

Bài báo khoa học

Xác định khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển bằng công nghệ GIS và phương pháp mô hình hóa

Nguyễn Quang Minh^{1,3}, Bùi Tiến Diệu², Nguyễn Văn Trung^{3,4*}

¹ Cục Bản đồ - Bộ tổng tham mưu; nguyenvanquangminh.sar@gmail.com

² Đại học Đông Nam NaUy; dieu.t.bui@usn.no

³ Trường Đại học Mở - Địa chất; nguyenvantrung@humg.edu.vn

⁴ Nhóm nghiên cứu Công nghệ Địa tin học trong Khoa học Trái đất (GES), Trường Đại học Mở - Địa chất; nguyenvantrung@humg.edu.vn

*Tác giả liên hệ: nguyenvantrung@humg.edu.vn; Tel.: +84-986058067

Ban Biên tập nhận bài: 19/8/2024; Ngày phản biện xong: 9/9/2024; Ngày đăng bài: 25/2/2025

Tóm tắt: Việt Nam là quốc gia ven biển với đường bờ biển dài, vùng biển rộng dẫn đến các tai nạn, sự cố trên biển xảy ra thường xuyên, nhất là trong điều kiện chịu ảnh hưởng của biến đổi khí hậu. Bài báo này trình bày kết quả xác định khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển ở khu vực vịnh Bắc Bộ trên cơ sở phương pháp mô hình hóa và dữ liệu GIS. Trong nghiên cứu, các lớp dữ liệu bao gồm: (1) dữ liệu tàu tìm kiếm, cứu nạn; (2) tốc độ gió điều chỉnh (3) ảnh lấy gió; (4) gia tốc trọng trường và (5) bản đồ độ sâu được sử dụng để xác định thời gian phản hồi trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Ba kịch bản với điều kiện thời tiết và đặc điểm tàu tìm kiếm, cứu nạn khác nhau được thử nghiệm để xây dựng bản đồ khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Kết quả nhận được trong nghiên cứu cung cấp thông tin quan trọng, giúp các lực lượng chức năng xây dựng các phương án tìm kiếm, cứu nạn phù hợp tùy theo điều kiện thời tiết, trang thiết bị cụ thể.

Từ khóa: Tìm kiếm - cứu nạn; Khoảng cách hiệu dụng; GIS; Mô hình hóa; Vịnh Bắc Bộ.

1. Mở đầu

Việt Nam có bờ biển dài hơn 3260 km, trải dài từ Bắc xuống Nam với hàng nghìn hòn đảo, đặc biệt có hai quần đảo Hoàng Sa và Trường Sa trên Biển Đông. Vùng biển Việt Nam có diện tích trên 1 triệu km², đóng vai trò vô cùng quan trọng trong phát triển kinh tế, đảm bảo an ninh, quốc phòng và giao thông hàng hải đối với nước ta [1]. Do diện tích vùng biển rộng, với nhiều tuyến vận tải biển quốc tế, trong nước và các tàu khai thác tài nguyên, đánh bắt cá nên dễ xảy ra các tai nạn trên biển, nhất là trong điều kiện chịu ảnh hưởng của thiên tai. Hơn nữa, những thiên tai trên biển thường xảy ra dữ dội, bất ngờ dẫn đến những khó khăn rất lớn trong công tác tìm kiếm, cứu nạn. Công tác cứu nạn hàng hải đòi hỏi tính khẩn cấp và yêu cầu về phương tiện, thiết bị, nhân lực cao trong khi vùng biển dài, trải rộng... Với đặc thù khu vực biển, việc xác định sớm vị trí cần tổ chức tìm kiếm, cứu nạn cũng như tiếp cận khu vực cần tìm kiếm, cứu nạn gặp rất nhiều khó khăn. Điều này ảnh hưởng rất lớn đến hiệu quả cũng như khả năng tìm kiếm, cứu nạn, làm giảm hiệu quả trong công tác ứng phó với thiệt hại do thiên tai gây ra. Để phục vụ công tác tìm kiếm, cứu nạn trên biển, việc ứng dụng công nghệ địa không gian đã được áp dụng hiệu quả ở nhiều nước trên thế giới, đặc biệt là ở các quốc gia phát triển, làm chủ các công nghệ như hệ thống vệ tinh định vị toàn cầu và các hệ thống viễn thám. Nhiều nghiên cứu đã phát triển các mô hình nhằm xác định vị trí xảy ra sự cố trên biển, tính toán thời gian tối ưu trong tìm kiếm, cứu nạn dựa trên các dữ liệu về dòng chảy, tốc độ gió, độ cao sóng biển... [2, 3].

Xác định khoảng cách hiệu dụng, hay bản chất là xác định thời gian phản hồi (response time) từ lúc nhận được thông tin khẩn cấp đến điều động tàu và tổ chức ứng phó sự cố là một vấn đề rất quan trọng, ảnh hưởng lớn đến quá trình lập kế hoạch và hiệu quả công tác tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Nghiên cứu [4] đã sử dụng công nghệ GIS trong xác định thời gian phản hồi trong công tác tìm kiếm, cứu nạn với các sự cố do hoạt động chèo thuyền ở vịnh Phần Lan. Trong nghiên cứu này, phương pháp mô hình hóa được áp dụng để tính thời gian phản hồi cho toàn bộ khu vực nghiên cứu bằng cách sử dụng các thông tin như dữ liệu sự cố, đặc điểm tàu tìm kiếm, cứu nạn, kích bản về chiều cao sóng biển, gió biển. Nghiên cứu [5] phát triển một mô hình trên nền tảng GIS để tính toán quãng đường và chi phí trong cứu nạn trên biển sử dụng các thông tin như hướng gió, hướng sóng (swell direction), chiều cao sóng biển cũng như đặc điểm tàu cứu nạn. Nghiên cứu [6] đã đề xuất một mô hình lai kết hợp tối ưu hóa và mô phỏng để phân bổ máy bay trực thăng phục vụ tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Phương pháp mô hình hóa cũng được sử dụng trong nghiên cứu [7] nhằm xác định tuyến đường tiếp cận khu vực xảy ra sự cố, giúp giảm thiểu thời gian tiếp cận bằng máy bay dựa trên các lớp thông tin như độ bền của máy bay, mức tiêu thụ nhiên liệu, tải trọng, trọng lượng cất cánh và hạ cánh, năng lực sân bay để khai thác các loại máy bay khác nhau. Nghiên cứu [8] đã phát triển một mô hình xác định thời gian phản hồi của tàu cứu hộ nhằm đánh giá khả năng tìm kiếm, cứu nạn hàng hải ở khu vực Biển Đông, tập trung vào 4 quốc gia gồm Trung Quốc, Việt Nam, Malaysia và Philippin. Nghiên cứu [9] đề xuất một khung mô hình hóa dựa trên tác nhân (ABM - Agent Based Modelling) để đánh giá hiệu suất của các hoạt động tìm kiếm, cứu nạn (SAR) nhằm giải quyết những thách thức liên quan đến điều kiện thời tiết ở Bắc Cực. Phương pháp mô phỏng Monte Carlo được sử dụng để mô hình hóa động lực và sự không chắc chắn của điều kiện thời tiết và biển bằng cách sử dụng dữ liệu lịch sử. Sau đó, quy trình đánh giá của chuyên gia sẽ được sử dụng để định lượng tác động của các mức độ nghiêm trọng đó đối với hoạt động của lực lượng cứu hộ cũng như tổng thời gian cứu hộ.

Tại Việt Nam, cho đến nay đã có một số nghiên cứu ứng dụng công nghệ địa không gian và các kỹ thuật mô hình hóa phục vụ công tác tìm kiếm, cứu nạn. Các nghiên cứu này tập trung vào các hướng chính như: (1) phát triển các thuật toán, phương pháp nhận dạng đối tượng cần tìm kiếm, cứu nạn trên ảnh viễn thám [10, 11], (2) xây dựng cơ sở dữ liệu phục vụ công tác tìm kiếm, cứu nạn [12–14] và (3) ứng dụng viễn thám và GIS trong xây dựng hệ thống cảnh báo sớm nguy cơ thiên tai, phục vụ tìm kiếm, cứu nạn [15]. Có thể nhận thấy, số lượng các nghiên cứu trong xây dựng các mô hình hỗ trợ công tác tìm kiếm, cứu hộ trên biển ở Việt Nam còn khá hạn chế, cả về số lượng cũng như kết quả đạt được. Phần lớn các nghiên cứu này mới tập trung ở đề xuất các mô hình hỗ trợ công tác tìm kiếm, cứu hộ hoặc phát triển các thuật toán để nhận dạng đối tượng trên biển. Chưa có nghiên cứu nào sử dụng các dữ liệu địa không gian và dữ liệu về khí tượng, hải văn nhằm mô hình hóa thời gian phản hồi trong quá trình tìm kiếm, cứu hộ.

