

ĐÁNH GIÁ TAI NẠN HÀNG HẢI THEO PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG MẬT ĐỘ KDE KẾT HỢP KỸ THUẬT PHÂN CỤM ST-CLUSTERING

EVALUATION OF MARITIME ACCIDENTS USING KERNEL DENSITY ESTIMATION COMBINED WITH SPATIOTEMPORAL CLUSTERING

VŨ ĐĂNG THÁI^{1*}, NGUYỄN BÁ THẮNG¹, ĐẶNG ĐÌNH CHIẾN²

¹Khoa Hàng hải, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Viện Đào tạo quốc tế, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.881>

Tóm tắt

Nghiên cứu này tập trung phân tích sự dịch chuyển không gian và thời gian của các tai nạn hàng hải trên phạm vi toàn cầu trong giai đoạn 2005-2025 bằng cách kết hợp hai phương pháp: ước lượng mật độ hạt nhân (KDE) và phân cụm không gian - thời gian (ST-Clustering). Phương pháp KDE được sử dụng để xác định và trực quan hóa các khu vực có mật độ tai nạn cao theo thời gian, trong khi kỹ thuật ST-Clustering cho phép nhận diện các cụm tai nạn có tính tương đồng về vị trí và thời điểm xảy ra. Kết quả cho thấy sự hình thành và dịch chuyển của các vùng tai nạn trọng điểm có liên quan chặt chẽ đến các tuyến hàng hải chính, sự thay đổi lưu lượng vận tải biển, cũng như các yếu tố địa chính trị và khí hậu. Nghiên cứu cung cấp bằng chứng thực tiễn hỗ trợ công tác quản lý rủi ro và hoạch định chính sách an toàn hàng hải hiệu quả hơn trong bối cảnh giao thông biển ngày càng thay đổi phức tạp.

Từ khóa: Tai nạn hàng hải, phân tích dữ liệu, chuyển dịch dữ liệu, ước lượng mật độ hạt nhân, phân cụm không gian - thời gian.

Abstract

This study investigates the spatiotemporal dynamics of maritime accidents worldwide during the period 2005-2025 by integrating two analytical methods: Kernel Density Estimation (KDE) and Spatio-Temporal Clustering (ST-Clustering). KDE is employed to identify and visualize high-density accident areas over time, while ST-Clustering techniques detect clusters of accidents sharing spatial and temporal similarities. The results reveal the emergence and shift of accident hotspots closely associated with major shipping routes, variations in maritime traffic flow, as well as geopolitical and climatic

factors. This study provides empirical evidence to support more effective risk management and maritime safety policy planning amid the growing complexity of global maritime traffic.

Keywords: Maritime accidents, data analysis, spatiotemporal analysis, Kernel Density Estimation (KDE), Spatio-Temporal Clustering (ST-Clustering).

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào việc phân tích tai nạn hàng hải thông qua các phương pháp khai thác dữ liệu không gian - thời gian nhằm nhận diện các vùng rủi ro và xu hướng tai nạn. Phương pháp ước lượng mật độ hạt nhân KDE (Kernel Density Estimation) được xem là công cụ phổ biến trong việc phát hiện các điểm nóng tai nạn nhờ khả năng trực quan hóa phân bố không gian [1, 2]. Kết hợp KDE với các nền tảng GIS (Geographic Information System) giúp tăng cường độ chính xác trong việc xác định khu vực có mật độ tai nạn cao [3, 4].

Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây đã chuyển hướng sang tích hợp phân cụm không gian - thời gian (ST-Clustering) để phát hiện các cụm tai nạn có tính tương đồng về vị trí và thời điểm xảy ra [5]. Phương pháp này cho phép phân tích sự dịch chuyển của các cụm tai nạn theo thời gian, phản ánh tác động của các yếu tố như thay đổi lưu lượng tàu, điều kiện thời tiết và địa chính trị [5].

Một số công trình đã đề xuất tích hợp KDE như bước tiền xử lý trước khi áp dụng các mô hình phân cụm, giúp làm nổi bật sự bất đồng mật độ tai nạn giữa các vùng biển [6]. Ngoài ra, các kỹ thuật phân cụm như phân cụm lặp ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm) hoặc phân cụm dựa trên mật độ điểm dữ liệu DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) đã chứng minh tính hiệu quả trong việc xử lý dữ liệu có phân bố không đều, vốn là đặc trưng của dữ liệu tai nạn hàng hải [7].

