

TẠP CHÍ

KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN

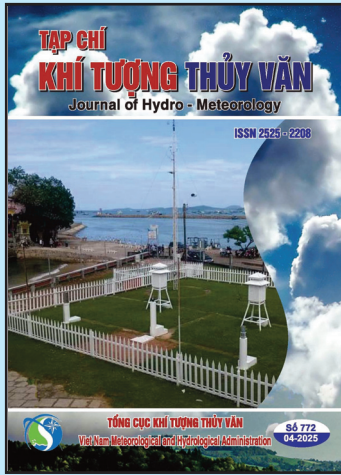
Journal of Hydro - Meteorology

ISSN 2525 - 2208



TỔNG CỤC KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN
Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration

Số 772
04-2025



Q. TÔNG BIÊN TẬP PGS. TS. Đoàn Quang Trí

- | | |
|------------------------------|-----------------------------|
| 1. GS. TS. Trần Hồng Thái | 14. PGS. TS. Mai Văn Khiêm |
| 2. GS. TS. Trần Thực | 15. PGS. TS. Nguyễn Bá Thủy |
| 3. GS. TS. Mai Trọng Nhuận | 16. TS. Tống Ngọc Thanh |
| 4. GS. TS. Phan Văn Tân | 17. TS. Đinh Thái Hưng |
| 5. GS. TS. Nguyễn Kỳ Phùng | 18. TS. Võ Văn Hòa |
| 6. GS. TS. Phan Đình Tuấn | 19. TS. Nguyễn Đắc Đồng |
| 7. GS. TS. Nguyễn Kim Lợi | 20. GS. TS. Kazuo Saito |
| 8. PGS. TS. Nguyễn Văn Thắng | 21. GS. TS. Jun Matsumoto |
| 9. PGS. TS. Dương Văn Khảm | 22. GS. TS. Jaecheol Nam |
| 10. PGS. TS. Dương Hồng Sơn | 23. TS. Keunyong Song |
| 11. TS. Hoàng Đức Cường | 24. TS. Lars Robert Hole |
| 12. TS. Bạch Quang Dũng | 25. TS. Sooyoul Kim |
| 13. PGS. TS. Đoàn Quang Trí | |

Giấy phép xuất bản

Số: 225/GP-BTTTT - Bộ Thông tin Truyền thông cấp ngày 08/6/2015

Tòa soạn

Số 8 Pháo Đài Láng, Đống Đa, Hà Nội
Điện thoại: 024.39364963
Email: Tapchikttv@gmail.com

Chế bản và In tại:

Công ty Cổ Phần In và Thương Mại Hà Thành Thăng Long
ĐT: 0243.2022639

Ảnh bìa: Trạm Quan trắc Khí tượng bề mặt Phú Quốc

Giá bán: 40.000 đồng

TẠP CHÍ KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN SỐ 772 - 4/2025

MỤC LỤC

Bài báo khoa học

- Nguyễn Văn Hương, Vũ Văn Khương, Nguyễn Hoàng Minh, Phan Đăng Liêm, Nguyễn Văn Hải, Phan Thị Thùy Dương:** Nghiên cứu đặc điểm sinh học và phân bố ngư trường mực lá đại dương ở vùng biển Việt Nam
- Nguyễn Đình An, Đỗ Ngọc Hoàn, Trần Đình Bão:** Áp dụng phương pháp đánh giá đa tiêu chí xác định mức độ an toàn, vệ sinh lao động trong hoạt động nổ mìn cho các mỏ đá khu vực Nam Trung Bộ
- Đoàn Thu Hà, Nguyễn Trung Nam:** Đánh giá tác động ngập lụt và đề xuất giải pháp thích ứng cho các thành phố tỉnh Bình Dương - Giai đoạn 2030-2050
- Dương Bích Tuyền, Đỗ Xuân Hồng, Lê Trọng Diệu Hiền:** Nghiên cứu ứng dụng ảnh viễn thám Sentinel-2 kết hợp hồi quy đa biến xác định diễn biến nồng độ tổng chất rắn lơ lửng sông Thị Tính, tỉnh Bình Dương
- Vũ Xuân Định:** Ứng dụng Google Earth Engine trong phát triển hệ thống giám sát biến động lớp phủ rừng Việt Nam
- Lê Văn Hưng, Trần Xuân Hiền, Vũ Anh Tuấn, Lê Thị Thanh Quỳnh, Lê Phương Thúy, Vũ Thị Ngọc Mai, Nguyễn Thị Tuyết:** Đánh giá tác động của mưa trái mùa đến nguồn nước trên các sông chính ở Tây Nguyên
- Nguyễn Quang Minh, Nguyễn Văn Trung:** Đánh giá ảnh hưởng của gió đến thời gian tiếp cận khu vực cần tìm kiếm, cứu nạn trên biển, áp dụng thí điểm ở vịnh Bắc Bộ
- Phạm Thị Thúy, Lê Hải Trung:** Ảnh hưởng của sóng nước nông tới hiệu quả giảm sóng của rạn ngầm nhân tạo trên thềm đảo nổi xa bờ

Bài báo khoa học

Nghiên cứu đặc điểm sinh học và phân bố ngư trường mực lá đại dương ở vùng biển Việt Nam

Nguyễn Văn Hương^{1*}, Vũ Văn Khương, Nguyễn Hoàng Minh¹, Phan Đăng Liêm¹, Nguyễn Văn Hải¹, Phan Thị Thùy Dương²

¹ Viện Nghiên cứu Hải sản; nvhuong0509@gmail.com; nhminh10@gmail.com; vvkhuong@rimf.org.vn; pdliem@rimf.org.vn; nvhai@rimf.org.vn

² Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP.HCM; pttduong@hcmunre.edu.vn

*Tác giả liên hệ: nhminh10@gmail.com; Tel: +84-989085715

Ban biên tập nhận bài: 25/9/2024; Ngày phản biện xong: 18/11/2024; Ngày đăng bài: 25/4/2025

Tóm tắt: Mực lá đại dương (*Thysanoteuthis rhombus*) là đối tượng ít được qua tâm nghiên cứu ở Việt Nam, nên các thông tin về phân bố và sinh học còn thiếu. Dựa trên 60 mẫu mực lá đại dương (*Thysanoteuthis rhombus*) được thu thập ngẫu nhiên trên tàu câu mực và số liệu sổ nhật ký khai thác từ 03 nghề (nghề câu cá ngừ đại dương, lưới chụp và câu tay mực) trong thời gian từ tháng 6 đến tháng 12 năm 2023. Bằng phương pháp phân tích, xử lý số liệu thường quy đã xác định được loài mực lá đại dương ở biển Việt Nam có phương trình tương quan chiều dài khối lượng tuân theo hàm mũ, với hệ số $a = 2 \times 10^{-5}$ và $b = 3,0895$. Thức ăn chủ yếu của mực lá trưởng thành là nhóm cá xương và nhóm chân đầu. Phép phân tích không gian từ sổ nhật ký khai thác đã xác định được ngư trường khai thác mực lá nằm ở vùng biển đặc quyền kinh tế của Việt Nam từ vĩ độ $8^{\circ}30' - 17^{\circ}00'N$ và kinh độ $108^{\circ}00' - 115^{\circ}00'E$. Ngư trường khai thác chính ở phía tây quần đảo Hoàng Sa đến khu vực Bắc Trung Bộ, khu vực giữa Biển, khu vực từ Đông Nam đảo Phú Quý và khu vực quần đảo Trường Sa.

Từ khóa: Mực lá đại dương; Ngư trường mực lá đại dương; Đặc điểm sinh học.

1. Mở đầu

Mực lá đại dương (*Thysanoteuthis rhombus*) là loài phân bố ở các vùng nước nhiệt đới và cận nhiệt đới nơi có độ sâu lớn hơn 400 m [1, 2]. Cá thể mực trưởng thành thường phân bố ở tầng nước từ 200-600 m vào ban ngày và di chuyển đến tầng nước phía trên sau khi mặt trời lặn, trong khi con non sống ở vùng nước nông hơn [3]. Loài mực này có thể phát triển chiều dài vây lưng đạt tới 100cm, khối lượng cao nhất đánh bắt được đạt 30 kg [3], thức ăn chính là cá, giáp xác, động vật thân mềm nhỏ [4]. Căn cứ vào số liệu sinh học và thông tin khai thác từ nghề cá, các nhà khoa học đã mô tả phân bố của chúng theo chiều rộng và chiều thẳng đứng như: ở vùng biển Nhật Bản [1, 5], ở vùng biển Philiphine [6], khu vực giữa Thái Bình Dương, biển Ả rập, Châu Úc ... mùa vụ khai thác chính ở Nhật từ tháng 2 đến 7 [7].

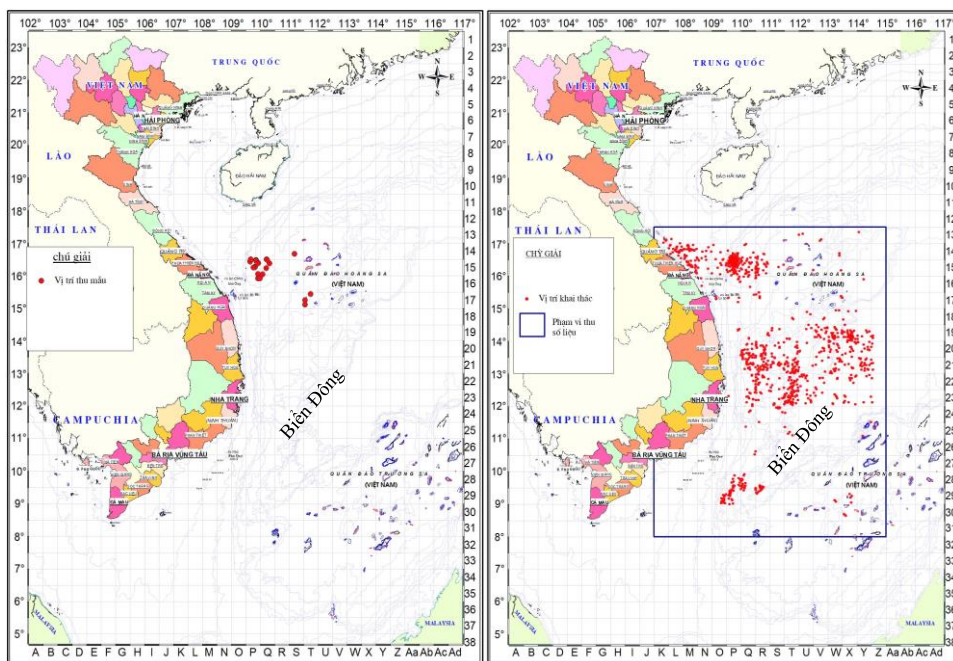
Ở Việt Nam, loài mực lá đại dương được ghi nhận thường xuyên bắt gặp trong các chuyến điều tra bằng nghề lưới rê và câu vàng ở vùng biển xa bờ miền Trung và giữa Biển Đông [8-10]. Do loài này không phải là đối tượng chính cần thu thập nghiên cứu nên không có nhiều thông tin về phân bố và đặc điểm sinh học. Tuy nhiên, kết quả tổng hợp từ các công trình trước đây cho thấy, loài mực lá ở nước ta chủ yếu được khai thác không chú ý từ các nghề như: nghề câu mực xà, câu cá ngừ đại dương và lưới chụp ở cá tỉnh miền trung từ Đà Nẵng đến Khánh Hoà [11, 12]. Thời gian khai thác mực lá nhiều nhất từ tháng 2 đến tháng 6 hàng năm.