Nghiên cứu này trình bày kết quả xác định khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển bằng dữ liệu GIS và phương pháp mô hình hóa. Các lớp dữ liệu đầu vào về tàu tìm kiếm, cứu nạn; tốc độ gió điều chỉnh, ảnh lầy gió, gia tốc trọng trường, độ sâu đáy biển được sử dụng để tính thời gian đi hết một đơn vị không gian (pixel ảnh), từ đó xác định thời gian phản hồi trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Giới thiệu về khu vực thực nghiệm

Vịnh Bắc Bộ ở phía Tây Bắc của Biển Đông, nằm giữa Việt Nam và Trung Quốc là một trong những vịnh nước mặn lớn trên thế giới với diện tích khoảng 126.250 km², chiều ngang rộng nhất khoảng 310 km và hẹp nhất khoảng 207 km. Dọc theo bờ Vịnh Bắc Bộ bao gồm 10 tỉnh, thành phố của Việt Nam và hai tỉnh của Trung Quốc với tổng chiều dài khoảng 1458 km [1] (Hình 1) (website: <https://vdstravel.vn/>). Vịnh Bắc Bộ có nguồn tài nguyên biển đa

dạng với nhiều ngư trường lớn, có tiềm năng về dầu mỏ và khí đốt. Vịnh Bắc Bộ có độ sâu trung bình 50 m với điểm đáy biển sâu nhất là 107 m. Địa hình đáy vịnh phần lớn có góc dốc nhỏ hơn 5°, phần còn lại ít khi tới 10-30 với các trũng dạng tuyến cắt qua các đường đẳng. Bên cạnh đó, các đồi ngầm đá Đệ Tam và các đê cát ngầm xuất hiện dưới đáy vịnh [16, 17].

Với đặc điểm trên, Vịnh Bắc Bộ có tầm quan trọng đặc biệt đối với quá trình phát triển kinh tế, giao thương quốc tế và đảm bảo quốc phòng, an ninh của nước ta. Vịnh Bắc Bộ là một trong những tuyến đường hàng hải quan trọng trên thế giới với giao thông hàng hải nhộn nhịp, các tai nạn hàng hải, sự cố môi trường diễn ra rất phức tạp, nhất là trong điều kiện ảnh hưởng của biến đổi khí hậu. Vùng biển vịnh Bắc Bộ và các khu vực ven biển thường xảy ra các hiện tượng thiên tai bao gồm bão, lũ, triều cường, mưa lớn, thời tiết nguy hiểm trên biển và các ảnh hưởng của thiên tai như sóng, nước dâng do bão, ngập lụt, bồi lắng, xói lở, xâm nhập mặn đến quá trình phát triển kinh tế - xã hội trong khu vực. Theo thống kê từ trong giai đoạn 1961-2014, Việt Nam chịu ảnh hưởng của 364 cơn bão, trong đó tần số bão ảnh hưởng giảm dần từ Bắc và Nam. Khu vực từ Quảng Ninh đến Thanh Hóa có tần số bão ảnh hưởng lớn nhất trên cả nước với hơn 2 cơn bão/năm [18]. Bên cạnh đó, các hệ thống sông đổ ra biển ở vịnh Bắc Bộ cũng chịu ảnh hưởng của lũ thượng nguồn, mưa lớn, triều cường, sóng lớn và nước dâng do bão [19].



Hình 1. Khu vực nghiên cứu.

2.2. Dữ liệu sử dụng

Trên cơ sở đánh giá tổng quan về điều kiện tự nhiên, khí hậu khu vực vịnh Bắc Bộ cũng như hiện trạng nguồn dữ liệu và kinh nghiệm từ các nghiên cứu trên thế giới, trong bài báo đã xây dựng bộ dữ liệu đầu để tính toán khoảng cách hiệu dụng hỗ trợ công tác tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Bộ dữ liệu đầu vào bao gồm 5 lớp thông tin: (1) Dữ liệu tàu tìm kiếm, cứu nạn; (2) tốc độ gió điều chỉnh; (3) ảnh lầy gió; (4) gia tốc trọng trường và (5) bản đồ độ sâu.

+ Dữ liệu tàu tìm kiếm, cứu nạn (tàu SAR). Dữ liệu các tàu tìm kiếm, cứu nạn (tàu SAR) được thu thập tại Cục Cứu hộ cứu nạn, Bộ Quốc phòng (lấy từ bảng danh mục tàu tìm kiếm, cứu nạn do Sở chỉ huy/Cục Cứu hộ cứu nạn cung cấp nội bộ) (Bảng 1), bao gồm tàu TS 01 của Quân chủng Hải quân, tàu CN-09 của Bộ đội Biên phòng (Bộ Quốc phòng) và tàu KN-579 của Cục Kiểm ngư (Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn). Đặc điểm các tàu SAR (vận tốc, tầm hoạt động) được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số lực lượng tàu tìm kiếm cứu nạn trên biển.

Đơn vị	Số hiệu	Vận tốc (Hải lý/giờ)		Tầm hoạt động (Hải lý)
		V _{kt}	V _{max}	
Hải quân	TS: 01.	10	12	4000
Biên phòng	CN-09	20	22	07 ngày (V = 10HL/h)
Cục Kiểm ngư	KN-579	22	25	13 ngày

+ Để xác định lớp dữ liệu tốc độ gió hiệu chỉnh, thông tin đầu vào bao gồm hướng gió, tốc độ gió phổ biến và thời gian xuất hiện ở khu vực thực nghiệm. Hướng gió (từ 0° đến 360°) được xác định là hướng gió trung bình theo tháng hoặc khoảng thời gian lựa chọn [20]. Thời gian xuất hiện là ngày xảy ra hướng gió và tốc độ gió đó. Tham số thời gian được định nghĩa dưới dạng dd-mm-yy (ví dụ: 061021, có nghĩa là ngày 06 tháng 10 năm 2021) [21, 22].

+ Lớp dữ liệu lấy gió (*wind fetch*) được xây dựng từ thông tin về hướng gió và ranh giới đất liền - mặt nước. Lấy gió (*wind fetch*) được định nghĩa là khoảng cách liên tục mà gió thổi trên mặt nước, không bị ảnh hưởng bởi địa hình hoặc các vật cản khác. Thông tin về dữ liệu lấy gió được tính bằng khoảng cách theo đường thẳng tính từ vị trí quan tâm đến vị trí xa nhất mà gió thổi liên tục trên mặt biển. Hay nói cách khác, lấy gió là khoảng cách không bị cản trở mà gió có thể di chuyển trên mặt nước theo một hướng không đổi. Khoảng cách lấy gió càng dài sẽ dẫn đến chiều cao sóng lớn hơn. Mô hình của Cục Khảo sát địa chất Hoa Kỳ (USGS) cung cấp ba phương pháp khác nhau để tính toán dữ liệu lấy gió, bao gồm đơn, SPM hạn chế và SPM [23]. Ranh giới đất liền - mặt nước được xây dựng dựa trên dữ liệu vector khu vực nghiên cứu và biển, sau đó chuyển đổi về định dạng raster theo độ phân giải không gian phù hợp (đảm bảo quá trình tính toán không bị tràn bộ nhớ) [24]. Trong nghiên cứu, độ phân giải không gian được lấy là 100 m × 100 m, trong đó đối tượng mặt nước có giá trị 0, đối tượng đất liền có giá trị 1.

+ Gia tốc trọng trường là một yếu tố có ảnh hưởng đến chiều cao sóng biển [25]. Trong nghiên cứu này, gia tốc trọng trường được sử dụng mặc định là 9,82 (m/s²).