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về phân tích rủi ro và tai nạn hàng hải trong hơn một thập kỷ qua mới chủ yếu tập trung vào mô hình dự báo va chạm và bản đồ rủi ro tĩnh, chưa có công trình nào ứng dụng mô hình kết hợp KDE và ST-Clustering cho đánh giá dịch chuyển không gian - thời gian của tai nạn hàng hải. Một số hướng nghiên cứu gần gũi nhất đến nay như bản đồ dự báo nguy cơ đâm va dựa trên dữ liệu AIS [8, 9], sử dụng thuật toán phân cụm (K-means, DBSCAN) [8] và mô hình miền tàu [9] để xác định khu vực có xác suất va chạm cao trong luồng tàu ra vào cảng, song phạm vi chỉ giới hạn ở khu vực duyên hải Việt Nam và chưa mở rộng sang khía cạnh động học thời gian.

Nhìn chung, các nghiên cứu hiện tại đã đặt nền tảng quan trọng cho việc phát triển mô hình phân tích tai nạn hàng hải theo hướng tích hợp giữa phân tích mật độ và phân cụm không gian - thời gian. Tuy nhiên, còn thiếu các nghiên cứu có phạm vi toàn cầu và dài hạn nhằm nắm bắt đầy đủ sự dịch chuyển của các khu vực rủi ro trong bối cảnh lưu lượng vận tải biển ngày càng gia tăng và biến đổi khí hậu diễn biến phức tạp.

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phương pháp phân tích dữ liệu tai nạn hàng hải giai đoạn 2005-2025 bằng phương pháp KDE kết hợp ST-Clustering trên công cụ phần mềm Matlab. Các thao tác cụ thể được trình bày trong các phần tiếp theo.

2. Cơ sở dữ liệu tai nạn hàng hải giai đoạn 2005-2025 và phương pháp nghiên cứu

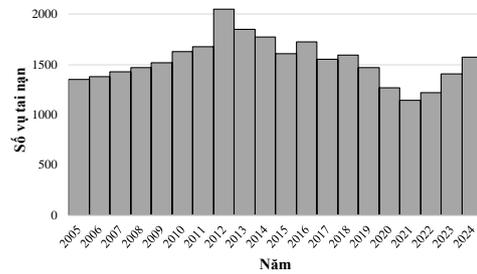
2.1. Số liệu thống kê

Dữ liệu tai nạn hàng hải được sử dụng trong nghiên cứu này là tập hợp các sự kiện tai nạn xảy ra trên phạm vi toàn cầu trong giai đoạn từ năm 2005 đến năm 2025, được thu thập từ các nguồn dữ liệu mở và có độ tin cậy cao như Cơ sở dữ liệu của Tổ chức Hàng hải Quốc tế IMO [10], cơ sở dữ liệu tai nạn tàu biển toàn cầu của IHS Markit, các báo cáo thường niên của MAIB (UK Marine Accident Investigation Branch), các hệ thống giám sát AIS [11]. Trong đó, nhiều nhất là dữ liệu thu thập và thống kê từ hệ thống GISIS

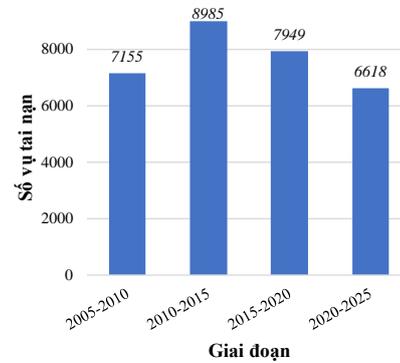
(Global Integrated Shipping Information System) của IMO [10].

Sau quá trình xử lý, chuẩn hóa và loại bỏ các bản ghi không đầy đủ về thời gian hoặc vị trí địa lý, tập dữ liệu cuối cùng bao gồm hơn 35.000 sự cố có định danh đầy đủ về tọa độ không gian (kinh độ, vĩ độ), mốc thời gian (tháng, ngày, năm), loại tai nạn (va chạm, mắc cạn, cháy nổ, hư hỏng máy móc, tràn dầu,...), kích thước và loại tàu, nguyên nhân cũng như mức độ thiệt hại về người và tài sản được mô tả như Bảng 1.

Dữ liệu chi tiết số vụ tai nạn hàng hải toàn cầu theo từng năm và theo giai đoạn phục vụ cho mục tiêu nghiên cứu của bài báo được thống kê trong Hình 1 và Hình 2.