Có thể nói, loài mực lá này ở nước ta còn ít được quan tâm nghiên cứu, nhất là thông tin về sinh học và phân bố của chúng. Căn cứ vào những vấn đề trên, chúng tôi đã dựa trên nguồn số liệu được thu thập ngẫu nhiên từ các chuyến giám sát khai thác và sổ nhật ký khai thác của nghề câu cá ngừ đại dương, nghề câu mực và nghề lưới chụp từ tháng 6-12/2023 tiến hành phân tích, tổng hợp nhằm góp phần bổ sung các thông tin về phân bố và sinh học của mực lá ở Việt Nam. Trong đó, đặc điểm sinh học mực lá là căn cứ để xác định mỗi câu, độ sâu thả câu còn phân bố làm cơ sở để xác định vùng khai thác chính, giúp đội tàu nâng cao khả năng khai thác.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Thu mẫu

- Phạm vi thu mẫu: được giới hạn từ 8°00' - 17°30'N và 107° - 115°00'E (Hình 1).
- Mẫu dạ dày của mực lá đại dương (*Thysanoteuthis rhombus*) được thu ngẫu nhiên từ các mẻ lưới trên tàu câu mực (Hình 1). Trước khi tiến hành giải phẫu để lấy dạ dày, các cá thể mực lá đại dương được cân khối lượng (W) với độ chính xác đến 1g, và đo chiều dài áo mực (ML) với độ chính xác 1 mm. Mẫu dạ dày sau khi thu được cố định và bảo quản trong dung dịch formol 10% để đưa về phân tích trong phòng thí nghiệm. Tổng số mẫu đo chiều dài là 60 mẫu và thu 26 mẫu dạ dày tại 20 mẻ (20 vị trí khác nhau) (Hình 1).
- Sổ nhật ký khai thác được thu từ đội tàu câu mực, cá ngừ đại dương từ Đà Nẵng đến Khánh Hoà ở một số cảng cá chỉ định. Sổ có các chỉ số về số tàu, thời gian khai thác, vị trí khai thác, sản lượng khai thác chung và sản lượng khai thác mực lá đại dương. Thời gian tiến hành thu từ tháng 6 đến tháng 12/2023. Tổng số tàu đã tham gia cung cấp sổ là 45 tàu, trong đó tàu câu mực: 30 sổ, tàu câu cá ngừ đại dương là 15 tàu. Bên cạnh đó còn sử dụng thêm 03 chuyến giám sát khai thác trên tàu lưới chụp được thu thập bởi nhiệm vụ: Điều tra ngư trường 2021-2023. Các chuyến giám sát khai thác được thực hiện 7/2023, 9/2023 và 11/2023.



Hình 1. Vị trí thu mẫu mực lá đại dương (bên trái: vị trí thu mẫu dạ dày, n =20; bên phải: vị trí khai thác từ sổ nhật ký khai thác).

2.2. Phân tích tại phòng thí nghiệm

- Xác định độ no: Độ no của dạ dày (*fullness index - FUI*) được xác định theo Nikolski [13], bao gồm: i) Bậc 0: không có thức ăn; ii) Bậc 1: có một ít thức ăn; iii) Bậc 2: Thức ăn chiếm 1/2 dạ dày; iv) Bậc 3: Lượng thức ăn trong dạ dày đầy nhưng vách dạ dày chưa nở to ra; v) Bậc 4: Dạ dày đầy thức ăn và nở căng ra.

- Xác định thành phần thức ăn:

Mẫu dạ dày được cắt dọc theo chiều dài dạ dày, phần thức ăn được cân với độ chính xác đến 1 mg và được giữ lại trên đĩa petri để phân tích. Làm loãng thức ăn bằng nước cất. Vật môi được phân nhóm, cân và đếm tần suất xuất hiện trong mẫu đó. Các loại vật môi bắt gặp trong dạ dày được xác định bậc phân loại thấp nhất có thể, tùy thuộc vào mức độ tiêu hoá. Các thao tác được thực hiện trên kính hiển vi soi nổi.

Thành phần thức ăn trong dạ dày của mực lá đại dương *Thysanoteuthis rhombus* thường bị phân mảnh trong các giai đoạn tiêu hóa khác nhau, do đó rất ít khi con mồi còn nguyên vẹn. Khi con mồi không còn nguyên vẹn thì việc xác định đối với nhóm động vật giáp xác có thể được phân loại dựa trên các mảnh xương ngoài, mắt và thịt màu hồng. Đối với con mồi là nhuyễn thể hai mảnh vỏ thì phần còn lại thường bao gồm các mảnh vỏ và các bó tơ bám. Động vật chân bụng được nhận dạng từ thịt và vỏ còn sót lại. Trong trường hợp của loài thuộc nhóm động vật chân đầu, việc nhận dạng được thực hiện bằng cách sử dụng răng mỏ hoặc xúc tu.

Đối với các con mồi còn nguyên vẹn được định loại theo tài liệu phân loại của FAO [14, 15].

2.3. Tính một số chỉ số sinh học

- Tương quan chiều dài - khối lượng theo Pauly [16]: Được xác định bằng công thức:

$$W = a \times ML^b \quad (1)$$

Trong đó W là khối lượng mực lá (g); ML là chiều dài áo mực lá (mm).

- Xác định thói quen bắt mồi và chế độ ăn của mực lá đại dương

Tính toán chỉ số về con mồi (khối lượng và số lượng) theo Cortés [17], bao gồm:

+ Tỷ lệ dạ dày trống (vacuity index): $VI = (Es/Ts) \times 100$ (2)

Trong đó Es là số dạ dày trống rỗng (FUI = 0); Ts là tổng số mẫu dạ dày phân tích.

+ Tần suất xuất hiện của vật mồi i (*Occurance index*): $OI = (Si/Ts) \times 100$ (3)

Trong đó Si là số dạ dày chứa con mồi i; Ts là tổng số mẫu dạ dày phân tích.

+ Tỷ suất khối lượng của vật mồi i (*Importance in Weight Index*):

$$IWI = (W_i/W_t) \times 100 \quad (4)$$

Trong đó W_i là khối lượng của vật mồi i, W_t là tổng khối lượng của tất cả các vật mồi.

+ Tỷ suất số lượng của vật mồi i (*Importance in Number Index*):

$$INI = (N_i/N_t) \times 100 \quad (5)$$

Trong đó N_i là số lượng vật mồi i; N_t là tổng số lượng vật mồi xác định.

+ Chỉ số xác định vật mồi quan trọng tương đối (*Index of relative importance*):

$$IRI = \% OI \times (\% IWI + \% INI) \quad (6)$$

2.4. Xác định ngư trường khai thác

Sử dụng hệ thống thông tin địa lý (GIS) để chồng ghép các lớp thông tin là năng suất khai thác theo nghề và lớp thông tin về cường lực khai thác nhằm xác định các khu vực ngư trường khai thác chính mực lá đại dương. Thông tin chính được sử dụng để xây dựng các bản đồ dự báo ngư trường khai thác hải sản là năng suất khai thác và tần suất đánh bắt ở từng ô lưới 0,5×0,5 độ kinh vĩ.

Năng suất khai thác của mực lá đại dương theo nghề khai thác được ước tính theo công thức:

$$\overline{CPUE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n CPUE_i \quad (7)$$

Trong đó \overline{CPUE} là năng suất khai thác trung bình của ô lưới; $CPUE_i$ là năng suất khai thác trung bình của của ngày thứ i tại ô lưới. Năng suất khai thác của ngày thứ i được ước tính từ năng suất khai thác của từng tàu trong ngày tại ô lưới đó (đơn vị tính: kg/ngày tàu) [18].

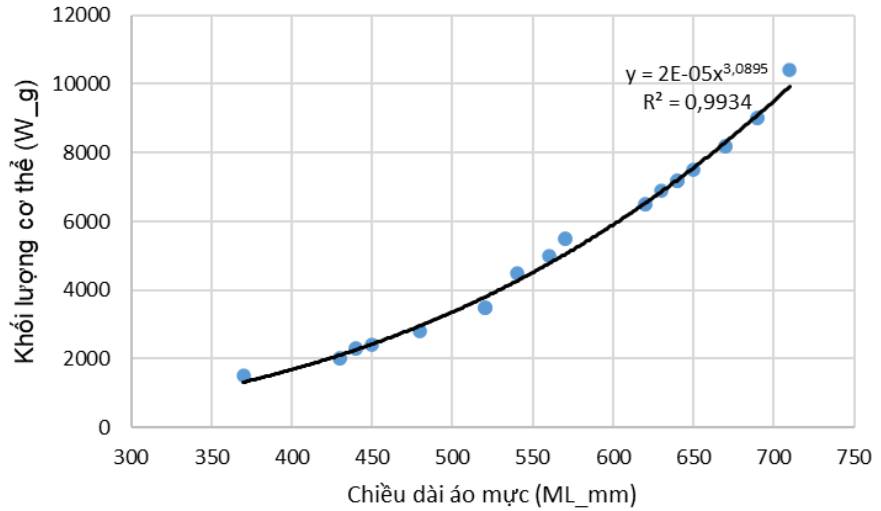
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Chiều dài và kích thước mực lá đại dương

Qua phân tích 60 mẫu mực lá đại dương thu được có phổ kích thước dao động tương đối lớn, trong đó Cá thể nhỏ nhất có chiều dài áo đạt 370 mm, nặng 1.500 g; cá thể lớn nhất có chiều dài đạt 710 mm, nặng 10.400 g. Khối lượng cơ thể và chiều dài áo mực tương quan rất chặt theo hàm số mũ có công thức là $W = 2 \times 10^{-5} \times ML^{3,0895}$, $R^2 = 0,99$ (Hình 2).

3.2. Độ no dạ dày và tỷ trọng thức ăn

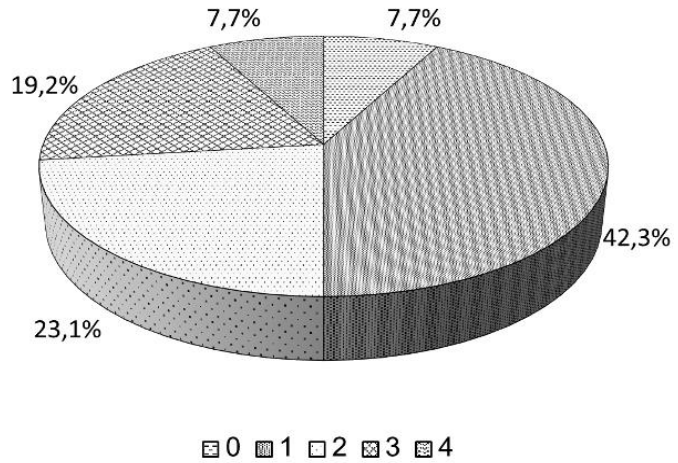
Trong tổng số 26 mẫu dạ dày mực lá đại dương được thu từ chuyên điều tra, có 03 mẫu dạ dày không chứa thức ăn (FUI = 0), tỉ lệ đói VI = 11,6% tổng số mẫu. Các mẫu dạ dày có độ no bậc 1 chiếm tỷ lệ lớn nhất với 11 mẫu, tương ứng với 42,3% tổng số mẫu (Hình 3).