+ Lớp dữ liệu về độ sâu được xây dựng dựa trên dữ liệu điểm độ sâu kết hợp với thuật toán nội suy không gian như IDW, Kriging hay Spline [26–28].

2.3. Phương pháp nghiên cứu

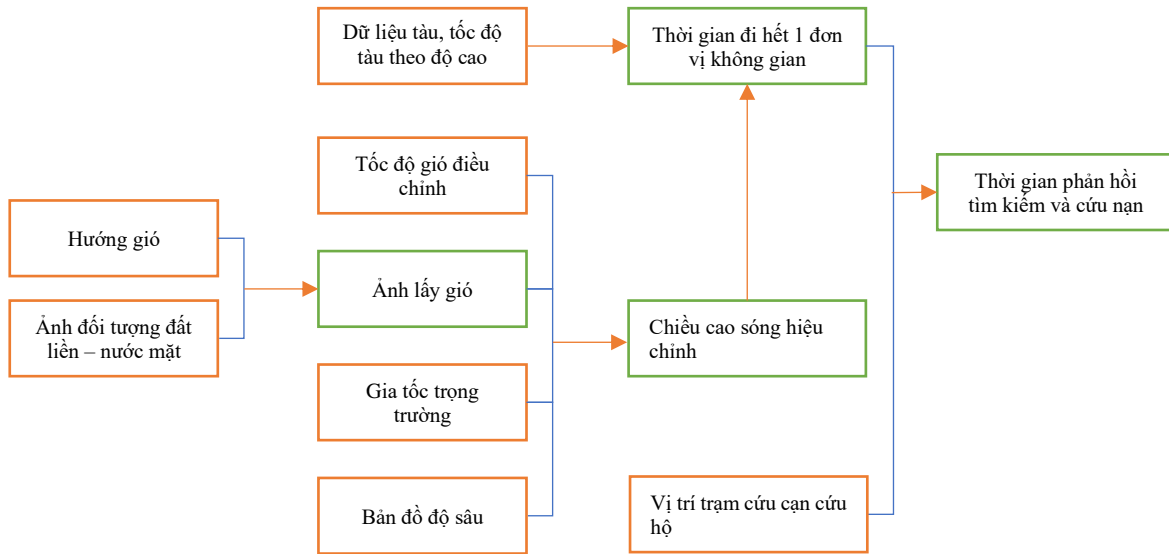
Tìm kiếm, cứu nạn là hoạt động thường được tiến hành trong điều kiện thời tiết khó khăn, nguy hiểm, địa hình khu vực gặp thiên tai, sự cố phức tạp, khó tiếp cận. So với tìm kiếm, cứu nạn trên đất liền, hoạt động tìm kiếm, cứu nạn trên biển còn gặp nhiều khó khăn, thách thức lớn hơn do đặc thù khu vực vùng biển. Công nghệ GIS với ưu điểm nổi bật trong phân tích, xử lý dữ liệu không gian là một phương pháp phù hợp trong xây dựng các mô hình hỗ trợ công tác tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Các thuật toán phân tích không gian trong GIS cho phép sử dụng đa lớp dữ liệu đầu vào về điều kiện tự nhiên, thời tiết, sóng biển... để mô hình hóa và hỗ trợ ra quyết định trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển [2–6].

Từ bộ dữ liệu đầu vào bao gồm 5 lớp thông tin: (1) Dữ liệu tàu tìm kiếm, cứu nạn; (2) tốc độ gió điều chỉnh (3) ảnh lấy gió; (4) gia tốc trọng trường và (5) bản đồ độ sâu, trong nghiên cứu này đã sử dụng công nghệ GIS để mô hình hóa và xác định khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển khu vực vịnh Bắc Bộ. Sơ đồ quy trình xử lý dữ liệu nhằm xác định khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển khu vực vịnh Bắc Bộ được thể hiện trên Hình 2.

Quá trình tính toán các lớp dữ liệu đầu được thực hiện như sau:

+ Lấy gió (*wind fetch*) được tính theo phương pháp SPM [4, 23]. Trong phương pháp này, dữ liệu ảnh lấy gió chỉ được tính trên phần diện tích của đối tượng nước, không tính đối với các khu vực đất liền. Ảnh đối tượng đất liền-nước mặt được sử dụng để xác định

vị trí khởi đầu và vị trí kết thúc của mỗi hướng gió cần phân tích. Vị trí này chính là phân giao giữa đối tượng đất liền và nước mặt. Sau khi tính toán được dữ liệu lấy gió, dữ liệu này được sử dụng cho tính toán chiều cao sóng hiệu chỉnh.



Hình 2. Quy trình xử lý dữ liệu phục vụ tính toán khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển.

+ Mô hình tính toán chiều cao sóng hiệu chỉnh với các công thức dưới được lấy từ Sổ tay kỹ thuật bờ biển (USACE) [29, 30]:

$$\begin{aligned}
 C_d &\approx 0.001 \times (1.1 + (0.035 \times U_A)) \\
 U_* &= (C_d)^{1/2} \times U_A \\
 x(g \times x) / (U_*)^2 & \\
 H_{m0} &= \lambda_1 * (x)^{m1} \\
 H_{m0} &= H_{m0} \times \frac{U_{**}^2}{g}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Trong đó U_A là tốc độ gió được điều chỉnh (m/s); z là độ cao quan sát được của tốc độ gió (s); t là số giây để đi được một dặm; C_d là hệ số lực cản; U_* là vận tốc ma sát; $\lambda_1 = 0,0413$; $m_1 = 1/2$; H_{m0} là chiều cao sóng có ý nghĩa không thứ nguyên; H_{m0} là chiều cao sóng đáng kể (m); x lấy gió không thứ nguyên; x : lấy gió (m); g là gia tốc trọng trường (9,82 m/s²).

Thời gian đi hết một đơn vị không gian được tính cho tàu tìm kiếm, cứu nạn theo mô hình của USACE như sau [30]:

Đầu tiên tính thời gian không hiệu chỉnh: $t = \frac{S}{v}$ với s là độ phân giải không gian, v là tốc độ của tàu. Sau đó, tiến hành chia các khoảng độ cao sóng với các vận tốc khác nhau, mỗi độ cao sóng tính toán các tham số:

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{t_1 - t_2}{wh_1 - wh_2} \\
 b &= \frac{wh_1 \times t_2 - wh_2 \times t_1}{wh_1 - wh_2}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Khi đó, thời gian đi hết 1 đơn vị không gian được tính bằng:

$$t = wh \times a + b
 \tag{3}$$

với wh là độ cao sóng, a và b lần lượt là các tham số ứng với độ cao wh .

Cuối cùng, thời gian phản hồi tìm kiếm và cứu nạn được tính toán theo khoảng cách hiệu dụng với đầu vào là vị trí các trạm cứu nạn cứu hộ và dữ liệu thời gian đi hết một đơn vị không gian.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Kết quả xây dựng các lớp thông tin thành phần

Để xây dựng lớp dữ liệu tàu tìm kiếm, cứu nạn trên biển, trong nghiên cứu thử nghiệm với 03 loại tàu sau: TS-01 (Quân chủng Hải quân), vận tốc tối đa 12 hải lý/giờ; CN-09 (Bộ đội Biên phòng), vận tốc tối đa 22 hải lý/giờ và KN-579 (Cục Kiểm ngư, Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn), vận tốc tối đa 25 hải lý/giờ. Tại khu vực thử nghiệm, độ cao sóng thu thập được không vượt quá 4 m. Do sóng biển càng cao, vận tốc tàu càng thấp, từ đặc điểm này trong nghiên cứu, các tác giả đã giả định vận tốc tàu có sự thay đổi, giảm dần với các độ cao sóng khác nhau như trong Bảng 2. Các giá trị giả định này được lấy qua tham khảo một số cán bộ lực lượng Hải quân, trong đó khi sóng biển cao 4m các tàu thường hạ neo và không di chuyển.

Bảng 2. Vận tốc tàu thay đổi với các độ cao sóng khác nhau (hải lý/giờ).