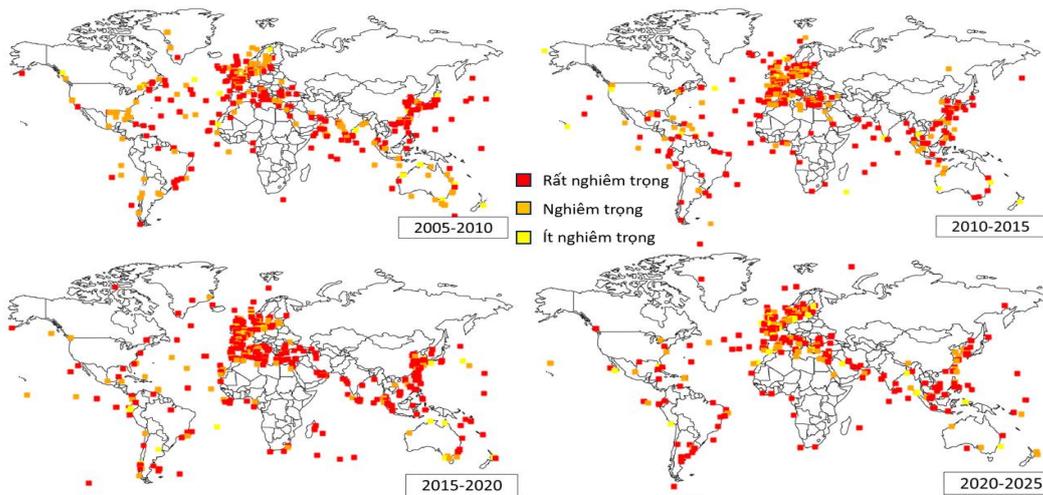
Hình 1. Thống kê số vụ tai nạn hàng hải từng năm giai đoạn 2005-2025



Hình 2. Thống kê số vụ tai nạn hàng hải theo 4 giai đoạn

Bảng 1. Bảng mẫu tổng hợp dữ liệu chính tai nạn hàng hải thu thập

Lat	Long	Date	ShipType	AccidentType	Cause	Damage(USD)	Period
5.9095	-50.0878	4/1/2005	Tanker	Sinking	Mechanical Failure	3470017.85	2005-2010
59.7745	10.6383	5/17/2005	Tanker	Collision	Human Error	1444311.57	2005-2010
35.8481	24.1944	6/9/2005	Passenger	Grounding	Mechanical Failure	8834359.71	2005-2010
-6.1566	71.9245	6/14/2005	Tanker	Grounding	Human Error	1565043.06	2005-2010
2.8872	-4.6496	6/19/2005	Bulk Carrier	Sinking	Human Error	1739720.64	2005-2010
...



Nguồn: Tổng hợp từ hệ thống GISIS - IMO

Hình 3. Dữ liệu tai nạn hàng hải theo vị trí các giai đoạn từ 2005-2025 của IMO

Dữ liệu vị trí các vụ tai nạn trong mỗi giai đoạn được thể hiện trong Hình 3.

2.2. Phương pháp phân tích mật độ không gian KDE

KDE là một kỹ thuật phi tham số được sử dụng để ước lượng phân bố xác suất không gian của một tập hợp điểm. Trong nghiên cứu này, KDE giúp xác định các vùng có mật độ tai nạn hàng hải cao - hay còn gọi là các điểm nóng (hotspots).

KDE được tính theo công thức:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\|x - x_i\|}{h}\right)$$

Trong đó:

- x là vị trí cần ước lượng mật độ;
- x_i là vị trí của điểm dữ liệu thứ i ;
- h là tham số bán kính ảnh hưởng;
- K là hàm kernel (thường dùng Gaussian);
- n là số điểm dữ liệu.

Tham số h đóng vai trò then chốt, ảnh hưởng đến độ mịn của bản đồ mật độ. Trong nghiên cứu, nhiều giá trị h được thử nghiệm (30km, 50km, 100km) để chọn ra giá trị tối ưu phù hợp với đặc điểm phân bố dữ liệu.

2.3. Kỹ thuật phân cụm không - thời gian ST-Clustering

Phân cụm không gian và thời gian giúp phát hiện các cụm tai nạn không chỉ tập trung về mặt không gian mà còn xuất hiện gần nhau trong khoảng thời gian xác định. Nghiên cứu này sử dụng biến thể mở rộng của thuật toán DBSCAN, gọi là ST-DBSCAN (Space

Time - DBSCAN), phù hợp với dữ liệu điểm có gắn yếu tố thời gian.

ST-DBSCAN mở rộng khái niệm lân cận bằng cách tích hợp thêm một ngưỡng thời gian bên cạnh khoảng cách không gian ϵ_s , và định nghĩa lại mật độ theo cả hai chiều.

Tham số chính bao gồm:

ϵ_s : Bán kính không gian (đề xuất: 50-100km);

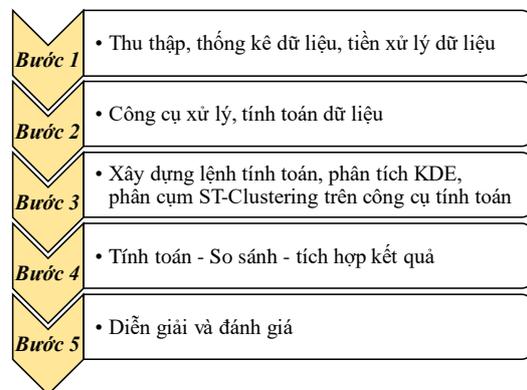
ϵ_t : Cửa sổ thời gian (đề xuất: 30-90 ngày);

$minPts$: Số lượng điểm tối thiểu trong một cụm (thường chọn từ 4-10).