Hình 2. Phương trình tương quan giữa chiều dài và khối lượng mực lá đại dương.

3.3. Thành phần thức ăn và tập tính ăn mồi

Theo kết quả công bố trên Sealifebase cho thấy, mực lá đại dương có phổ thức ăn khá rộng, chúng ăn cá, mực tuộc, giáp xác đáy. Các cá thể nhỏ chưa trưởng thành có xu hướng ăn giáp xác, động vật chân đầu nhỏ và các loài cá. Trong khi đó, những cá thể mực trưởng thành có xu hướng ăn những loài cá kém linh hoạt, di chuyển chậm ở độ sâu 400-650 m (Bảng 1).



Hình 3. Biểu đồ tỷ lệ (%) độ no dạ dày mực lá đại dương.

Bảng 1. Thành phần thức ăn đã được ghi nhận trong dạ dày của T. rhombus từ các nghiên cứu trước đây.

STT	Nhóm	Loài	Quốc gia
1	Giáp xác đáy	Tôm tít	South Africa
2	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	(not available)
3	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	(not available)
4	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	(not available)
5	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	(not available)
6	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	(not available)
7	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	(not available)
8	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	(not available)
9	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	South Africa
10	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	(not available)
11	Động vật chân đầu	Mực ống/mực nang	Japan
12	Cá vây	Cá xương	(not available)

STT	Nhóm	Loài	Quốc gia
13	Cá vây	Cá xương	<i>Chauliodus sloani</i> (not available)
14	Cá vây	Cá xương	<i>Cubiceps sp.</i> (not available)
15	Cá vây	Cá xương	<i>Cyclothone sp.</i> (not available)
16	Cá vây	Cá xương	<i>Diaphus sp.</i> (not available)
17	Cá vây	Cá xương	<i>Hygophum sp.</i> (not available)
18	Cá vây	Cá xương	<i>Myctophum sp.</i> (not available)
19	Cá vây	Cá xương	<i>Nemichthys sp.</i> (not available)
20	Cá vây	Cá xương	<i>Paralepis sp.</i> (not available)
21	Cá vây	Cá xương	<i>Sardinops sagax</i> Japan
22	Cá vây	Cá xương	<i>Stomias sp.</i> (not available)
23	Cá vây	Cá xương	<i>unspecified fishes</i> South Africa
24	Thân mềm	Bạch tuộc	<i>Japetella diaphana</i> (not available)
25	Thân mềm	Bạch tuộc	<i>Ocythoe tuberculata</i> (not available)

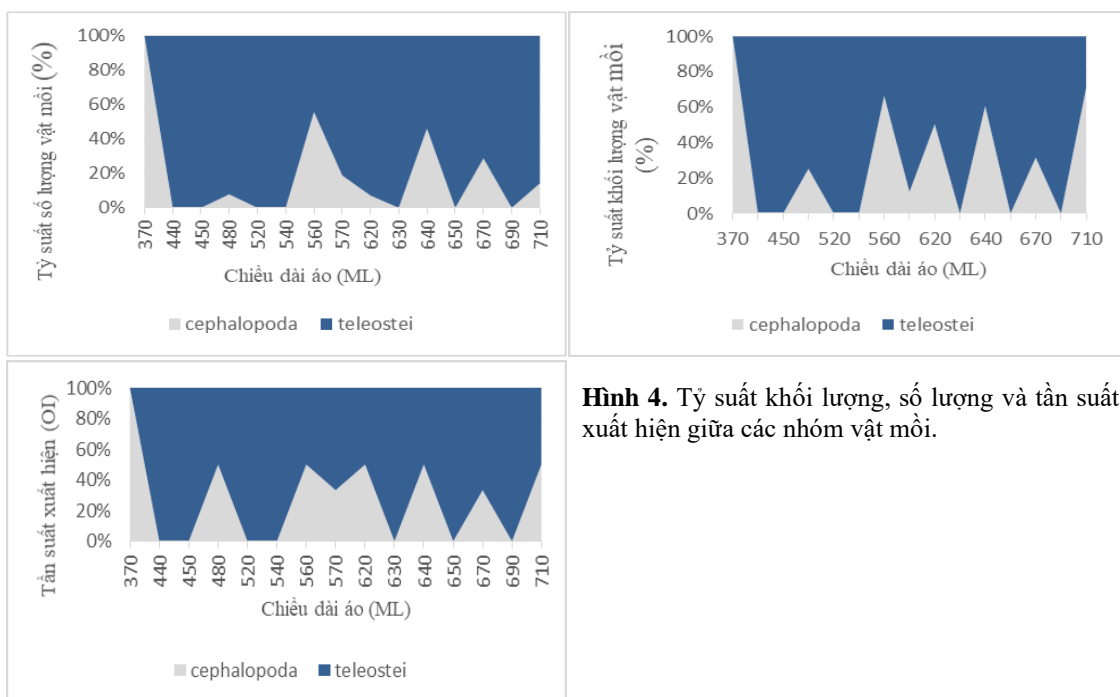
Từ kết quả phân tích mẫu dạ dày của *T. Rhombus* thu được cho thấy, chúng ăn cá xương, động vật chân đầu và các mảnh vụn hữu cơ không xác định. Do tập tính ăn nghiền nhỏ con mồi nên hầu hết thức ăn đã phân mảnh và tiêu hoá một phần. Một số thành phần thức ăn đã phân tích được của *T. rhombus* ở vùng biển nghiên cứu được thể hiện trong bảng 2.

Trong quá trình phân tích, có 19,23% mẫu dạ dày xuất hiện giun tròn (*Nematoda*). Tuy nhiên, dựa vào tập tính ăn mồi của loài, đây chỉ là đối tượng ký sinh trong dạ dày mực. Vì vậy nhóm *Nematoda* không được xét vào nhóm thức ăn của mực lá đại dương. Ngoài ra, nhựa cũng được tìm thấy trong dạ dày của mực lá đại dương, dạng các sợi dây thừng, tuy tần suất xuất hiện không nhiều nhưng kết quả này cũng cho thấy rác thải nhựa đã ảnh hưởng tới rất nhiều loài sinh vật trong đó có cá mực lá đại dương.

Bảng 2. Cấu trúc thức ăn trong dạ dày mực lá đại dương ở khu vực nghiên cứu.

Nhóm thức ăn	%OI	%IWI	%INI	IRI	%IRI
Cá xương	73,08	71,93	80,76	11158,49	88,46
Động vật chân đầu	30,77	28,07	19,24	1455,54	11,54

Các chỉ số cho thấy, trong các nhóm thức ăn (có thể xác định) của mực lá đại dương, cá xương có tần suất xuất hiện nhiều nhất (%OI=73,08), tỷ suất khối lượng và tỷ suất số lượng cũng cao nhất đạt cao nhất ở nhóm thức ăn này (%IWI = 71,93; %INI = 80,76). Tần suất xuất hiện của cá xương gấp hơn 2 lần so với thức ăn là nhóm mực/tuộc (%OI = 30,77). Động vật chân đầu xuất hiện trong thành phần thức ăn với tần suất bắt gặp %OI = 30,77; tỷ suất khối



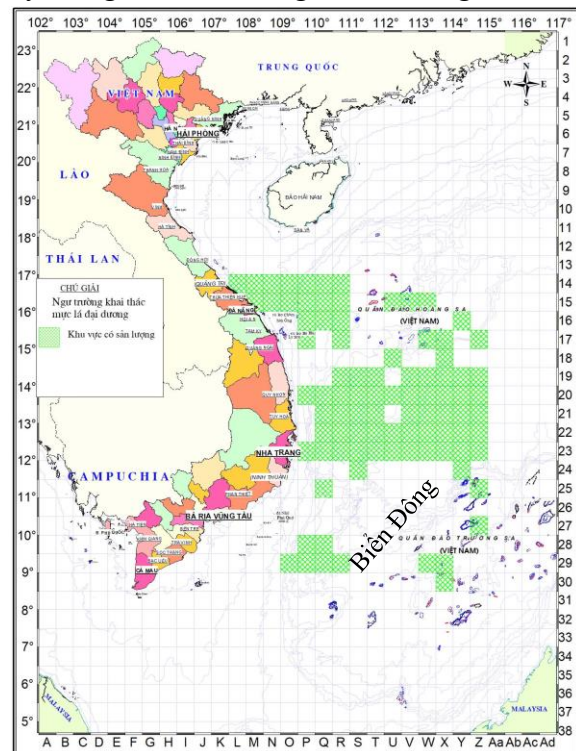
Hình 4. Tỷ suất khối lượng, số lượng và tần suất xuất hiện giữa các nhóm vật mồi.

lượng %IWI = 28,07; tỷ suất số lượng %INI = 19,24. Bên cạnh đó, chiếm tỷ suất khối lượng lớn nhất trong dạ dày mực là thành phần vụn thức ăn không khác định, %IWI = 47,55. Chỉ số xác định vật môi quan trọng của nhóm cá (IRI = 11158,49) cao hơn gấp nhiều lần so với nhóm thức ăn động vật chân đầu (IRI = 1455,54) cho thấy, nhóm cá là thức ăn ưu tiên hàng đầu của loài mực lá đại dương.

Các giá trị về chỉ số tần suất xuất hiện, tỷ suất khối lượng con môi và tỷ suất số lượng vật môi còn đóng vai trò quan trọng để phân tích sự thay đổi thức ăn theo kích thước. Trên cơ sở đó có thể đánh giá sơ bộ rằng liệu có sự thay đổi về con môi yêu thích của mực lá đại dương trong quá trình phát triển ở nước ta. Kết quả cũng thấy rằng không có nhiều sự khác biệt về thành phần thức ăn giữa các cá thể do các cá thể mực thu được trong nghiên cứu này đều thuộc nhóm cá thể đã trưởng thành. Nhóm thức ăn cá xương và động vật chân đầu là 2 nhóm thức ăn chính, trong đó, nhóm cá chiếm tỷ trọng về khối lượng và số lượng lớn hơn nhóm thức ăn động vật chân đầu ở hầu hết các nhóm chiều dài (Hình 4).

3.4. Phân bố ngư trường mực lá đại dương

Kết quả phân tích số liệu thu thập từ sổ nhật kí khai thác, giám sát trên khai thác từ tháng 6 đến tháng 12 năm 2023 cho thấy, mực lá đại dương có sản lượng cao nhất trong nghề câu mực xà, theo sau là nghề câu cá ngừ đại dương và nghề lưới chụp, sản lượng cao tập trung chủ yếu trong tháng 7 và tháng 8 (Bảng 3). Vùng khai thác chính (ngư trường) mực lá đại dương tập trung chủ yếu ở vùng biển xa bờ miền trung và giữa Biển Đông trong đó vùng biển phía tây quần đảo Hoàng Sa đến khu vực Bắc Trung Bộ có phạm vi từ vĩ độ 15,0°N - 17,0°N và từ 107,0°E - 111,0°E; khu vực giữa Biển Đông có phạm vi từ 11,0°N - 15,0°N và từ 110,0°E - 115,0°E; khu vực từ Đông Nam đảo Phú Quý có phạm vi từ 09,0°N - 10,0°N và 109,0°E - 111,0°E; khu vực quần đảo Trường Sa có phạm vi từ 8,5°N - 9,5°N và 113,0°E - 114,0°E (Hình 5).



Hình 5.1 Phân bố ngư trường khai thác mực lá đại dương ở vùng biển Việt Nam tháng 6-12/2023.