Chiều cao sóng (m)	Tàu	Vận tốc tàu (hải lý/giờ)		
		TS-01	CN-09	KN-579
0		12	22	25
0,5		12	22	25
1		10	20	22
2		9	18	20
3		8	16	18
4		7	14	16

Tiếp theo, trong nghiên cứu tiến hành tính toán thời gian tàu tìm kiếm, cứu nạn đi hết một đơn vị không gian (100 m × 100 m). Với số liệu vận tốc tàu thay đổi dựa trên các độ cao sóng khác nhau ở Bảng 2, thời gian để một đơn vị tìm kiếm cứu nạn trên biển đi hết một đơn vị không gian được tính toán trong Bảng 3.

Bảng 3. Thời gian tàu đi hết một đơn vị không gian với các chiều cao sóng khác nhau (s).

Chiều cao sóng (m)	Tàu	Thời gian đi hết 1 đơn vị không gian (s)		
		TS-01	CN-09	KN-579
0		16,20	8,84	7,78
0,5		16,20	8,84	7,78
1		19,44	9,72	8,84
2		21,60	10,80	9,72
3		24,30	12,15	10,80
4		27,77	13,89	12,15

Sau đó, các tham số a và b trong phương trình $t = wh \times a + b$ dựa trên công thức (3) được tính toán, phục vụ cho quá trình xác định thời gian phản hồi ở các bước tiếp theo. Giá trị các tham số a và b tương ứng với các tàu tìm kiếm, cứu nạn (TS-01, CN-09, KN-579) đối với mỗi khoảng chiều cao sóng được tính toán trong Bảng 4.

Đặc điểm về hướng gió khu vực vịnh Bắc Bộ được thu thập từ Atlas Điều kiện Tài nguyên và Môi trường vùng biển Việt Nam [31]. Bảng 5 cung cấp thông tin chi tiết về tần suất các hướng gió tại Vịnh Bắc Bộ, trong đó gió thổi từ phía Đông Bắc và Bắc chiếm tỉ lệ cao hơn so với các hướng khác. Sự phân bố này cho thấy một xu hướng gió rõ ràng tại Vịnh Bắc Bộ, điều này có thể ảnh hưởng lớn đến các hoạt động hàng hải cũng như quá trình tổ chức công tác tìm kiếm, cứu nạn trong khu vực. Từ đặc điểm này, trong nghiên cứu đã sử dụng hướng gió với khu vực vịnh Bắc Bộ là các hướng Đông Bắc, Bắc và Nam trong 03 kịch bản thử nghiệm.

Bảng 4. Các tham số a và b ứng với các đơn vị thực nghiệm đối với mỗi khoảng chiều cao sóng khác nhau.

Chiều cao sóng (m)	Tàu	TS-01		CN-09		KN-579	
		a	b	a	b	a	b
0-0,5		0,00	16,20	0,00	8,84	0,00	7,78
0,5-1		6,48	12,96	1,77	7,95	2,12	6,72
1-2		2,16	17,28	1,08	8,64	0,88	7,95
2-3		2,70	16,20	1,35	8,10	1,08	7,56
3-4		3,47	13,89	1,74	6,94	1,35	6,75

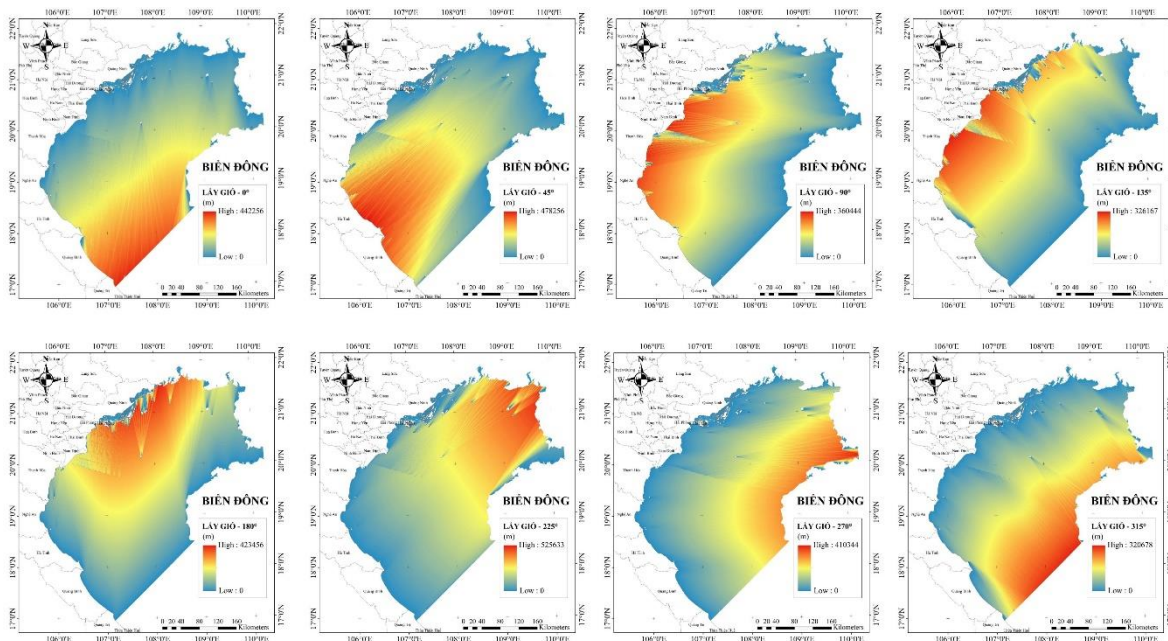
Bảng 5. Tần suất hướng gió thu thập tại Vịnh Bắc Bộ [31].

Hướng gió	Góc	Tần suất	Phần trăm
Đông Bắc	45°	20	17,39%
Bắc	0°	18	15,65%
Nam	180°	16	13,91%
Tây Bắc	315°	16	13,91%
Đông Nam	135°	14	12,17%
Tây Nam	225°	12	10,43%
Đông	90°	10	8,70%
Tây	270°	9	7,83%

Để xây dựng lớp dữ liệu về tốc độ gió điều chỉnh cần thu thập các dữ liệu liên quan đến tần suất xuất hiện của các cấp độ gió biển khác nhau tại khu vực nghiên cứu, từ đó lựa chọn các tốc độ gió phổ biến để xây dựng kịch bản thử nghiệm. Bảng 6 biểu diễn tần suất xuất hiện của các cấp độ gió biển khác nhau đo được tại Vịnh Bắc Bộ từ thông tin thu thập tại Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Bảng 6. Tần suất tốc độ gió thu thập tại Vịnh Bắc Bộ.

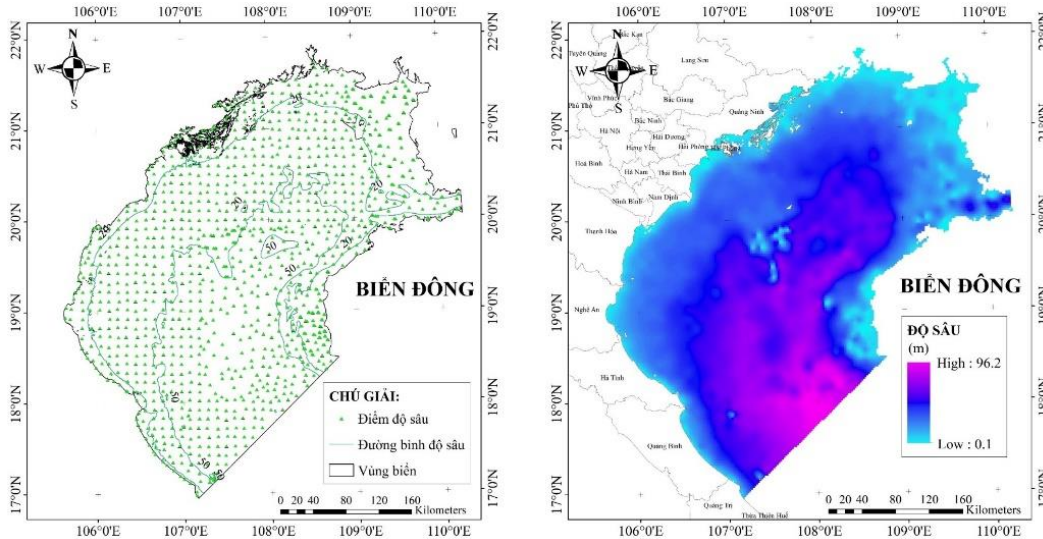
Tốc độ gió (m/s)	Tần suất (x 4696 lần)	Phần trăm (%)
1 - 5	20	17,39
6 - 10	38	33,04
10 - 15	48	41,74
> 15	9	7,83



Hình 3. Kết quả xác định lớp dữ liệu lấy gió (wind fetch) với các hướng gió khác nhau.