Kết quả cho phép nhận diện các cụm tai nạn có tính động học, từ đó đánh giá xu thế dịch chuyển cả về vị trí địa lý lẫn thời gian xảy ra.

2.4. Triển khai nghiên cứu thực hiện tính toán

Quy trình nghiên cứu được chia thành 5 bước chính như mô tả trong Hình 4.



Hình 4. Lý thuyết triển khai thực hiện nghiên cứu

Cụ thể, Bước 1 là thu thập, thống kê và xử lý dữ liệu - chuẩn hóa định dạng, loại bỏ dữ liệu thiếu, xác

định biên đầu vào. Bước 2 là công cụ xử lý, tính toán dữ liệu - trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng phần mềm Matlab để trực quan hóa kết quả tính toán kết hợp xây dựng bộ công cụ bổ sung cho tính toán dữ liệu với KDE hay DBSCAN phù hợp với cách thức tính toán của công cụ Matlab. Bước 3 và Bước 4 triển khai tính toán kết quả riêng lẻ với KDE, ST-Clustering và tổng hợp cả hai trên cùng một bản đồ mật độ. Bước cuối cùng, diễn giải và phân tích kết quả thu thập được.

Để tránh gặp khó khăn và không cần thiết trong việc tính toán quá nhiều dữ liệu riêng lẻ theo từng năm để phục vụ cho mục tiêu định hướng hay đánh giá phân tích, tác giả chia dữ liệu thành 4 giai đoạn như đã thể hiện trong Hình 2, kết quả mật độ cho các giai đoạn 5 năm để xác định các khu vực có mức độ rủi ro cao và phát hiện các cụm tai nạn động có yếu tố không gian - thời gian rõ rệt.

3. Phân tích mật độ không gian tai nạn bằng KDE trong không gian hai chiều

3.1. Phương pháp thực hiện

Trong MATLAB, phương pháp này được thực hiện bằng cách sử dụng hàm Ksdensity kết hợp với lưới tọa độ (grid) do người dùng định nghĩa.

Công thức tổng quát của KDE đã được trình bày ở mục 2.2, với mô hình tính toán trong MATLAB được triển khai như sau:

Thiết lập lưới phân tích và tham số KDE

1) Lưới không gian: Toàn bộ bề mặt trái đất được giới hạn trong phạm vi:

Kinh độ (Long): từ -180° đến $+180^\circ$.

Vĩ độ (Lat): từ -90° đến $+90^\circ$.

Lưới được chia với độ phân giải 0.5° (~ 55 km tại xích đạo), tạo thành ma trận X,Y.

2) Hàm kernel: Sử dụng kernel Gaussian mặc định trong ksdensity.

3) Tham số bandwidth: Được chọn thử nghiệm trong các mức 50km, 100km, và 150km; kết quả cho thấy 100km là phù hợp nhất với dữ liệu thực tế và đặc điểm phân bố.

3.2. Triển khai KDE trên Matlab

Về cơ bản, trong giới hạn của bài báo, tác giả không thể thể hiện toàn bộ mã tính toán cho từng giai đoạn. Mỗi giai đoạn được xử lý và tính toán theo các bước tương tự sau:

```
% Dữ liệu tọa độ vụ tai nạn (lon, lat) giai
đoạn 2005-2009
load('accidents_2005_2009.mat'); % biến
data [lon lat]
```

```
% Tạo lưới không gian
[xq, yq] = meshgrid(-180:0.5:180, -
90:0.5:90);
gridPoints = [xq(:), yq(:)];

% Tính KDE với bandwidth 100 km (tương ứng
~0.9 độ)
bandwidth = 0.9;
[f, xi] = ksdensity(data, gridPoints,
'Bandwidth', bandwidth);

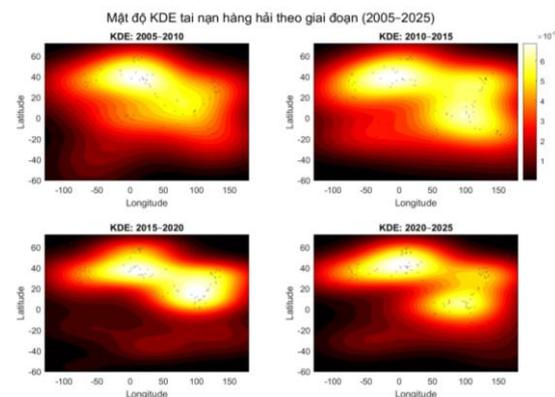
% Chuyển về ma trận 2D
fGrid = reshape(f, size(xq));

% Vẽ bản đồ mật độ
figure;
worldmap('World');
geoshow(xq, yq, fGrid, 'DisplayType',
'surface');
colorbar;
title('KDE:2005-2010');
```

Quy trình trên được lặp lại cho các giai đoạn tiếp theo, cho phép so sánh trực quan mật độ không gian giữa các thời kỳ.