Bảng 3. Thông kê sản lượng khai thác mực lá đại dương từ tháng 6 đến 10/2023 ở vùng biển Việt Nam.

Tháng	Năm	Nghề câu cá ngừ		Nghề câu mực		Nghề lưới chụp		Số con Trung bình chung	Tổng cộng (kg)
		Số con	Tổng sản lượng (kg)	Số con	Tổng sản lượng (kg)	Số con	Tổng sản lượng (kg)		
6	2023			7	31,5			7	31.5
7	2023	7-8	454,5	5-6	571			6-7	1025.5
8	2023	5-6	455	6-7	307	5-6	502,5	5-6	1264.5
9	2023			8-9	134	5-6	269	6-7	403.0
10	2023			10	6	8-9	29	9	35.0
Tổng cộng		6-7	909.5	6-7	1049,5	5-6	800,5	6-7	2759,5

3.5. Thảo luận

a) Về đặc điểm sinh học mực lá đại dương

Các nghiên cứu trước đây về kích thước và tương quan chiều dài khối lượng của mực lá đại dương cho thấy, chiều dài vây lưng tối đa của mực đực là 850 mm, mực cái là 820 mm và trọng lượng cá thể khoảng từ 24-30 kg hoặc có thể lớn hơn [3]. Đến 300 ngày tuổi mực lá đại dương có thể đạt chiều dài vây lưng 800 mm và trọng lượng cơ thể 17,5 kg. Mực đực ở

độ tuổi trưởng thành đạt chiều dài áo từ 400 đến 550 mm (tuổi 170 đến 200 ngày) và mực cái ở độ tuổi trưởng thành có chiều dài áo từ 550 đến 650 mm (tuổi 230 đến 250 ngày) [3, 19]. Tương quan chiều dài khối lượng của *T. rhombus* là hàm mũ với giá trị số mũ b gần bằng 3. Ở Thái Bình Dương và nhiệt đới Đại Tây Dương, mức độ tăng trưởng khối lượng hơn kích thước của *T. rhombus* đã được ghi nhận [19].

Nghiên cứu hiện tại cũng cho thấy mức độ tương quan chiều dài - khối lượng của *T. rhombus* cũng tuân theo hàm mũ với giá trị b là 3,0895 là không khác biệt với các quan sát trước đây ở vùng biển nhiệt đới. Do mục tiêu đặt ra, nên giới hạn trong báo cáo này là chưa phân tách mối tương quan chiều dài khối lượng theo con đực và cái, cũng như theo thời gian để tìm hiểu mức độ tăng trưởng của mực lá đại dương. Tuy nhiên, theo các báo cáo từ vùng biển cận nhiệt đới đến nhiệt đới [20] chưa ghi nhận được sự khác biệt đáng kể nào về mối tương quan chiều dài khối lượng theo giới tính, tỷ lệ này được chứng minh là 1:1 ở phía bắc Thái Bình Dương [5, 20].

Các phân tích trước đây về dạ dày của *T. rhombus* trưởng thành từ Okinawa đã cho thấy nó ăn cá, mực, tôm [22], ở Ogasawara nó ăn cá (*Myctophid*) và mực (*Enoploteuthis chunii*), ở vùng biển Philipine nó ăn mực nhỏ, cá nhỏ và các loại khác [8]. Các nghiên cứu về chế độ bắt mồi đối với các mẫu vật trưởng thành của loài *T. rhombus* đã chỉ ra được các loài cá ăn sinh vật phù du nhỏ, mực con (*Cranchiidae*, *Octopoteuthidae*, *Onycho-teuthidae*, *Histioteuthidae*, *Ctenopterigidae* và *Ommastrephidae*), mực trưởng thành (*Enoploteuthidae*) và bạch tuộc incirrate sống ở tầng nước giữa trong chế độ ăn của chúng [3].

Có thể nói, thành phần trong dạ dày của mực lá đại dương trong nghiên cứu này là không sai khác với các báo cáo trước đây về tỷ lệ thức ăn là động vật chân đầu và cá. Do kích thước mẫu của nghiên cứu lần này còn quá nhỏ để có thể chỉ ra chế độ ăn của *T. rhombus* ở vùng biển Việt Nam theo các kích thước khác nhau. Những thay đổi về chế độ ăn liên quan đến kích thước đã được quan sát thấy ở mực ống đại dương như *Illex argentinus* từ thềm Bonaerensis ngoài khơi Argentina chuyển từ giáp xác sang cá [23]. Mực *Onykia ingens* ở quần đảo Falkland và đông bắc quần đảo Kerguelen, Pháp ăn động vật giáp xác và cá dưới 200 mm và mực lớn hơn (> 20 cm DML) chủ yếu ăn cá và động vật chân đầu [24, 25].

b) Về phân bố

Theo ước tính của Nigmatullin, trữ lượng của *T. rhombus* có khoảng 1,5-2,5 triệu tấn trong các đại dương nơi có độ sâu trên 400 m, đôi khi nó còn xuất hiện tại các vùng thềm lục địa nơi có sự xâm nhập của các khối nước biển khơi theo dòng chảy mùa [3]. Sự phân bố của *T. rhombus* ở các khu vực nơi có các dòng hải lưu ấm như Agulhas, Tsushima và Kuroshio cũng đã được ghi nhận [3]. Các nhà khoa học cũng ước tính mật độ phân bố của loài mực đại dương từ 0,5-200 kg/km². Theo chiều thẳng đứng, chúng thường xuất hiện ở bề mặt cho tới lớp nước 50m vào ban đêm và ở độ sâu từ 200-700 m vào ban ngày [26, 27].

Hiện tại, phân bố ngư trường chính của *T. rhombus* trong vùng biển đặc quyền kinh tế của Việt Nam còn chưa đầy đủ. Tuy nhiên, theo các báo cáo có thể sơ bộ loài mực này xuất hiện chủ yếu ở vùng biển miền Trung và giữa Biển Đông. Trong quá trình nghiên cứu các đối tượng cá ngừ đại dương bằng nghề câu vàng hay mực xà bằng lưới chụp ở vùng biển này, đều ghi nhận đánh bắt không chủ ý loài *T. rhombus* với sản lượng trung bình khoảng 5-10kg/đêm, sản lượng cho cao hơn ở khu vực đảo và gò nổi ở vùng biển khơi [11, 12]. Kết quả nghiên cứu lần này về phân bố của loài mực đại dương dựa trên nguồn số liệu sổ nhật ký khai thác từ nghề câu cá ngừ đại dương, câu mực và lưới chụp là phù hợp với tập tính cũng như các kết quả đã công bố trước đó. Do giới hạn về thời gian và kinh phí, nên cần tiếp tục thu thập, bổ sung số liệu còn thiếu để đưa ra được phân bố ngư trường khai thác mực lá đại dương ở biển Việt Nam.

4. Kết luận

Loài mực lá đại dương ở biển Việt Nam có phương trình tương quan chiều dài khối lượng tuân theo hàm mũ, với hệ số $b = 3,0895$. Thức ăn chủ yếu của mực lá trưởng thành là nhóm cá xương và nhóm chân đầu. Được khai thác không chủ ý từ nghề câu vàng cá ngừ đại dương,

lưới chụp và câu mực ở vùng biển xa bờ miền Trung và Giữa Biển Đông (từ vĩ độ 8°30' - 17°00'N và kinh độ 108°00' - 115°00'E).

Do mục tiêu nghiên cứu và hạn chế về thời gian nên báo cáo này còn chưa phân tích được sinh trưởng theo giới tính, cũng như chưa có đủ số lượng mẫu để xác định tập tính săn mồi của mực lá đại dương theo các nhóm chiều dài áo (ML). Bên cạnh đó còn thiếu thông tin để xây dựng phân bố ngư trường khai thác chính và tập tính di chuyển ngày đêm của loài mực này.

Vì vậy, cần có những công trình nghiên cứu sâu về đặc điểm sinh học, động lực học quần thể và di cư theo phương ngang và thẳng đứng của mực lá đại dương ở biển Việt Nam làm cơ sở khoa học trong khai thác và bảo vệ bền vững nguồn lợi mực lá.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng nghiên cứu ý tưởng: H.N.V.; M.N.H.; L.P.Đ.; phương pháp nghiên cứu: H.N.V.; K.V.V.; Xử lý số liệu: H.N.V.; H.V.N.; L.P.Đ.; P.T.T.D.; Viết bản thảo: H.N.V.; M.N.H.; Chỉnh sửa báo cáo: H.N.V.; M.N.H.; L.P.Đ.

Lời cảm ơn: Kết quả nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Dự án “Điều tra Ngư trường” giai đoạn 2021-2023; Đề tài “Nghiên cứu ứng dụng công nghệ khai thác và bảo quản mực lá đại dương (*Thysanoteuthis spp*) ở vùng biển Việt Nam”.

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. Roper, C.F.E.; Jereb, P. Family thysanoteuthidae. In Jereb, P.; Roper, C.F.E. (Eds) Cephalopods of the world. An annotated and illustrated catalogue of species known to date. Volume 2. Myopsid and Oegopsid Squids. FAO Species Catalogue for Fishery Purposes. Rome, FAO, 2010, 4(2), pp. 384–387.
2. Kazutaka, M.; Naoki, H.; Goh, O.; Shigeaki, G. Catch distribution of diamond squid (*Thysanoteuthis rhombus*) off Hyogo Prefecture in the western Sea of Japan and its relationship with seawater temperature. *Bull. Jpn. Soc. Fish. Oceanography* **2007**, 71(2), 106–111.
3. Nigmatullin, C.M.; Arkhipkin, A.I. A review of the biology of the diamond-back squid, *Thysanoteuthis rhombus* (Oegopsida: Thysanoteuthidae). Page in T. Okutani, editor. Contributed Papers to International Symposium on Large Pelagic Squids. Japan Marine Fishery Resources Research Center, Tokyo, 1998, pp. 155–181.
4. Sasikumar, G.; Sajikumar, K.K.; Karamathullah, S.P.; Nataraja, G.D.; Venkatesan, V.; Alloyicious, P.S.; Jestin Joy, K.M.; Mohamed, K.S. Emerging commercial importance for diamondback squid *Thysanoteuthis rhombus* (Cephalopoda: thysanoteuthidae) in Kerala and Karnataka. *Mar. Fish. Infor. Serv. T E Ser.* **2019**, 239, 32.
5. Kawasaki, K.; Kakuma, S. Biology and fishery of *Thysanoteuthis rhombus* in the waters around Okinawa, southwestern Japan. In: Okutani, T. (Ed.), Contributed Papers to International Symposium on Large Pelagic Squids. Japan Marine Fishery Resources Research Center, Tokyo, 1998, pp. 183–189.
6. Dickson, R.V.; Ramiscal, R.V.; Magno, B. Diamondback squid (*Thysanoteuthis rhombus*) exploration in the South China Sea, Area III: Western Philippines. Southeast Asian Fisheries Development Center, 1998, pp. 32–38.
7. Kazutaka, M.; Jun, H.; Yasushi, M. Observations on the behaviour of vertical longline gear used in the Japanese Diamond Squid (*Thysanoteuthis rhombus*) fishery using small depth loggers. *Jpn Soc. Fish. Eng.* **2007**, 21–25.
8. Chu, T. Đặc điểm sinh học mực ống đại dương (*Sthenoteuthis oualarriensis*) ở vùng biển xa bờ Việt Nam. Tuyển tập các công trình nghiên cứu Nghề cá biển Tập 2 Nhà xuất bản Nông nghiệp, Hà Nội, 2001, tr. 465–471.