Trên các hình 3 trình bày kết quả xây dựng lớp dữ liệu lấy gió với các hướng gió khác nhau, bao gồm: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° và 315°. Phương pháp SPM (*Shore Protection Manual*) được lựa chọn để tính toán lớp dữ liệu lấy gió.

Hình 4 biểu diễn dữ liệu điểm độ sâu thực tế thu thập tại khu vực Vịnh Bắc Bộ. Dữ liệu bao gồm 1180 điểm với độ sâu từ 0,1 m đến 96 m. Tiếp theo, trong nghiên cứu đã lựa chọn sử dụng thuật toán nội suy Spline để tạo bản đồ độ sâu dạng raster nhằm xây dựng dữ liệu đầu vào cho mô hình tính toán chiều cao sóng. Đây là phương pháp nội suy được sử dụng phổ biến trong xây dựng dữ liệu về địa hình, nhất là địa hình đáy biển, tạo ra bề mặt mượt mà và có độ chính xác cao. Dữ liệu độ sâu dạng raster được hiển thị trong Hình 4, trong đó độ sâu khu vực nghiên cứu có giá trị từ 0,1 m đến 96,2 m.



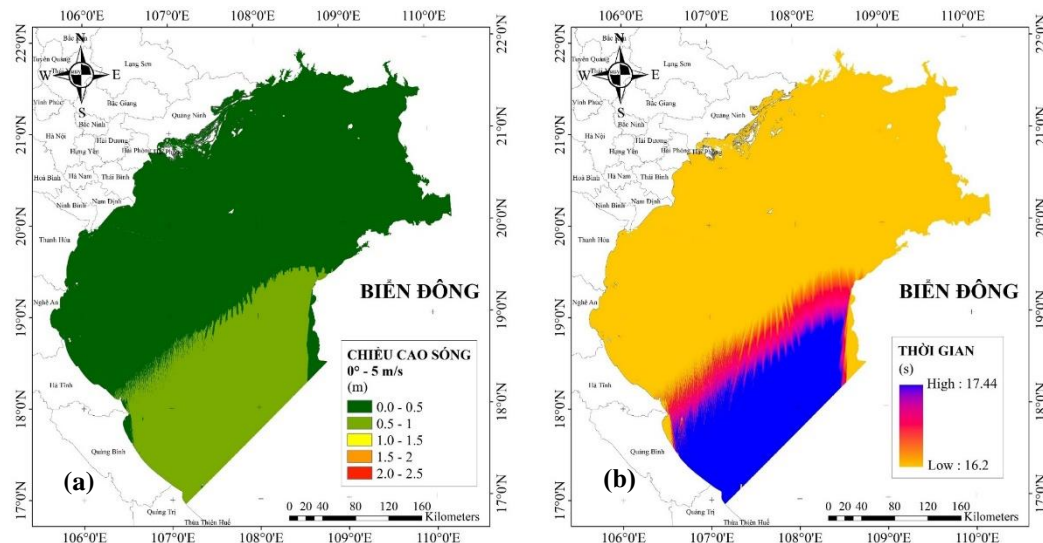
Hình 4. Kết quả xây dựng lớp dữ liệu độ sâu đáy biển bằng phương pháp nội suy Spline.

3.2. Xây dựng các kịch bản thử nghiệm

Trong nghiên cứu, các tác giả đã xây dựng 03 kịch bản thử nghiệm với các thông tin khác nhau về tàu tìm kiếm, cứu nạn cũng như đặc điểm điều kiện thời tiết.

a) Kịch bản 1: Sử dụng tàu TS-01 của lực lượng Hải quân trong tìm kiếm, cứu nạn. Thời tiết trời nắng, gió thổi hướng Bắc (0°), tốc độ gió là 5 m/s.

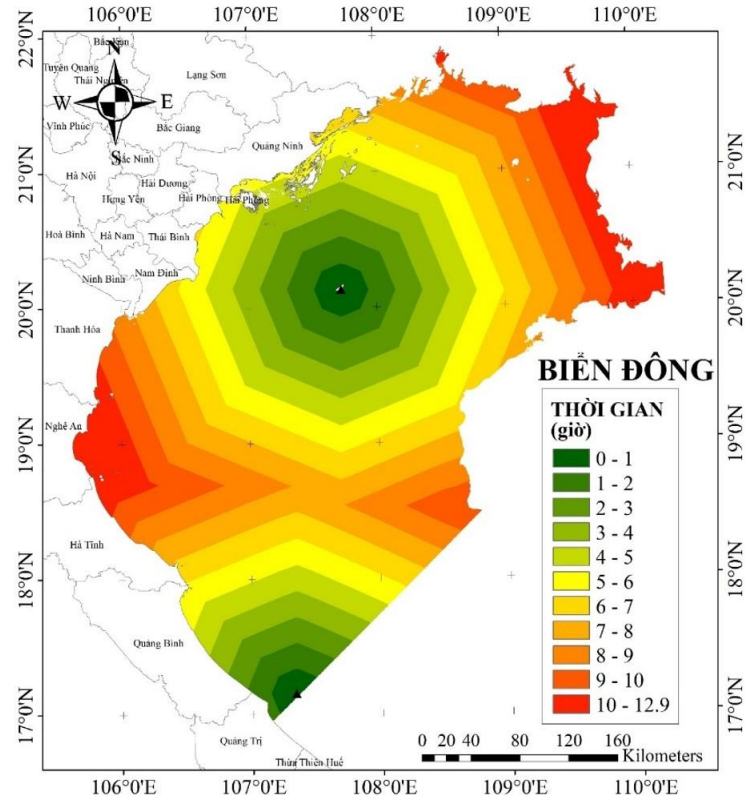
Trên hình 5a trình bày kết quả xây dựng lớp dữ liệu chiều cao sóng biển khu vực nghiên cứu. Có thể nhận thấy, trong kịch bản 1 khi thời tiết thuận lợi, gió nhẹ, chiều cao sóng biển khu vực vịnh Bắc Bộ đạt thấp, chủ yếu dưới 1 m. Khu vực ven bờ có độ cao sóng biển từ 0



Hình 5. Kết quả tính chiều cao sóng biển và thời gian đi hết một đơn vị không gian của tàu SAR (kịch bản 1).
đến 0,5 m; trong khi với khu vực xa bờ, độ cao sóng biển đạt từ 0,5 đến 1 m. Từ kết quả này, trong nghiên cứu đã xác định thời gian để tàu tìm kiếm, cứu nạn đi hết một đơn vị không gian

(kích thước 100 m) đối với kích bản 1 (Hình 5b). Có thể nhận thấy, với kích bản 1 (điều kiện thời tiết tốt, tốc độ gió biển 5 m/s), thời gian để tàu tìm kiếm, cứu nạn TS-01 của lực lượng Hải quân đi hết 01 đơn vị không gian ảnh (100 m) nằm trong khoảng từ 16,2 giây đến 17,44 giây. Thời gian phản hồi thấp tại khu vực gần bờ (độ cao sóng biển từ 0-0,5 m), tăng dần về phía xa bờ khi độ cao sóng biển nằm trong khoảng từ 0,5 m đến 1 m.

Bản đồ thời gian phản hồi (khoảng cách hiệu dụng) đối với tàu tìm kiếm, cứu nạn TS-01 khi xảy ra sự cố trên biển trong kích bản 1 được thể hiện trên hình 6, trong đó hình tam giác màu đen là ký hiệu các trạm tìm kiếm, cứu nạn, đặt tại đảo Bạch Long Vỹ (thành phố Hải Phòng) và đảo Cồn Cỏ (tỉnh Quảng Bình). Để trực quan, bản đồ thời gian phản hồi được chia thành các khoảng, cách nhau 1 giờ. Khi nhận được thông tin và vị trí xảy ra sự cố, bản đồ khoảng cách hiệu dụng cho phép xác định nhanh thời gian từ các trạm tìm kiếm, cứu nạn tới vị trí xảy ra sự cố; giúp nâng cao hiệu quả công tác tìm kiếm và cứu hộ trên biển.