3.3. Kết quả tính toán KDE với bản đồ nhiệt (heatmap) trực quan

Kết quả mật độ KDE tai nạn hàng hải theo 4 giai đoạn 5 năm gồm 2005-2010, 2010-2015, 2015-2020, 2020-2025 được thể hiện trong Hình 5.

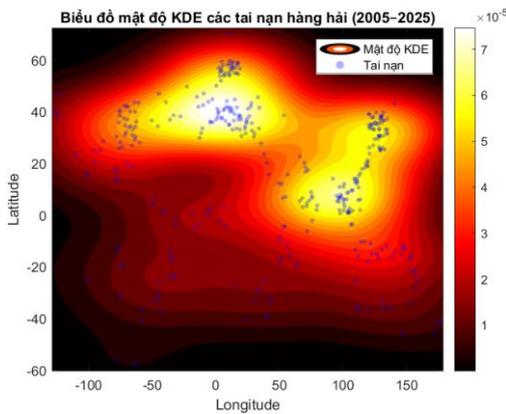


Hình 5. Bản đồ nhiệt mật độ KDE tai nạn hàng hải theo từng giai đoạn 5 năm

Và kết quả mật độ KDE tổng hợp tai nạn hàng hải từ năm 2005-2025 cũng được mô tả trong Hình 6.

3.4. Đánh giá sơ bộ

Phân tích KDE qua bốn giai đoạn cho thấy:



Hình 6. Biểu đồ nhiệt mật độ KDE tai nạn hàng hải toàn cầu giai đoạn 2005-2025

Một số vùng là điểm nóng tai nạn có sự ổn định lâu dài về số lượng như: Eo biển Malacca, Địa Trung Hải, Biển Đông. Đây hầu như là những tuyến hàng hải tập nập và quan trọng trên thế giới.

Xu hướng dịch chuyển dần về phía Tây Phi và Nam Á, đặc biệt trong giai đoạn sau 2015.

Vùng biển lạnh (Bắc Cực) bắt đầu xuất hiện mật độ tai nạn thấp nhưng đang tăng dần do biến đổi khí hậu và một số tuyến vận tải mới hoạt động.

4. Phân tích cụm không gian - thời gian bằng ST-Clustering

Phân cụm không - thời gian ST-Clustering là bước tiếp theo sau phân tích KDE nhằm phát hiện các cụm tai nạn có tính đồng thời về không gian và thời gian. Trong nghiên cứu này, phương pháp ST-DBSCAN được sử dụng, vì khả năng xử lý tốt dữ liệu điểm có gắn thời gian và không yêu cầu xác định trước số cụm.

4.1. Thiết lập tham số

Như đã trình bày trong phần lý thuyết tại mục 2.3, công việc cần thực hiện ở đây chính là Thiết lập tham số mô hình. Dựa trên tính chất dữ liệu và thử nghiệm ban đầu, các giá trị được sử dụng như sau:

- 1) $\epsilon_s = 100\text{km}$ (tương ứng $\approx 0,9$ độ)
- 2) $\epsilon_t = 30$ ngày
- 3) $\text{minPts} = 5$

4.2. Triển khai ST-Clustering bằng MATLAB

MATLAB không cung cấp sẵn ST-DBSCAN, do đó thuật toán được cài đặt lại dựa trên phiên bản mở rộng từ DBSCAN chuẩn, có bổ sung điều kiện thời gian.

Dữ liệu mỗi điểm được tổ chức thành ma trận:

```
data=[longitude,latitude,datetime]
```

Ngày được chuyển đổi sang số ngày tính từ mốc (ví dụ: 01/01/2005) để tiện so sánh khoảng cách thời gian.

Đoạn mã bổ sung ST-DBSCAN trong Matlab được xây dựng như sau:

```
function labels = st_dbscan(X, epsSpatial,
epsTemporal, minPts)
n = size(X, 1);
labels = zeros(n, 1);
clusterId = 0;
visited = false(n, 1);

for i = 1:n
    if visited(i)
        continue
    end
    visited(i) = true;
    neighbors = regionQuery(X, i,
epsSpatial, epsTemporal);
    if numel(neighbors) < minPts
        labels(i) = -1; % noise
    else
        clusterId = clusterId + 1;
        labels = expandCluster(X, labels,
i, neighbors, clusterId, epsSpatial,
epsTemporal, minPts, visited);
    end
end
end

function labels = expandCluster(X, labels,
idx, neighbors, clusterId, epsS, epsT,
minPts, visited)
labels(idx) = clusterId;
i = 1;
while i <= numel(neighbors)
    pointIdx = neighbors(i);
    if ~visited(pointIdx)
        visited(pointIdx) = true;
        newNeighbors = regionQuery(X,
pointIdx, epsS, epsT);
        if numel(newNeighbors) >= minPts
            neighbors = [neighbors;
newNeighbors]; %#ok<AGROW>
        end
    end
    if labels(pointIdx) == 0
        labels(pointIdx) = clusterId;
    end
    i = i + 1;
end
end
```