9. Long, N. Nghiên cứu khai thác mực đại dương (*Sthenoteuthis oualaniensis*) và mực ống (*Loligo* spp) ở vùng biển xa bờ. Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Nghiên cứu Hải sản, 2001, tr. 1–240.
10. Sơn, Đ.M. Nghiên cứu thăm dò nguồn lợi hải sản và lựa chọn công nghệ khai thác phù hợp phục vụ phát triển nghề cá xa bờ. Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Nghiên cứu Hải sản, 2005, tr. 1–231.
11. Liêm, P.Đ. Nghiên cứu đề xuất các giải pháp nâng cao chất lượng cá ngừ đại dương trên tàu câu tay. Báo cáo tổng kết đề tài, Viện Nghiên cứu Hải sản, 2015, tr. 1–192.
12. Toàn, N.P. Hoàn thiện công nghệ khai thác, sơ chế và bảo quản mực đại dương trên tàu khai thác xa bờ. Báo cáo tổng kết dự án, Viện Nghiên cứu Hải sản, 2021, tr. 1–164.
13. Nikolski, G.V. The ecology of fishes. London: Academic Press, 1963, pp. 1–352.
14. Carpenter, K.E.; Niem, V.H. (Eds). FAO species identification guide for fisheries purposes (Vol. Volume 4). ROME: FAO, 1999, pp. 1–663.
15. Fischer, W.; Whitehead, P.J.P. (Eds.). FAO species identification sheets for fisheries purposes (Vol. Volume 1). ROME: FAO, 1974, pp. 1–262.
16. Pauly, D. Length-converted catch curves and the seasonal growth of fishes. *Fishbyte* **1990**, 8(3), 33–38.
17. Cortés E. A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: application to elasmobranch fishes. *J. Fish. Aquat. Sci.* **1997**, 54, 726–738.
18. Nghĩa, N.V. Báo cáo tổng kết “Điều tra tổng thể hiện trạng và biến động nguồn lợi hải sản biển Việt Nam, giai đoạn 2011-2015”, tiểu dự án I.9: “Điều tra tổng thể hiện trạng và biến động nguồn hải sản biển Việt Nam. Viện Nghiên cứu Hải sản, 2015, tr. 1–240.
19. Nigmatullin, C.M.; Arkhipkin, A.I.; Sabirov R.M. Age, growth and reproductive biology of diamond-shaped squid *Thysanoteuthis rhombus* (Oegopsida: Thysanoteuthidae). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **1995**, 124(1–3), 73–87.
20. Miyahara, K.; Gorie, S. Mantle length–body weight relationship of the diamond squid *Thysanoteuthis rhombus* caught in the western part of the Sea of Japan. *Bull. Hyogo. Prefectural Technol. Center Agric. Forestry Fish.* **2004**, 37, 1–8. (In Japanese with English Abstract)
21. Ando, K.; Nishikiori, K.; Tsuchiya, K.; Kimura, J.; Yonezawa, J.; Maeda, H.; Kawabe, K.; Kakiuchi, K. Study on the fisheries biology of diamond squid *thysanoteuthis rhombus* in the Ogasawara Islands Waters, Southern Japan. Report of the Tokyo Metropolitan Fisheries Experiment Station, 2014, 213, 1–22 (In Japanese with English Abstract).
22. Takechi, H.; Shimizu, H. Biological characteristic of *Thysanoteuthis rhombus* in Okinawa waters. Proceeding of the International Symposium on Large Pelagic Squids Programs and Abstracts, 18-19 July. Japan Marine Fishery Resource Research Center, Tokyo, 1996, pp. 29.
23. Ivanovic, M.; Brunetti, N.E. Food and feeding of *Illex argentines*. *Antarct. Sci.* **1994**, 6, 185–193.
24. Phillips, K.L.; Nichols, P.D.; Jackson, G.D. Size-related dietary changes observed in the squid *Moroteuthis ingens* at the Falkland Islands: stomach contents and fatty-acid analyses. *Polar Biol.* **2003**, 26, 474–485.
25. Cherel, Y.; Duhamel, G. Diet of the squid *Moroteuthis ingens* (Teuthoidea: onychoteuthidae) in the upper slope waters of the Kerguelen Islands. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **2003**, 250, 197–203.
26. Fiji Fisheries Department. Successful diamondback squid fishing trials in Fiji. SPC Fisheries Newsletter, 2014, pp. 14–16.

27. Sánchez, P.; Obarti, R. The biology and fishery of *Octopus vulgaris* caught with clay pots on the Spanish Mediterranean coast. In: Okutani, T.; O’Dor, R.K.; Kubodera, T. (Eds) Recent Advances in Fisheries Biology. Tokai University Press, Tokyo, 1993, pp. 477–487.

Study on biological characteristics and distribution of diamond squid in Vietnamese sea water

Nguyen Van Huong^{1*}, Vu Van Khuong¹, Nguyen Hoang Minh¹, Phan Dang Liem, Nguyen Van Hai¹, Phan Thi Thuy Duong²

¹ Reseach Institute for Marine Fisheress; nvhuong0509@gmail.com; nhminh10@gmail.com; vvkhuong@rimf.org.vn; pdliem@rimf.org.vn; nvhai@rimf.org.vn

² HCM City University of Natural Resources and Environment; pttduong@hcmunre.edu.vn

Abstract: The ocean leaf squid (*Thysanoteuthis rhombus*) is a rarely studied species in Vietnam, leading to a lack of information on its distribution and biology. Based on 60 samples of diamond squid (*Thysanoteuthis rhombus*) randomly collected on squid handlines fishing and logbooks from three fishing gear (tuna handlines fishing, falling nets and squid handlines fishing) from June to October 2023. By analysing and processing routine data, it has been determined that the diamond squid has a length - weight correlation following an exponential function, with coefficients $a = 2 \times 10^{-5}$ and $b = 3.0895$. The diet of adult *T. rhombus* is the fin fish and the cephalopod groups. Spatial analysis from the fishing log book has identified the fishing grounds for diamond squid located in Vietnam’s exclusive economic zone from latitude 8°30’ - 17°00’N and longitude 108°00’ - 115°00’E. The main fishing grounds extend from the west of the Paracel Islands to the North Central Coast, the middle of the Bien Dong, and the southeast of Phu Quy Island and the around Spratly Islands.

Keywords: *Thysanoteuthis rhombus*; Fishing ground; Biological characteristic.

Bài báo khoa học

Áp dụng phương pháp đánh giá đa tiêu chí xác định mức độ an toàn, vệ sinh lao động trong hoạt động nổ mìn cho các mỏ đá khu vực Nam Trung Bộ

Nguyễn Đình An^{1,2}, Đỗ Ngọc Hoàn^{1,2}, Trần Đình Bảo^{1,2*}

¹ Giảng viên, Khoa Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất; dongochuan@humg.edu.vn; nguyendinhhan@humg.edu.vn; trandinhbao@humg.edu.vn

² Nhóm Nghiên cứu mạnh ISRM, Trường Đại học Mỏ - Địa chất; dongochuan@humg.edu.vn; nguyendinhhan@humg.edu.vn; trandinhbao@humg.edu.vn

*Tác giả liên hệ: trandinhbao@humg.edu.vn; Tel.: +84-988196996

Ban biên tập nhận bài: 28/9/2024; Ngày phản biện xong: 19/11/2024; Ngày đăng bài: 25/4/2025

Tóm tắt: Trong hoạt động khai thác mỏ đá vật liệu xây dựng (VLXD), nổ mìn đóng vai trò quan trọng trong việc phá vỡ đất đá, hỗ trợ các công đoạn tiếp theo như xúc bốc và vận tải. Tuy nhiên, bên cạnh tác dụng tích cực, nổ mìn còn gây ra nhiều tác động tiêu cực đến môi trường như chấn động, sóng va đập không khí, đá văng, khí độc và bụi mịn. Những ảnh hưởng này dẫn đến nguy cơ cao về an toàn và vệ sinh lao động (ATVSLĐ) trong quá trình khai thác. Bài báo này trình bày một phương pháp đa tiêu chí nhằm xây dựng bộ tiêu chí đánh giá ATVSLĐ, kết hợp lý thuyết hàm cộng tuyến tính và phương pháp thứ bậc để tính toán chỉ số ATVSLĐ trong công tác nổ mìn tại các mỏ khai thác VLXD. Phương pháp này giúp nhận diện các mối nguy tiềm ẩn và dự báo mức độ ATVSLĐ, từ đó làm cơ sở đề xuất các biện pháp kỹ thuật cải thiện an toàn trong hoạt động nổ mìn. Nghiên cứu đặc biệt tập trung vào các mỏ đá VLXD ở khu vực Nam Trung Bộ, góp phần nâng cao hiệu quả và an toàn trong khai thác mỏ đá.

Từ khóa: Khai thác mỏ đá; Nổ mìn; An toàn vệ sinh lao động; Phương pháp đa tiêu chí; Hàm cộng tuyến tính; Phương pháp thứ bậc.

1. Mở đầu

Hiện nay, “chuẩn bị đất đá bằng phương pháp khoan - nổ mìn trong khai thác mỏ lộ thiên nói chung và khai thác đá VLXD nói riêng là phương pháp hiệu quả nhất về mặt kỹ thuật, kinh tế và giúp tối ưu hóa quá trình sản xuất” trên mỏ lộ thiên tiếp theo [1, 2]. Ngoài “tác dụng đập vỡ đất đá, nổ mìn cũng gây nhiều tác động có hại đến môi trường như sóng chấn động, sóng đập không khí, đá văng, khí độc và bụi” [2, 3].

Khi nổ mìn, năng lượng của chất nổ dùng để phá vỡ đất đá chỉ chiếm 10÷15%, phần năng lượng còn lại biến thành các dạng năng lượng vô ích như: Sóng chấn động: Ảnh hưởng tới các công trình cần bảo vệ và đến sự ổn định của bờ mỏ; sóng va đập không khí: Gây ra tiếng ồn lớn và ảnh hưởng đến môi trường xung quanh; đá văng: ảnh hưởng tới người và thiết bị,... bụi và khí thải độc hại: Gây ô nhiễm môi trường không khí và ảnh hưởng đến sức khỏe của người lao động. Ngoài ra, trong quá trình thi công các thao tác kỹ thuật không chính xác hoặc thực hiện không đúng quy phạm an toàn có thể gây ra các tai nạn thảm khốc, thảm khốc cho con người và cơ sở hạ tầng của doanh nghiệp [3, 5]. Vì vậy để giảm thiểu các tác động nguy hiểm và có hại của việc nổ mìn sinh ra việc lựa chọn phương pháp nổ mìn, phương tiện nổ và chất nổ, sơ đồ nổ đặc biệt là việc tính toán lựa chọn chính xác các thông số khoan - nổ phù

hợp với tính chất cơ lý của đất đá (độ kiên cố, nứt nẻ,...), điều kiện địa chất thủy văn, địa chất công trình trong khu vực là rất quan trọng.