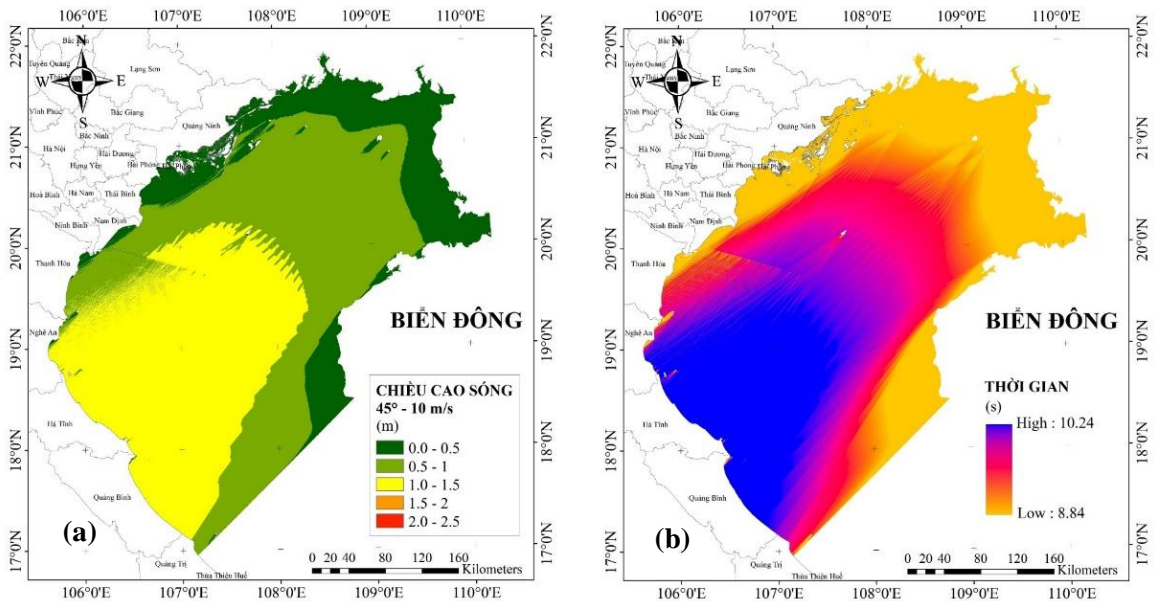


Hình 6. Bản đồ khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển (kích bản 1).

b) Kích bản 2: Trong kích bản này, các tác giả sử dụng tàu CN-09 của Bộ đội Biên phòng để tìm kiếm, cứu nạn.

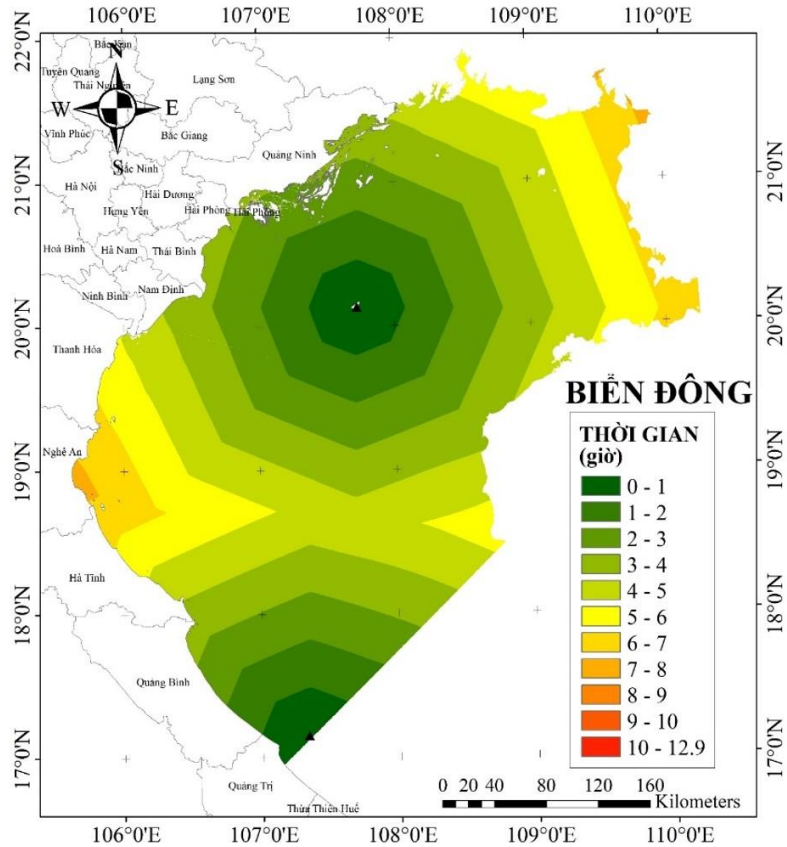
Thời tiết trời nắng, gió thổi hướng Đông Bắc (45°), tốc độ gió 10 m/s. Như vậy, tốc độ gió biển trong kích bản 2 cao hơn đáng kể so với kích bản 1 (5 m/s).

Từ thông tin về tốc độ gió điều chỉnh, ảnh lấy gió, gia tốc trọng trường và bản đồ độ sâu đáy biển, trong kích bản 2 cũng xây dựng được lớp dữ liệu về chiều cao sóng biển (Hình 7a),



Hình 7. Kết quả tính chiều cao sóng biển và thời gian đi hết một đơn vị không gian của tàu SAR (kích bản 2).

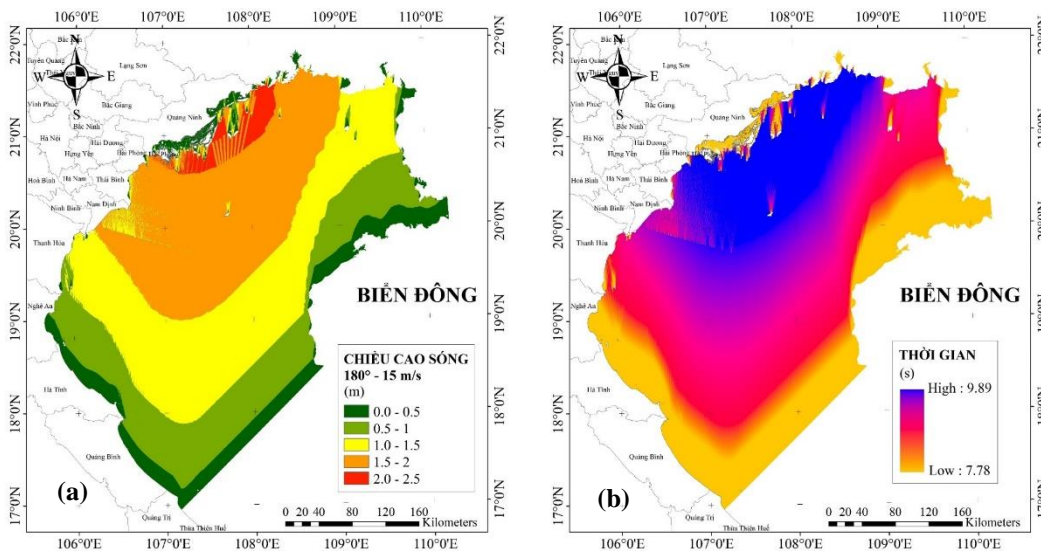
trong đó chiều cao sóng biển tại khu vực nghiên cứu nằm trong khoảng từ 0 đến 2,5 m. Hình 7b trình bày kết quả xác định thời gian đi hết 1 đơn vị không gian (100 m) của tàu CN-09 trong tìm kiếm, cứu nạn tại khu vực nghiên cứu đối với kịch bản 2. Tùy thuộc đặc điểm cụ thể tại từng vị trí ở khu vực nghiên cứu, thời gian để đi hết 01 đơn vị không gian của tàu CN-09 nằm trong khoảng từ 8,84 giây đến 10,24 giây. Kết quả xác định thời gian phản hồi (khoảng cách hiệu dụng) trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển đối với kịch bản 2 được thể hiện trên hình 8. Có thể nhận thấy, với kịch bản 2, thời gian phản hồi khi nhận được thông tin về sự cố trên biển thấp hơn đáng kể so với kịch bản 1 do tốc độ của tàu CN-09 (Bộ đội Biên phòng) cao hơn nhiều so với tàu TS-01 (Quân chủng Hải quân).