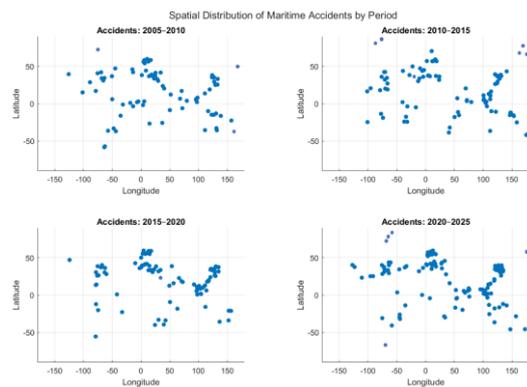
```
function neighbors = regionQuery(X, idx,
    epsS, epsT)
% Return indices of neighbors of X(idx, :)
within epsS and epsT
pt = X(idx, :);
dSpatial = sqrt(sum((X(:,1:2) -
    pt(1:2)).^2, 2));
dTemporal = abs(X(:,3) - pt(3));
neighbors = find(dSpatial <= epsS &
    dTemporal <= epsT);
end
```

Kết quả đầu ra, hàm sẽ trả về một vector labels, trong đó:

- Số cụm khác nhau được đánh nhãn từ 1, 2, ...
- Các điểm nhiễu (noise) được gán nhãn -1.

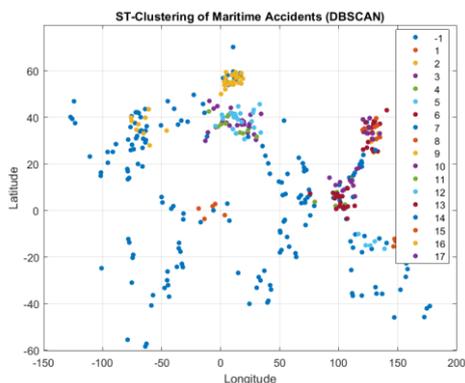
4.3. Kết quả tính toán ST-Clustering và kết hợp

Kết quả tính toán phân bố không gian của tai nạn theo từng giai đoạn được miêu tả trong Hình 7.



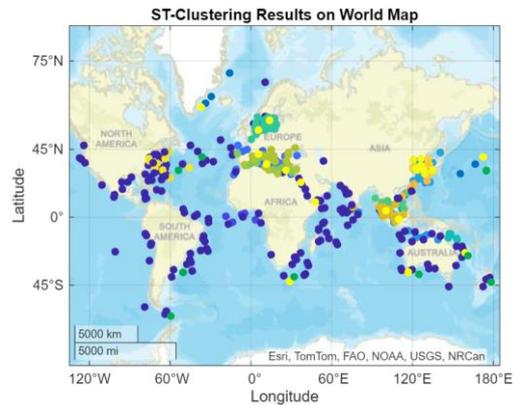
Hình 7. Phân bố không gian của tai nạn hàng hải theo từng giai đoạn

Kết quả phân cụm không gian - thời gian ST-Clustering được mô tả trong Hình 8.



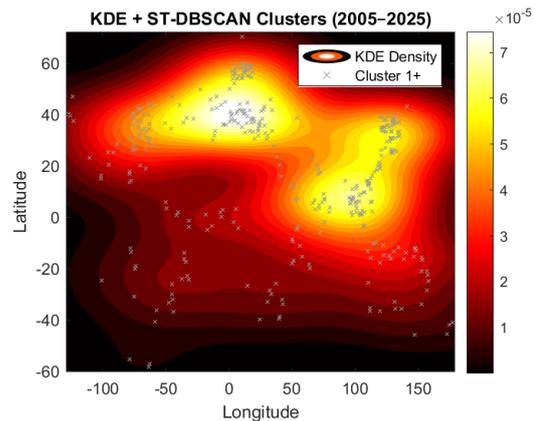
Hình 8. Kết quả phân cụm không gian - thời gian ST-Clustering

Kết quả trực quan phân cụm ST-Clustering trên bản đồ thế giới được biểu thị trong Hình 9.