Các cơ sở khai thác mỏ hoặc các đơn vị chuyên môn về dịch vụ nổ mìn luôn tuân thủ các quy định của nhà nước về an toàn sử dụng VLNCN tại QCVN 01:2019/BCT của Bộ Công thương. Ngoài ra, các đơn vị sẽ có những quy định đặc thù để luôn đảm bảo an toàn trong việc bảo quản và sử dụng VLNCN. Đánh giá mức độ ATVSLĐ trong hoạt động nổ mìn được xác định bằng phương pháp đánh giá cho điểm theo quy trình nhận diện, đánh giá và kiểm soát rủi ro giúp dự báo sớm nguy cơ mất ATVSLĐ có thể xảy ra [6, 7]. Tuy có rất nhiều quy định và các nghiên cứu nhằm nâng cao hiệu quả công tác ATVSLĐ trong hoạt động nổ mìn nhưng trong các năm qua vẫn xảy ra những vụ tai nạn lao động (TNLD) đáng tiếc xảy ra có thể kể đến như: Vụ Tai nạn tại khai thác đá Chiến Nguyên, trên khu vực núi đá Mèo, làng Ngã Hón, xã Lộc Thịnh, huyện Ngọc Lặc, tỉnh Thanh Hóa vào ngày 30/3/2015 làm 2 người chết và 1 người bị thương nặng; Vụ tai nạn do nổ mìn mất kiểm soát làm 1 người tử vong và một người bị thương nặng xảy ra vào ngày 26/02/2022 tại mỏ than Núi Béo, tỉnh Quảng Ninh; mới đây ngày 15/3/2024 vụ nổ mìn tạo sóng chấn động làm nhiều tầng đá mồ côi khoảng 4 tấn lăn xuống sập nhà dân xảy ra tại Nam Giang, tỉnh Quảng Nam [4, 6, 8] ... Mặc dù đã có rất nhiều các quy định và sự cải tiến tích cực của của khoa học kỹ thuật hiện đại trong công tác khoan nổ mìn, nhưng tình trạng mất ATVSLĐ vẫn đang diễn ra [1]. Cần có những nghiên cứu để dự báo chính xác hơn về các ảnh hưởng mà công tác nổ mìn có thể gây ra đối với tính mạng, sức khỏe của NLĐ.

Trên thế giới, Phương pháp đánh giá đa tiêu chí và phân tích thứ bậc AHP đã được Saaty phát triển từ những năm 80 của thế kỷ trước [9–11]. Đây là phương pháp hỗ trợ nhằm xem xét đồng thời các yếu tố tự nhiên, kinh tế, cơ sở hạ tầng, chính sách pháp luật và tranh thủ tri thức của nhiều chuyên gia trong các lĩnh vực có liên quan để xác định trọng số nhằm đưa ra quyết định chính xác. Phương pháp này được phát triển để áp dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau của đời sống như: đã ứng dụng của AHP trong các nghiên cứu của mình nhằm giải quyết nhiều vấn đề trong y học và chăm sóc sức khỏe [12, 13]. Nghiên cứu [14, 15] đưa ra nhiều ứng dụng của AHP trong các lĩnh vực khác nhau như: kinh tế, chính trị, xã hội, giáo dục, quân sự, ngân hàng, lựa chọn phương án kỹ thuật, các nghiên cứu về quản lý chất lượng sản phẩm. Bên cạnh đó, một nghiên cứu đã trình bày các ứng dụng của AHP khi kết hợp với các phương pháp như: phân tích SWOT, QFD, meta-heuristics, và DEA [16, 17] phương pháp điểm lý tưởng (TOPSIS) [18], ... hoặc kết hợp nhiều phương pháp phân tích khác nhau để giải quyết các bài toán lựa chọn phương án thực tế [19, 20].

Phương pháp phân tích đa tiêu chí (*MCA - Multi-Criteria Decision Making*) được ứng dụng ở khá nhiều lĩnh vực nghiên cứu khác nhau ở Việt Nam như: lựa chọn phương án phát triển kinh tế [21, 22], bảo vệ môi trường [8, 23], trắc địa bản đồ [24, 25], logistics [26, 27],... Trong việc ứng dụng của MCA và phân tích thứ bậc đối với việc nghiên cứu đánh giá rủi ro như xói lở bờ sông [28, 29], cấp độ rủi ro do bão. Tuy nhiên, áp dụng đánh giá đa tiêu chí trong lĩnh vực ATVSLĐ do hoạt động nổ mìn còn chưa được quan tâm nghiên cứu nhiều.

Trên cơ sở hiện trạng sử dụng vật liệu nổ công nghiệp tại 55 doanh nghiệp khai thác đá xây dựng khu vực Nam Trung Bộ, tiến hành phân loại về quy mô, trang thiết bị sử dụng, áp dụng MCA xây dựng bộ tiêu chí và gán điểm tiêu chí cũng như xác định tầm quan trọng của tiêu chí bằng cách sử dụng kỹ thuật tiến trình phân cấp thứ bậc (AHP), thông qua phương pháp phân tích đa tiêu chí xác định mức độ ATVSLĐ cho từng hoạt động khi thực hiện công tác nổ mìn.

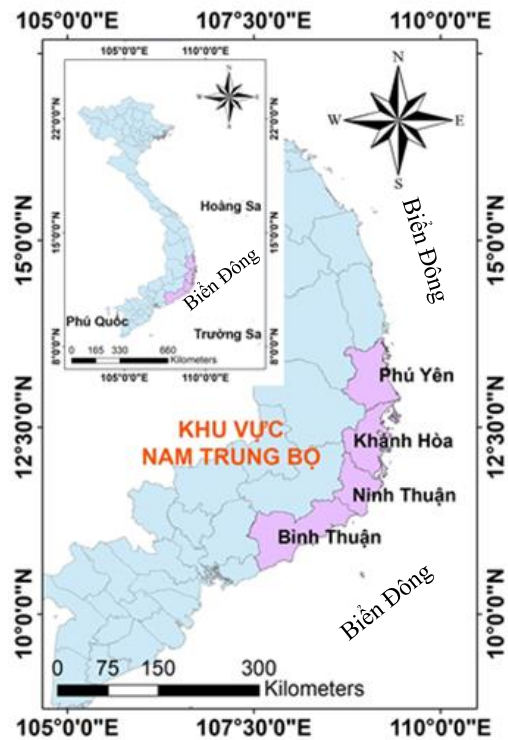
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực Nam Trung Bộ là một vùng địa lý nằm ở miền Trung Việt Nam, kéo dài từ đồng bằng ven biển tới các vùng núi và bán đảo, bao gồm các tỉnh Phú Yên, Khánh Hòa,

Ninh Thuận và Bình Thuận (Hình 1). Diện tích khu vực khoảng 21,5 nghìn km² và dân số khoảng 3,8 triệu người, khu vực Nam Trung Bộ là một trong những vùng phát triển quan trọng của Việt Nam. Đây là khu vực có tiềm năng tương đối lớn về khai thác đá khối và đá VLXD cho khu vực và cả nước góp phần cung ứng nguồn nguyên vật liệu cho xây dựng và góp phần tích cực trong phát triển kinh tế địa phương.

Khu vực Nam Trung Bộ hiện có 55 mỏ đá VLXD đang hoạt động khai thác với công suất nhỏ và trung bình là chủ yếu. Trong đó, Khánh hòa có 21 mỏ đang hoạt động, Phú Yên là 15 mỏ, Ninh Thuận 11 mỏ và Bình Thuận là 8 mỏ. Các mỏ có công suất khai thác dao động từ 200÷400 nghìn m³/năm chiếm tỷ lệ không nhiều, đa phần là các mỏ khai thác VLXD thông thường có công suất vừa và nhỏ phục vụ cho nhu cầu tại địa phương. Một số ít các mỏ đá VLXD phục vụ làm đường giao thông và làm nguyên liệu cho các nhà máy xi măng công suất nhỏ, với công suất khoảng 120 nghìn m³/năm và các mỏ có công suất nhỏ dưới 100 nghìn m³/năm (chiếm tỷ lệ tới 60% tổng số các mỏ đang khai thác). Các mỏ đá này thường có vốn đầu tư hạn chế nên hoạt động khai thác nhỏ lẻ, manh mún, mang tính chất gia đình, không bài bản, công nghệ khai thác lạc hậu.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu các tỉnh Nam Trung Bộ.

2.2. Hiện trạng hoạt động nổ mìn trên các mỏ khai thác đá VLXD

Hiện nay, các mỏ đang sử dụng phương pháp nổ mìn vi sai, phương tiện nổ là kíp phi điện, kíp điện vi sai, dây nổ. Thuốc nổ sử dụng là thuốc nổ ANFO, AD-1 ở những lỗ khoan khô, đối với lỗ khoan có nước sử dụng thuốc nổ nhũ tương. Khối lượng thuốc nổ sử dụng tại các mỏ được trình bày ở bảng 1 trình và phương tiện nổ sử dụng thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Phương tiện nổ sử dụng: (a) Kíp vi sai phi điện trên mặt và xuống lỗ; (b) Kíp điện visai; (c) Kíp điện K8; (d) Môi nổ MN-31-175g.

Bảng 1. Vật liệu nổ công nghiệp sử dụng tại các mỏ đá VLXD khu vực Nam Trung Bộ năm 2022 ÷ 2023 [33].

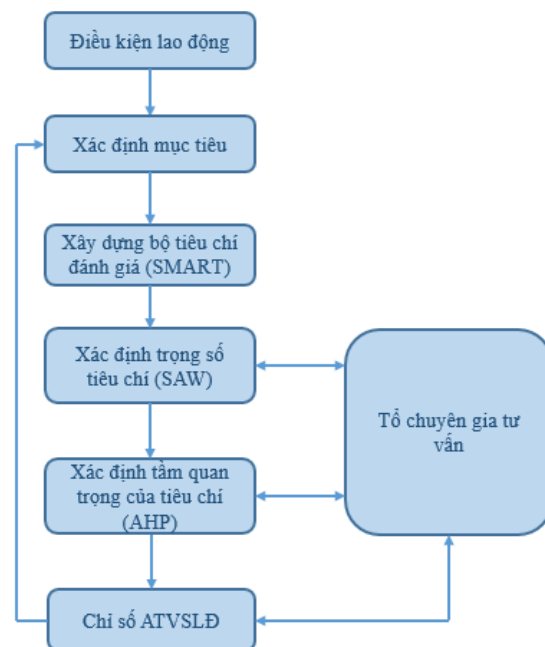
TT	Chỉ tiêu	Đơn vị	Năm	
			2022	2023
I	Sản lượng thực hiện	m ³		
1	Khối lượng đất đá nổ mìn lần 1	m ³	3.503.471	4.798.412
2	Khối lượng đất đá nổ mìn lần 2	m ³	69.667	247.260
3	Độ cứng	f	9 - 11	9 - 11
4	Chỉ tiêu thuốc nổ	kg/m ³	0,38	0,41
5	Tổng số thuốc nổ quy đổi anfo	kg	1.328.312	1.984.077
6	Tỷ lệ thuốc nổ chịu nước	%	36,67	48,3
7	Quy mô bãi nổ bình quân	m ³ /bãi	1.825	3.404
II	Thuốc nổ sử dụng	kg	1.332.594	1.990.427
II-1	Thuốc nổ do MICCO sản xuất	kg	614.878	1.162.530
1	Thuốc nổ Anfo rời	kg	41.450	95.225
2	Thuốc nổ Anfo bao gói	"	573.428	788.594
3	Thuốc nổ NT rời 08 - NTR08-D80	"		33.402
4	Thuốc nổ NT lò đá 2	"	3 470	245.309
II-2	Thuốc nổ do Quốc phòng sản xuất	kg	717.716	827.897
1	Thuốc nổ AD1	"	229.040	71.817
2	Thuốc nổ Nhũ tương	"	488.676	756080
III	Phụ kiện nổ sử dụng			
	Kíp các loại		189.220	272.891
1	Kíp nổ điện	cái	8.379	23.613
2	Kíp nổ vi sai điện	"	95.121	109.741
3	Kíp vi sai phi điện KVP-8N-TM	"	29.570	54.017
4	Kíp vi sai phi điện KVP-8N-XL	"	56.079	85.420
5	Dây điện mìn	m	503.500	676.500
6	Mồi nổ	quả	46.274	60.672

2.3. Phương pháp nghiên cứu

2.3.1. Phương pháp đánh giá đa tiêu chí

Phương pháp đánh giá đa tiêu chí (*Multicriteria Analysis - MCA*) là công cụ đánh giá mức độ quan trọng của từng tiêu chí liên quan và phản ánh mức độ đó trong việc đưa ra quyết định cuối cùng [30, 31]. Phương pháp MCA được áp dụng phổ biến khi sử dụng kết hợp các phương pháp như: phương pháp kết hợp mục tiêu (SMART), phương pháp phân tích tiêu chí sử dụng hàm cộng tuyến không đơn vị (SAW) và phương pháp phân tích thứ bậc AHP. Quy trình thực hiện phân tích MCA thể hiện trên Hình 3.