Hình 8. Bản đồ khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển (kịch bản 2).

c) Kịch bản 3: Trong kịch bản 3, các tác giả sử dụng tàu tìm kiếm, cứu nạn KN-579 của Cục Kiểm ngư (Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn). Tàu có vận tốc lớn nhất đạt 25 hải lý/giờ. Thời tiết trời nắng, gió thổi hướng Nam (180°), tốc độ gió là 15 m/s. Như vậy, trong kịch bản này, tốc độ gió biển đạt cao nhất so với 02 kịch bản trước (15 m/s, so với 10 m/s và 5 m/s).

Kết quả xác định chiều cao sóng biển khu vực vịnh Bắc Bộ từ dữ liệu đầu vào trong kịch bản 3 được thể hiện trên hình 9a. Trong kịch bản này, chiều cao sóng biển cũng tương tự như với kịch bản 2, nằm trong khoảng từ 0 đến 2,5 m. Tuy nhiên, do tốc độ gió biển lớn hơn so



Hình 9. Kết quả tính chiều cao sóng biển và thời gian đi hết một đơn vị không gian của tàu SAR (kịch bản 3).

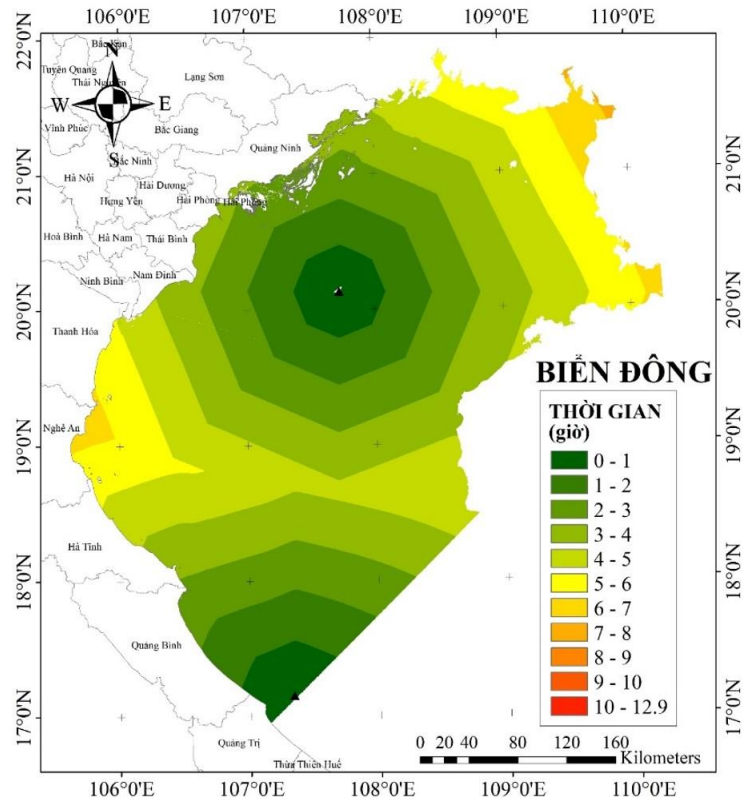
với kịch bản 2, trong kịch bản 3, chiều cao sóng biển có sự phân biệt khá rõ ràng đối với các khu vực khác nhau ở vịnh Bắc Bộ, trong đó chiều cao sóng biển đạt lớn nhất ở gần bờ (khu vực ven biển Quảng Ninh, Hải Phòng). Chiều cao sóng biển thấp dần về phía xa bờ, thể hiện bởi màu xanh trên hình 9a. Thời gian để tàu tìm kiếm, cứu nạn KN-579 của Cục Kiểm ngư (Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn) đi hết 01 đơn vị không gian ảnh (100 m) được thể hiện trên hình 9b. Do tốc độ tàu KN-579 cao nhất so với các tàu TS-01 và CN-09, thời gian đi hết 01 đơn vị không gian trong kịch bản 3 đạt thấp nhất, trong khoảng từ 7,78 giây đến 8,89 giây.

Từ kết quả này, trong nghiên cứu tiến hành tính toán thời gian phản hồi đối với tàu KN-579 tại 02 trạm cứu nạn ở đảo Bạch Long Vỹ (Hải Phòng) và Côn Cỏ (Quảng Bình) khi xảy ra sự cố trên biển đối với kịch bản 3. Kết quả xây dựng bản đồ thời gian phản hồi đối với kịch bản 3 được thể hiện trên hình 10. Có thể nhận thấy, với điều kiện thời tiết và thủy, hải văn như trong kịch bản 3, sử dụng tàu tìm kiếm, cứu nạn KN-579 cho phép tiếp cận khu vực gặp nạn trong khoảng từ 0 (màu xanh đậm) đến 8 giờ (màu cam) (Hình 10).

Ba kịch bản được xây dựng tương ứng với các điều kiện về khí tượng, hải văn phổ biến trên khu vực nghiên cứu cũng như đặc điểm các trang thiết bị tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Các bản đồ khoảng cách hiệu dụng nhận được trong từng kịch bản cung cấp thông tin đầu vào quan trọng cho các lực lượng tìm kiếm, cứu nạn trên biển tùy theo từng điều kiện khí tượng, hải văn khác nhau trong xây dựng phương án tiếp cận khu vực xảy ra sự cố, trong đó các tàu tìm kiếm, cứu nạn xuất phát từ 02 trạm đặt tại đảo Bạch Long Vỹ (thành phố Hải Phòng) và đảo Côn Cỏ (tỉnh Quảng Bình).

4. Kết luận

Tìm kiếm, cứu nạn trên biển là một công việc có tính đặc thù, đòi hỏi tính khẩn cấp và yêu cầu cao về phương tiện, thiết bị, nhân lực. Việc sử dụng phương pháp mô hình hóa nhằm xác định thời gian phản hồi tới đối tượng cần tìm kiếm, cứu nạn sau khi tiếp nhận thông tin về sự cố trên biển là một tiếp cận phù hợp, cung cấp thông tin đầu vào kịp thời cho các lực lượng tìm kiếm, cứu nạn xây dựng kế hoạch khả thi, phù hợp với điều kiện cụ thể từng khu vực. Nội dung bài báo đã thu thập dữ liệu và xây dựng bộ dữ liệu đầu vào bao gồm các yếu tố: dữ liệu tàu tìm kiếm, cứu nạn; tốc độ gió điều chỉnh; lấy gió (*wind fetch*), gia tốc trọng trường, bản đồ độ sâu nhằm xác định chiều cao sóng biển hiệu chỉnh cũng như tính toán được thời gian các tàu tìm kiếm, cứu nạn đi hết một đơn vị không gian (100 m) trên khu vực biển vịnh Bắc Bộ. Từ kết quả này, trong nghiên cứu đã xây dựng được bản đồ thời gian phản hồi (khoảng cách hiệu dụng) trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển với các kịch bản khác nhau. Thông



Hình 10. Bản đồ khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển (kịch bản 3).