Hình 9. Trực quan kết quả phân cụm ST-Clustering trên bản đồ thế giới

Kết quả kết hợp KDE và ST-Clustering trên bản đồ nhiệt được thể hiện trong Hình 10. Các cụm có mật độ từ 1 trở lên được thể hiện trên bản đồ nhiệt bằng dấu x.



Hình 10. Kết hợp KDE và ST-Clustering

4.4. Đánh giá

- Đối với kết quả phân cụm ST-Clustering độc lập, Xuất hiện một số cụm nổi bật (có màu sắc tương đồng hoặc mật độ dày đặc) gồm: Eo biển Malacca, kênh đào Suez, Địa Trung Hải, Hoàng Hải.

Trong đó, tai nạn tại eo biển Malacca có tính chu kỳ vào mùa gió mùa Đông Bắc mặc dù có dấu hiệu suy giảm nhẹ trong thời gian gần đây. Những vụ tai nạn tại kênh đào Suez lại xuất hiện tăng đột biến quanh thời điểm tàu Ever Given mắc kẹt và số lượng cụm tuy ít nhưng lại dày đặc hơn theo thời gian. Tương tự với số vụ tăng dần theo thời gian, mật độ tai nạn hàng hải tại biển Địa Trung Hải và biển Hoàng Hải luôn là điểm nóng nổi bật trong vấn đề này dù đánh giá về nguyên nhân có phần khác nhau. Một số khu vực đang hình thành dần và có thể trở thành điểm nóng của tai nạn

hàng hải trong thời gian gần đây là Tây Phi và Bắc Mỹ.

- Đối với kết quả kết hợp KDE và ST-Clustering,

Phần lớn các cụm ST đều nằm trong vùng mật độ cao KDE cho thấy tính hợp lý của mô hình. Tuy nhiên, KDE không phát hiện được các cụm ngắn hạn nhưng nguy hiểm ví dụ như cụm dọc kênh đào Suez và ST-Clustering có thể phát hiện động học theo thời gian như: chuỗi sự kiện liên tục, thay vì chỉ điểm nóng tĩnh.

Tóm lại, kết quả ST-Clustering cho thấy:

Một số điểm nóng đang dịch chuyển theo thời gian, chẳng hạn như từ Trung Đông sang Tây Phi.

Một số cụm có tính mùa vụ hoặc gắn với sự kiện đặc biệt (dịch bệnh, tắc nghẽn, chiến sự).

Các cụm nhỏ xuất hiện nhiều hơn sau năm 2020, cho thấy hệ thống vận tải hàng hải toàn cầu dễ bị tổn thương hơn trong bối cảnh biến động khi mà trước đó số cụm giảm mạnh do ảnh hưởng của dịch Covid-19.

Phân tích cụm không-thời gian cung cấp góc nhìn động học quan trọng trong đánh giá rủi ro và đề xuất chính sách điều phối luồng hàng hải toàn cầu.

4.5. Khuyến nghị

Từ kết quả ST-Clustering và KDE cho thấy sự dịch chuyển rõ rệt của các điểm nóng tai nạn hàng hải toàn cầu, có thể rút ra một số khuyến cáo đối với ngành hàng hải như sau:

Điều phối luồng hàng hải: Tăng cường giám sát và phân luồng động tại các khu vực mật độ cao như eo biển Malacca và kênh đào Suez; áp dụng hệ thống cảnh báo sớm kết hợp dữ liệu AIS-khí tượng để giảm rủi ro va chạm trong mùa gió mùa hoặc khi tắc nghẽn.

Quản lý vùng rủi ro mới: Xây dựng mạng lưới quan trắc và trung tâm phối hợp tìm kiếm cứu nạn tại Tây Phi và Bắc Mỹ, nơi các cụm tai nạn mới đang hình thành; đồng thời cập nhật tuyến tránh rủi ro cho Địa Trung Hải và Hoàng Hải có yếu tố chiến sự hoặc lưu lượng lớn.

Huấn luyện thuyền viên: Cập nhật mô phỏng và khóa huấn luyện dựa trên mô hình ST-Clustering thực tế; nhấn mạnh kỹ năng xử lý tình huống theo mùa và sự kiện đặc biệt (dịch bệnh, tắc nghẽn, chiến sự).

Ứng dụng công nghệ và dữ liệu: Tích hợp kết quả ST-Clustering vào hệ thống cảnh báo quốc gia; sử dụng AI để dự báo hình thành cụm tai nạn mới và hỗ trợ quyết định điều phối luồng hàng hải.

Chính sách và quy hoạch: Đề xuất IMO, IALA xem xét bổ sung chỉ số rủi ro không-thời gian trong đánh giá tuyến hàng hải và phân bố trạm cứu nạn, hướng tới điều hành an toàn, linh hoạt và thích ứng biến động toàn cầu.