Trong quy trình thực hiện phương pháp MCA xuất phát từ điều kiện thực tế xác định mục tiêu chung và các mục tiêu cụ thể của công tác ATVSLĐ trong hoạt động nổ mìn tại các mỏ khai thác đá VLXD công suất vừa và nhỏ. Từ các mục tiêu cụ thể xác định áp dụng phương pháp SMART để xây dựng bộ tiêu chí đánh giá, tiếp đó dựa vào thực tiễn tiến hành đánh giá mức độ đáp ứng các mục tiêu của từng tiêu chí tiến hành đánh giá điểm tiêu chí. Đánh giá mức độ quan trọng của các tiêu chí trong bộ tiêu chí bằng phương pháp phân tích thứ bậc, xác định trọng số tiêu chí. Tích hợp hai giá trị điểm tiêu chí và trọng số tiêu chí bằng phép nhân ma trận và cộng tuyến không đơn vị.



Hình 3. Quy trình thực hiện phân tích đa tiêu chí.

Các đánh giá được thực hiện bằng phương pháp chuyên gia trên cơ sở định lượng không đơn vị. Khi kết quả không đạt giá trị về chỉ số nhất quán thì thực hiện đánh giá lại theo quy trình đến khi đưa ra kết quả chuẩn xác.

2.3.2. Phương pháp SMART

SMART là thuật ngữ viết tắt của các từ viết hoa: Cụ thể (Specific), có thể được đo lường (Measurable), Có tính khả thi (Achievable), có tính phù hợp (Relevant), và xác định thời gian (Time-bound). Tên của phương pháp đã thể hiện cách thức tiếp cận trong việc đặt mục tiêu và đánh giá mục tiêu. Thông qua phương pháp này giúp chúng ta xây dựng được bộ tiêu chí liên quan trực tiếp đến các mục tiêu về ATVSLĐ và xác định được các mức độ rủi ro của các hoạt động nổ mìn trên các mỏ khai thác đá [6, 32].

Dựa vào mục tiêu xác định mức độ ATVSLĐ công tác nổ mìn trên các mỏ khai thác đá VLXD là môi trường làm việc được loại bỏ các yếu tố nguy hiểm có hại đối với NLĐ. Điều này nghĩa là phải xác định các vùng nguy hiểm như ngã cao, đổ sập, rủi ro khi khoan và thi công bãi nổ, bụi đá và tiếng ồn cao, nguy cơ cháy nổ,... Sau khi các công đoạn được xác định mức độ an toàn một cách chi tiết sẽ giúp xác định các biện pháp phòng ngừa và bảo vệ phù hợp như sử dụng bảo hộ cá nhân (BHCN), đảm bảo điều kiện vi khí hậu và trang bị giảm tiếng ồn; bao gồm cả việc thúc đẩy ý thức và tư duy an toàn của tất cả nhân viên tham gia quá trình làm việc. Điều này cũng cần phải thực hiện công tác đào tạo và huấn luyện định kỳ về thợ mìn, chỉ huy nổ mìn, ATVSLĐ, kỹ năng sử dụng thiết bị và máy móc và quy trình làm việc an toàn.

Các dự án khác nhau có thể xác định một quy mô công suất, trình tự và công nghệ khai thác, phương tiện vật liệu nổ, trình độ quản lý - thi công, kỹ năng lao động khác nhau. Do đó các mức độ rủi ro ATVSLĐ tại các mỏ cũng không giống nhau ở nhiều khía cạnh, công việc, nhưng mục đích chung nhất là cần phải đảm bảo an toàn tính mạng, sức khỏe nghề nghiệp cho người lao động cũng như cơ sở vật chất của doanh nghiệp. Theo đó, nghiên cứu đề xuất các tiêu chí đánh giá mức độ ATVSLĐ bao gồm 20 tiêu chí khác nhau dùng để xác định chỉ số ATVSLĐ và được tóm tắt ở Bảng 2. Trong đó: i) Nhóm tiêu chí đánh giá mức độ phù hợp về công nghệ - 7 tiêu chí; ii) Nhóm tiêu chí đánh giá mức độ phù hợp về nguồn nhân lực - 2 tiêu chí; iii) Nhóm tiêu chí đánh giá về hệ thống quản lý ATVSLĐ - 5 tiêu chí; iv) Nhóm tiêu chí đánh giá về môi trường-PCCC và PCTT - 4 tiêu chí; v) Nhóm tiêu chí đánh giá mức độ phù hợp về quản trị và nguồn lực - 2 tiêu chí.

Bảng 2. Bộ tiêu chí đánh giá mức độ ATVSLĐ trong công tác nổ mìn.

Nhóm tiêu chí		Tiêu chí cụ thể	
I	Công nghệ	T1	Hệ thống khai thác
		T2	Bảo quản VLNCN
		T3	Vận chuyển VLNCN
		T4	Khoan lỗ mìn
		T5	Nổ mìn
		T6	Kiểm tra, giám sát
		T7	Ứng dụng công nghệ số và tự động hóa
II	Nhóm tiêu chí nhân lực	T8	Đội ngũ quản lý
		T9	Người lao động
III	Nhóm tiêu chí Hệ thống quản lý ATVSLĐ	T10	Hệ thống quản lý ATVSLĐ
		T11	Tuyên truyền, giáo dục, khen thưởng, kỷ luật
		T12	Đánh giá rủi ro
		T13	Chăm sóc sức khỏe người lao động
		T14	Quy trình, nội quy và tự kiểm tra ATVSLĐ
IV	Nhóm tiêu chí Môi trường – PCCC và PCTT	T15	Vi khí hậu
		T16	Phòng cháy chữa cháy (PCCC)
		T17	Phòng chống thiên tai (PCTT)
		T18	An ninh trật tự
V	Nhóm tiêu chí quản trị và nguồn lực	T19	Tuân thủ các quy định pháp luật
		T20	Tối đa hóa nguồn lực

2.3.3. Phương pháp SAW (Simple Additive Weighting)

Phương pháp phân tích “sử dụng hàm cộng tuyến tính không đơn vị để xác định giá trị của mỗi phương án dưới dạng Value Theory (VT). Phương pháp này dựa trên lý thuyết giá trị đa thuộc tính và sự độc lập của các thuộc tính” [30].

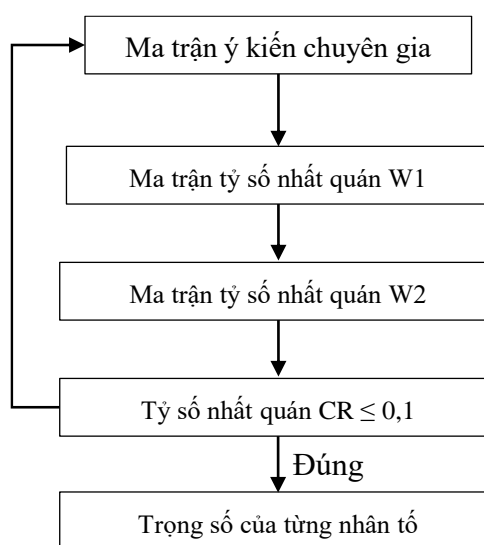
Sử dụng phương pháp định lượng và bán định lượng để đánh giá mức độ ATVSLĐ bằng cách gán điểm cho tiêu chí: với từng tiêu chí được xây dựng thực hiện so sánh tương đối tính chất tác động tương ứng với thang điểm xác định theo thang đánh giá 5 bậc (Bảng 3), số điểm được cho tăng dần theo các yếu tố ATVSLĐ có thể đáp ứng cho từng tiêu chí; Các chuyên gia thực hiện đánh giá điểm và điểm đánh giá được tối ưu bằng tiến trình phân tích thứ bậc đối với các tiêu chí rõ ràng hoặc phương pháp phân tích thứ bậc mờ để xử lý các tiêu chí không rõ ràng làm cơ sở xác định mức độ rủi ro cho từng công việc khi tổ chức công tác nổ mìn trên các mỏ đá VLXD.

Bảng 3. Thang điểm các tiêu chí đánh giá ATVSLĐ.

Điểm đánh giá				
1	2	3	4	5
Có nguy cơ mất ATVSLĐ rất cao	Có nguy cơ mất ATVSLĐ cao	Có nguy cơ mất ATVSLĐ trung bình	Có nguy cơ mất ATVSLĐ thấp	Đảm bảo ATVSLĐ

2.3.4. Phương pháp phân tích thứ bậc AHP (Analytic Hierarchy Process)

Phương pháp này nhằm mục đích xác định mức độ quan trọng của mỗi tiêu chí trong bộ tiêu chí đánh giá, giúp xác định giá trị trọng số trọng việc đưa ra quyết định hoặc đánh giá mức độ khi phải đối mặt với hàng loạt các tiêu chí không có thang đánh giá đo lường chung [31, 32]. Để đánh giá mức độ ATVSLĐ trong quá trình nổ mìn thì cần đánh giá ở nhiều phương diện, nhiều công tác, các điều kiện tự nhiên, con người, tổ chức sản xuất khác nhau. Mặt khác mỗi khâu nhỏ cũng bao hàm nhiều yếu tố nhỏ hơn cấu thành lên có cái ảnh hưởng trực tiếp, cái ảnh hưởng gián tiếp, cái xảy ra nhanh, có cái diễn biến từ từ do vậy cần thiết phải phân cấp thứ bậc. Bằng cách xác định một thứ tự sắp xếp của các tiêu chí theo mức độ tăng hoặc giảm dần, thể cho phép người quản lý xác định mức độ ưu tiên tương đối giữa các tiêu chí. Kết quả cuối cùng được biểu diễn dưới dạng một ma trận so sánh, thể hiện mối quan hệ giữa các tiêu chí với nhau. Sau đó, số liệu về độ ưu tiên được tổng hợp để có trị số chung của mức độ ưu tiên, đòi hỏi tổng hợp số liệu duy nhất về độ ưu tiên. Sử dụng phương pháp xác định chuẩn hóa vector W (vector trọng số) để hoàn thiện quy trình. Cuối cùng, tính nhất quán của các so sánh cặp được kiểm tra, nếu đánh giá không đảm bảo tính nhất quán thì thực hiện đánh giá lại từ đầu. Sơ đồ thuật giải thiết lập thứ bậc thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ thuật giải thiết lập thứ bậc.