tin này giúp các lực lượng chức năng xây dựng các phương án tìm kiếm, cứu nạn phù hợp tùy theo điều kiện thời tiết, trang thiết bị cụ thể.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: N.Q.M., B.T.D.; Xử lý số liệu: N.Q.M.; Viết bản thảo bài báo: N.Q.M.; Chỉnh sửa bài báo: N.V.T.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. An, L.Đ. Hệ thống đảo ven bờ Việt Nam - Tài nguyên và phát triển. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ. 2008.
2. Breivik, O.; Allen, A.; Maisondieu, C.; Olagnon, M. Advances in search and rescue at sea. *Ocean Dyn.* **2013**, 63(1), 83–88.
3. Xiong, W.; van Gelder, P.; Yang, K. A decision support method for design and operationalization of search and rescue in maritime emergency. *Ocean Eng.* **2020**, 207, 107399. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107399>.
4. Venalainen, E. Evaluating voluntary emergency response in the Gulf of Finland. Master thesis of Geography and Geoinformatics, 2014, pp. 118.
5. Burns, D. Application of GIS for coastal rescue response. Proceeding of the 2014 Esri User Conference Paper Sessions. 2014. Available online: <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc14/>.
6. Karatas, M.; Razi, N.; Gunal, M. An ILP and simulation model to optimize search and rescue helicopter operations. *J. Oper. Res. Soc.* **2017**, 68, 1335–1351.
7. Ferrrari, J. A study of optimal search and rescue operations planning problems. Thesis for degree of Doctor of Philosophy (Industrial Engineering). Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 2019.
8. Zhou, X.; Cheng, L.; Min, K.; Zuo, X.; Yan, Z.; Ruan, X.; Chu, S.; Li, M. A framework for assessing the capability of maritime search and rescue in the south China Sea. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2020**, 47, 101568. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101568>.
9. Ashrafi, B.; Kim, G.; Naseri, M.; Barabady, J.; Dhar, S.; Heo, G.; Baek, S. An agent-based modelling framework for performance assessment of search and rescue operations in the Barents Sea. *Saf. Extreme Environ.* **2024**. <https://doi.org/10.1007/s42797-024-00101-2>.
10. Định, N.Đ.; Minh, T.B.; Toàn, H.V.; Pha, N.P.; Phục, Đ.N. Ứng dụng công nghệ thông tin trong hỗ trợ tính toán vị trí chuẩn, xác định khu vực tìm kiếm và xây dựng kế hoạch tìm kiếm, cứu nạn trên biển. *Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự* **2018**, 253–263.
11. Phương, N.V.; Hoài, Đ.K.; Đức, T.M.; Vinh, C.T. Phương pháp phát hiện dị thường trên ảnh viễn thám quang học ứng dụng trong công tác tìm kiếm cứu nạn. *Tạp chí Khoa học trường Đại học Cần Thơ, phần A: Khoa học Tự nhiên, Công nghệ và Môi trường* **2020**, 56(1A), 21–36.
12. An, P.T.; Bắc, Đ.Đ.; Xuân, N.T. Tích hợp công nghệ viễn thám và GIS trong hỗ trợ công tác tìm kiếm cứu nạn thiên tai ở Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ* **2011**, 9, 54–58.
13. Hải, L.V.H.; Thành, N.S.; Dương, Đ.V.; Nga, N.T.T.; Thủy, N.T.T.; Hạnh, T.T. Xây dựng cơ sở dữ liệu không gian hỗ trợ tìm kiếm, cứu nạn, cứu nạn trên biển dựa trên GIS mã nguồn mở. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên* **2021**, 226(02), 42–50.

14. Thành, N.S.; Dương, Đ.V.; Hải, L.V.H.; Hoài, Đ.K.; Nga, N.T.T.; Lộc, L.Đ.; Thủy, N.T.T. Giải pháp hệ thống tin địa lý mã nguồn mở trong hỗ trợ hoạt động tìm kiếm cứu nạn hàng hải. *Tạp chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường* **2022**, 41, 22–33.
15. Hà, P.N.; Ty, L.V.; Triều, T.H.; Đức, N.M. Nghiên cứu xây dựng mô hình hệ thống hỗ trợ tìm kiếm cứu nạn cho vùng biển Việt Nam. *Tạp chí Khoa học công nghệ Hàng hải* **2019**, 59, 90–95.
16. Sơn, N.T.; Huy, Đ.V.; Thanh, T.Đ. Địa hình đáy vịnh Bắc Bộ. Tài nguyên và Môi trường biển. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội, 1996, tr. 16–26.
17. Thanh, T.Đ.; An, L.Đ. Tài nguyên vị thế tự nhiên đảo Bạch Long Vỹ. *Tạp chí Các khoa học về Trái đất* **2012**, 34(4), 447–485.
18. Thắng, N.V.; Khiêm, M.V.; Hiệu, N.T.; Thăng, V.V.; Mậu, N.Đ.; Tuyết, L.T. Ảnh hưởng của bão ở Việt Nam thời kỳ 1961 - 2014. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường* **2016**, 32(3S), 310–316.
19. Tuấn, N.N.; Hướng, N.V.; Thảo, Đ.T.P.; Huyền, N.T.T.; Văn, C.T. Nghiên cứu chế độ mưa, nhiệt tại vùng biển Vịnh Bắc Bộ từ dữ liệu vệ tinh. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2019**, 755(1), 19–28.
20. Lončar, G.; Šreng, Ž.; Miličević, H.; & Ostojić, S. Increase of Wave Height Due to Transition in Wind Direction—Example: Rijeka Bay. *Adv. Civil Archit. Eng.* **2019**, 10(18), 57–70.
21. Hoffmann, M.; Roy, S.; Berger, A.; Bergmann, W.; Chan, K.; Shubbak, M.; Langhorst, J.; Schnauder, T.; Strub, O.; Buskens, C. Wind affected maneuverability of Tungboat-controlled ships. *IFAC-PapersOnLine* **2021**, 54(16), 70–75.
22. Zhang, L.; Li, J.; Liu, C.; Zhang, W. A robust fuzzy speed regulator for unmanned sailboat robot via the composite ILOS guidance. *Nonlinear Dyn.* **2022**, 110(3), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11071-022-07763-2>.
23. Rohweder, J.; Rogala, J.; Johnson, B.; Anderson, D.; Clark, S.; Chamberlin, F.; Potter, D.; Runyon, K. Application of wind fetch and wave models for habitat rehabilitation and enhancement projects. Contract report prepared for U.S. Army Corps of Engineers' Upper Mississippi River Restoration - Environmental Management Program, 2012, pp. 52.
24. Siljander, M.; Venäläinen, E.; Goerlandt, F.; Pellikka, P. GIS-based cost distance modelling to support strategic maritime search and rescue planning: A feasibility study. *Appl. Geogr.* **2015**, 57, 54–70.
25. Castro, R. Gravitational acceleration equation with wavelength and speed of light without using the universal gravitational constant of Newton. HAL open Science, 2014, pp. 12. Available online: <https://hal.science/hal-00947254v6/document>.
26. Herterich, J.G.; Dias, F. Extreme long waves over a varying bathymetry. *J. Fluid Mechanics* **2019**, 878, 481–501.
27. Salameh, E.; Frappart, F.; Almar, R.; Baptista, P.; Heygster, G.; Lubac, B.; Raucoules, D.; Almeida, L.P.; Bergsma, E.W.J.; Capo, S.; De Michele, M.; Idier, D.; Li, Z.; Mariue, V.; Poupardin, A.; Silva, P.A.; Turki, I.; Laignel, B. Monitoring beach topography and nearshore bathymetry using spaceborne remote sensing: A review. *Remote Sens.* **2019**, 11(19), 2212.
28. Shepard, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference, 1968, pp. 517–524.
29. USACE. Shore Protection Manual. Coastal Engineering Research Center; Fort Belvoir, Virginia, 1984, pp. 652.
30. USACE. Coastal Engineering Manual 10-2-1100. Parts 1-6; Washington DC, 2002.
31. Tiệp, N.T. và cộng sự. Atlas Điều kiện Tài nguyên và Môi trường vùng biển Việt Nam. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội, 2009, tr. 112.

Determining cost distance in search and rescue at sea using GIS technology and modeling methods

Nguyen Quang Minh^{1,3}, Bui Tien Dieu², Nguyen Van Trung^{3,4*}

¹ Department of Cartography, The General Staff; nguyenquangminh.sar@gmail.com

² University of South-Eastern Norway; dieu.t.bui@usn.no

³ Hanoi University of Mining and Geology; nguyenvantrung@humg.edu.vn

⁴ Geomatics in Earth Sciences Research Group, Hanoi University of Mining and Geology; nguyenvantrung@humg.edu.vn

Abstract: Vietnam is a coastal country with a long coastline and a large sea area, leading to frequent accidents and incidents at sea, especially under the influence of climate change. This paper presents the results of determining the cost distance in search and rescue at sea in the Gulf of Tonkin based on the modeling method and GIS data. In the study, the data layers include: (1) Search and rescue vessel data, (2) adjusted wind speed, (3) wind fetch, (4) gravitational acceleration and (5) bathymetric maps used to determine response time (cost distance) in search and rescue at sea. Three scenarios with different weather conditions and characteristics of search and rescue vessels were tested to build cost distance maps. The results obtained in the study provide important information, helping functional forces develop appropriate search and rescue plans depending on weather conditions and specific equipment.

Keywords: Search and Rescue; Cost distance; GIS; Modelling; Gulf of Tonkin.