5. Kết luận

Nghiên cứu tiến hành phân tích sự dịch chuyển không gian - thời gian của các vụ tai nạn hàng hải toàn cầu giai đoạn 2005-2025, sử dụng kết hợp hai phương pháp mật độ KDE (Kernel Density Estimation) và phân cụm không gian - thời gian ST-Clustering (Space-Time DBSCAN) trên nền tảng Matlab. Một số kết quả nổi bật gồm:

Về xu hướng không gian

Các điểm nóng tai nạn hàng hải tập trung chủ yếu tại các tuyến hàng hải chiến lược: Eo biển Malacca - Singapore, Kênh đào Suez, khu vực biển Đông Bắc Trung Quốc - khu vực Hoàng Hải, vịnh Guinea và các khu vực cửa ngõ cảng châu Âu.

Một số điểm nóng đã giảm dần cường độ theo thời gian (ví dụ: Vùng Biển Bắc, Bắc Mỹ), trong khi một số khác lại gia tăng (ví dụ: Vịnh Guinea, Đông Địa Trung Hải).

Về xu hướng thời gian

Tai nạn có sự biến động mạnh trong các giai đoạn khủng hoảng (2010-2012, 2020-2022).

Nhiều cụm tai nạn mang tính ngắn hạn nhưng tập trung cao độ, thường gắn liền với các sự kiện đặc thù như tắc nghẽn kênh đào, thời tiết cực đoan hoặc xung đột chiến tranh trong khu vực.

Về sự dịch chuyển không gian - thời gian

Một số cụm tai nạn có xu hướng dịch chuyển vị trí qua các năm: từ khu vực Đông Nam Á sang Ấn Độ Dương, từ Tây Ấn Độ Dương sang Tây Phi.

Phát hiện tính mùa vụ của một số cụm, đặc biệt tại khu vực gió mùa và băng biển tan ở cực.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.13**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Huang, D.Z., Hu, H., & Li, Y.Z., (2013). *Spatial Analysis of Maritime Accidents Using the Geographic Information System*. Transportation Research Record, Vol.2326(1), pp.39-44. <https://doi.org/10.3141/2326-06>.
- [2] Zhang, Y., Sun, X., Chen, J. & Cheng, C. (2021). *Spatial patterns and characteristics of global maritime accidents*. Reliability Engineering & System Safety, Vol.206, 107310p. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107310>
- [3] Sun, Y., Hou, C., Chen, X., Wang, Y., Dai, L. and Hu, Q. (2024). *Accident black spot clustering oriented maritime search and rescue resource*

- allocation and optimization. *Frontiers in Marine Science*. Vol.11, 1395614p.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1395614>
- [4] Li, G., Gao, K., Weng, J., & Qu, X. (2024). *Deciphering spatial heterogeneity of maritime accidents considering impact scale variations*. *Maritime Policy & Management*, Vol.52(2), pp.309-333.
<https://doi.org/10.1080/03088839.2024.2347893>
- [5] Feng, Y., Huang, D., Hong, X., Wang, H., Loughney, S., & Wang, J. (2025). *Spatial-Temporal Evolution of Maritime Accident Hot Spots in the East China Sea: A Space-Time Cube Representation*. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol.13(2), 233.
<https://doi.org/10.3390/jmse13020233>
- [6] Farahnakian, F., Nicolas, F., Farahnakian, F., Nevalainen, P., Sheikh, J., Heikkonen, J., & Raduly-Baka, C. (2023). *A Comprehensive Study of Clustering-Based Techniques for Detecting Abnormal Vessel Behavior*. *Remote Sensing*, Vol.15(6), 1477p.
<https://doi.org/10.3390/rs15061477>
- [7] Cao, Y., Wang, X., Yang, Z., Wang, J., Wang, H. & Liu, Z., (2023). *Research in marine accidents: A bibliometric analysis, systematic review and future directions*. *Ocean Engineering*, Vol.284, 115048.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115048>
- [8] Nguyễn Văn Quảng (2024). *Nghiên cứu thuật toán xác định nguy cơ đâm và tàu thuyền theo thời gian thực*. Luận án tiến sĩ kỹ thuật.
- [9] Cổ Tấn Anh Vũ và cộng sự (2023). *Đánh giá nguy cơ đâm và tàu biển sử dụng kết hợp thuật toán phân cụm và lý thuyết hàm tin cậy*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 75, tr.76-81.
- [10] International Maritime Organization (IMO). *Global Integrated Shipping Information System (GISIS) - Marine Casualty and Incident Module*. <https://gisis.imo.org/Public/MCI/Search.aspx>. (accessed on 1 June 2025).
- [11] MAIB Data Portal - Power BI Dashboard. https://maps.dft.gov.uk/maib-data-portal/web-pages/pbi_dashboard.html.

Ngày nhận bài:	29/09/2025
Ngày nhận bản sửa:	26/10/2025
Ngày duyệt đăng:	29/10/2025