2.3.5. Phương pháp chuyên gia

Theo nghiên cứu này thì các công tác xác định điểm tiêu chí bằng phương pháp SAW và xác định mức độ ưu tiên của tiêu chí theo phương pháp phân tích thứ bậc đều được đánh giá thông qua phương pháp đánh giá định lượng và bán định lượng. Theo đó dựa vào bảng tiêu chí được xây dựng và bảng thang điểm được giới thiệu từ trước tiến hành cho điểm từ các

chuyên gia để xác định mức độ rủi ro ATVSLĐ cho các mỏ. Các chuyên gia thực hiện đánh giá là các nhà khoa học có chuyên môn trong lĩnh vực khoan nổ mìn, các nhà quản lý về ATVSLĐ, các cán bộ kỹ thuật, chỉ huy nổ mìn,... Số lượng đánh giá càng nhiều mức độ chính xác càng cao tuy nhiên các đánh giá phải đảm bảo tính nhất quán.

2.3.6. Xử lý số liệu

Sau khi thực hiện thu thập kết quả đánh giá từ các chuyên gia thực hiện xử lý số liệu trên phần mềm Microsoft Excel để xử lý kết quả trên ma trận đánh giá. Các bước thực hiện bao gồm: tính tổng điểm tiêu chí; xác định trọng số trung bình theo từng hàng; giá trị riêng lớn nhất của ma trận so sánh; tỷ số nhất quán CR (*Consistency Rate*); tính vector nhất quán (*Consistency vector*). Khi Kết quả đánh giá đảm bảo tính nhất quán thì xác định chỉ số ATVSLĐ bằng cách tích hợp điểm đánh giá tiêu chí với mức độ quan trọng của tiêu chí đánh giá, từ đó phân loại và kết luận.

3. Kết quả và thảo luận

Dựa vào bảng tổng hợp các chỉ tiêu đánh giá mức độ ATVSLĐ trong hoạt động khoan - nổ mìn. Áp dụng phương pháp phân tích thứ bậc AHP để xác định trọng số cho từng tiêu chí. Chỉ số an toàn tính cho từng mỏ dựa trên kết quả phân tích, tích toàn bảng kỹ thuật phân tích thứ bậc AHP. Giá trị cốt lõi của tiêu chí và mức độ đáp ứng được thể hiện qua các điểm số và đây là yếu tố quan trọng quyết định đến giá trị chỉ số ATVSLĐ cho các mỏ khai thác đá VLXD. Tỷ số nhất quán của đánh giá được xác định để cho thấy, kết quả đánh giá cho điểm của chuyên gia là phù hợp với yêu cầu của kỹ thuật phân tích thứ bậc AHP hay không ($CR \leq 10\%$ đối với ma trận có kích thước lớn hơn 20×20 và $CR \leq 9\%$ đối với ma trận kích thước 20×20). Kết quả tính toán cho điểm sau khi được xử lý số liệu thể hiện trên ma trận tiêu chí. Thực hiện phép nhân ma trận giữa giá trị trọng số của phương án theo 20 tiêu chí (T1 ÷ T20, ma trận kích thước $n \times 20$) và giá trị trọng số (ma trận kích thước 20×1). Kết quả xác định trọng số tiêu chí thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Giá trị trọng số của tiêu chí.

Tiêu chí	Giá trị riêng	Tổng giá trị riêng	Vector nhất quán	Trọng số
T1	0,059	1,259	21,315	0,146
T2	0,058	1,250	21,598	0,041
T3	0,058	1,250	21,598	0,124
T4	0,103	2,238	21,630	0,032
T5	0,156	3,369	21,629	0,029
T6	0,065	1,362	20,889	0,032
T7	0,015	0,313	21,016	0,032
T8	0,027	0,549	20,657	0,076
T9	0,072	1,521	21,110	0,076
T10	0,045	0,954	20,959	0,013
T11	0,015	0,306	20,860	0,146
T12	0,024	0,496	20,827	0,014
T13	0,014	0,286	20,898	0,014
T14	0,039	0,821	20,969	0,032
T15	0,024	0,513	21,453	0,032
T16	0,043	0,911	21,219	0,030
T17	0,039	0,825	21,057	0,014
T18	0,031	0,652	20,895	0,007
T19	0,091	1,958	21,630	0,034
T20	0,023	0,488	21,311	0,078

- Giá trị riêng lớn nhất của ma trận 20×20 khi thực hiện so sánh:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^{21} \lambda_i}{21} = 21,176 \quad (1)$$

- Chỉ số nhất quán CI:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0,06189 \quad (2)$$

- Tỷ số nhất quán CR được xác định:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,06189}{1,59} = 0,0389 = 3,89\% < 9\% \quad (3)$$

Đảm bảo tính nhất quán, như vậy kết quả tính toán là phù hợp. Giá trị trọng số được xác định theo Bảng 5.

Bảng 5. Phân nhóm tiêu chí.

Nhóm	Tiêu chí	Trọng số (β)
I (trọng số >0,08)	Công tác thi công nổ mìn (T5) Công tác khoan lỗ mìn (T4) Tuân thủ các quy định pháp luật (T19) Người lao động (T9)	4
II (Trọng số từ 0,05-0,08)	Kiểm tra, giám sát trước trong và sau khi nổ mìn (T6) Hệ thống khai thác an toàn theo quy chuẩn (T1) Vận chuyển VLNCN (T3) Bảo quản VLNCN (T2) Hệ thống quản lý ATVSLĐ (T10) Công tác PCCC (T16) Công tác PCTT (T17)	3
III (trọng số từ 0,02-0,05)	Ban hành hệ thống quy trình, nội quy ATVSLĐ (T14) Bảo đảm an ninh trật tự (T18) Người quản lý, giám đốc điều hành (T8) Môi trường lao động (T15) Thực hiện đánh giá rủi ro các nguy cơ mất ATVSLĐ trong công tác khoan nổ mìn (T12) Tối đa hóa nguồn lực (T20)	2
IV (trọng số <0,02)	Ứng dụng công nghệ số và mức độ hiện đại của thiết bị (T7) Tuyên truyền, giáo dục, khen thưởng, kỷ luật (T11) Chăm sóc sức khỏe người lao động (T13)	1

Ghi chú: I- Nhóm các tiêu chí “rất quan trọng”, là các tiêu chí không thể thiếu đối với công tác ATVSLĐ; II- Nhóm các tiêu chí có tầm ảnh hưởng trực tiếp tới mức độ ATVSLĐ; III - Nhóm các tiêu chí có tầm ảnh hưởng gián tiếp tới mức độ ATVSLĐ; IV- Nhóm các tiêu chí ít có tầm ảnh hưởng đến mức độ ATVSLĐ.

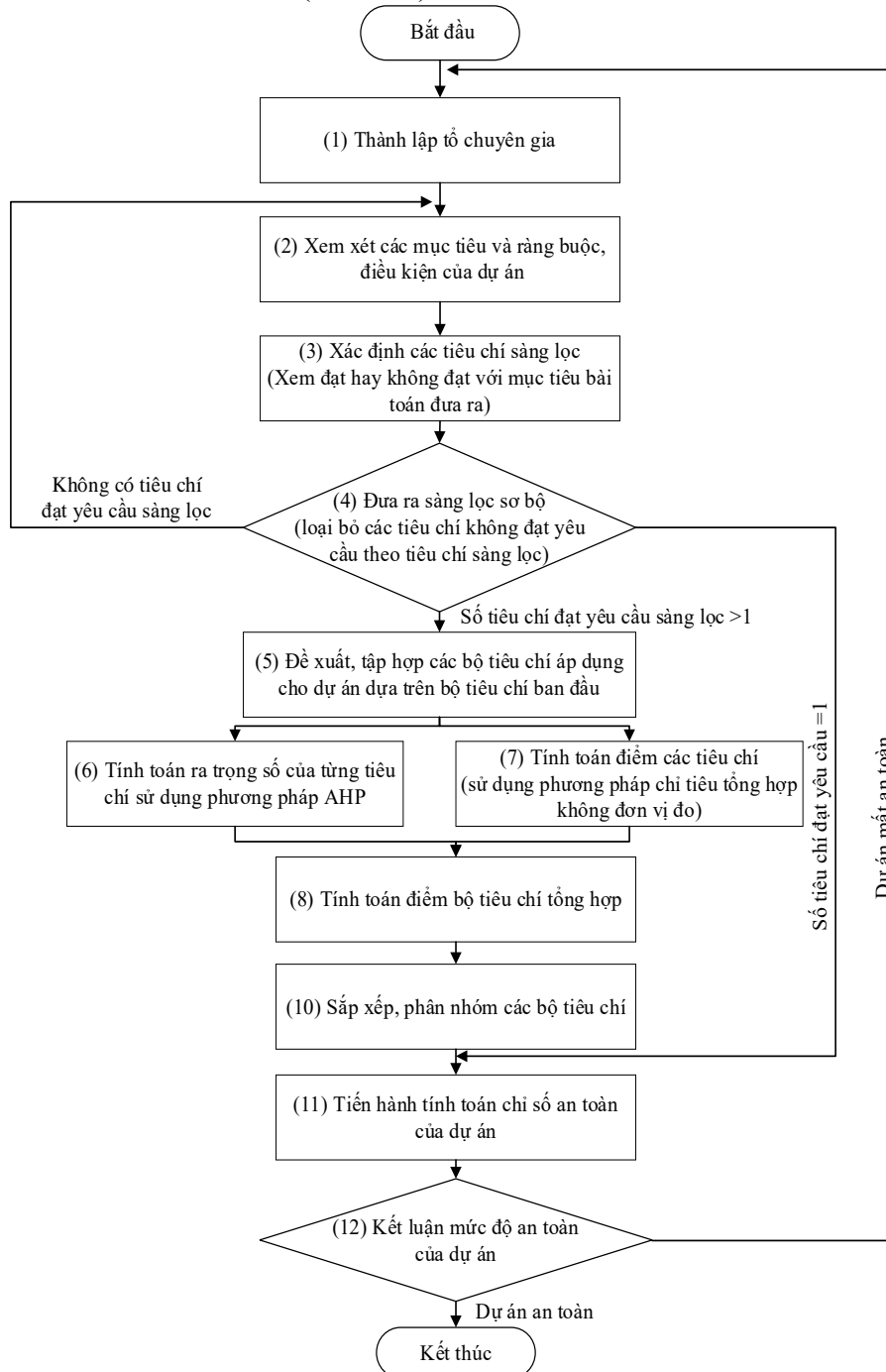
Để xác định chỉ số an toàn của hoạt động khai thác đá VLXD trên địa bàn khu vực Nam Trung Bộ sử dụng phương pháp dùng chỉ tiêu tổng hợp không đơn vị đo. Theo phương pháp này cho phép gộp tất cả các chỉ tiêu có đơn vị đo khác nhau (quy trình, thi công, người lao động, quản lý, ...) vào một ma trận tiêu chí tổng hợp và xác định thứ tự ưu tiên. Quy trình xác định chỉ số an toàn trong hoạt động nổ mìn tại các mