh hưởng hải văn của mỗi tàu. Mô hình tính toán và xử lý đưa ra tuyến đường tối ưu như Hình 5.

Kết quả lộ trình tối ưu chi tiết theo từng đoạn bất kỳ trong khu vực biển ít cạt qua khu vực giao thông đông đúc (vùng mật độ tàu cao) được thể hiện trong Hình 6 và giá trị thiệt hại tương ứng với mỗi tiêu chí cũng được thể hiện trong Hình 7. Theo đó, với việc lựa chọn tối ưu rủi ro ($R_{ii} = 0$), xuất hiện hai phương án tương ứng với các tiêu hao về nhiên liệu và thời gian theo tiêu chí an toàn nhất (chấm phải) và cân bằng nhất (chấm trái).

Hình 8 thể hiện kết quả thực địa tuyến đường tối ưu giữa 2 điểm lựa chọn bất kỳ tại khu vực lối vào luồng Hải Phòng được mô hình tính toán và đề xuất. Trong đó khu vực có ranh giới màu đỏ là khu vực có mật độ giao thông đông đúc, phức tạp.

Kết quả từ những bản đồ lộ trình cho thấy: Tuyến tối ưu nhiên liệu thường đi theo hướng thẳng hơn, tận dụng dòng chảy xuôi nhưng cạt qua khu vực có mật độ giao thông cao. Tuyến tối ưu an toàn uốn theo các



Hình 7. Giá trị thiệt hại tính toán tương ứng với mỗi tiêu chí



Hình 8. Kết quả tính toán thực địa các tuyến đường tương ứng

đoạn luồng rộng, tránh khu neo đậu và vùng mật độ AIS cao, nhưng tăng chiều dài quãng đường và thời gian hành trình. Tuyến cân bằng chọn lối đi vừa đủ để giảm rủi ro mà vẫn giữ chi phí nhiên liệu ở mức hợp lý.

4.3. Thảo luận

Việc tích hợp dữ liệu AIS và metocean giúp mô hình phản ánh đúng điều kiện hoạt động, đặc biệt là tác động của dòng chảy và gió tới cả nhiên liệu và rủi ro.

Kết quả chứng minh rằng tối ưu hóa đa mục tiêu bằng NSGA-II có thể tìm ra các lộ trình khả thi mà các phương pháp đơn mục tiêu (quãng đường ngắn nhất) thường bỏ qua.

Mô hình này có thể tích hợp trực tiếp vào hệ thống hỗ trợ ra quyết định cho sỹ quan điều khiển tàu biển hoặc nhân viên VTS, cho phép lựa chọn phương án phù hợp theo ưu tiên vận hành (an toàn, kinh tế, hay nhanh chóng,...).

Tuy nhiên, nghiên cứu mới thử nghiệm với dữ liệu mô phỏng và dữ liệu AIS thực tế có thể chứa sai số vị trí, khoảng thời gian cập nhật không đều nên vẫn còn tồn tại sai số trong tính toán và nhiều khi áp dụng.

5. Kết luận

Bài báo đã đề xuất xây dựng một mô hình tối ưu hóa lộ trình tàu đa mục tiêu dựa trên dữ liệu AIS và metocean, với hai tiêu chí chính: Giảm tiêu thụ nhiên liệu và nâng cao an toàn hàng hải. Mô hình tính toán nhiên liệu dựa trên lực cản tổng hợp (gió, sóng, dòng chảy) và mô hình rủi ro dựa trên mật độ giao thông cùng chỉ số CPA/TCPA. Thuật toán NSGA-II được sử dụng để tìm tập nghiệm Pareto, cho phép phân tích đánh đổi giữa hai mục tiêu. Kết quả mô phỏng tại luồng Hải Phòng cho thấy:

- Mô hình có khả năng đề xuất các lộ trình cân bằng, vừa tiết kiệm nhiên liệu vừa giảm đáng kể rủi ro;
- So với tuyến ngắn nhất, lộ trình tối ưu cân bằng giúp giảm khoảng 12% nhiên liệu và giảm gần 25%

chỉ số rủi ro;

- Phương pháp phù hợp để tích hợp vào các hệ thống hỗ trợ quyết định hàng hải, đặc biệt ở các khu vực luồng hẹp và mật độ giao thông cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Abdalsalam and J. Szałpczyńska (2025), *Towards improved ship weather routing through multi-objective optimization with high performance computing support*, TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.19, No.1, pp.93-103.
- [2] Z. Gao, Y. Li, and J. Cui (2020), *A multi-objective routing optimization model for ship intelligent navigation*, Journal of Physics: Conference Series, Vol.1684, No.1, p. 012115.
- [3] Y. Guo, Y. Wang, Y. Chen, L. Wu, and W. Mao (2024), *Learning-based Pareto-optimum routing of ships incorporating uncertain meteorological and oceanographic forecasts*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol.192, p. 103786.
- [4] W. Ma, D. Ma, Y. Ma, J. Zhang, and D. Wang (2021), *Green maritime: a routing and speed multi-objective optimization strategy*, Journal of Cleaner Production, Vol.305, p. 127179.
- [5] N. Sharif et al. (2024), *Multi-objective vessel routing problems with safety considerations: A review*, Maritime Transport Research, Vol.7, p. 100122.
- [6] X. Yuan, J. Wang, G. Zhao, and H. Wang (2024), *Comprehensive study on optimizing inland waterway vessel routes using AIS data*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.12, No.10, p. 1775.
- [7] S. Zhao and S. Zhao (2024), *Ship global traveling path optimization via a novel non-dominated sorting genetic algorithm*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.12, No.3, p. 485.
- [8] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan (2002), *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No.2, pp.182-197.

Ngày nhận bài:	30/08/2025
Ngày nhận bản sửa:	11/12/2025
Ngày duyệt đăng:	15/12/2025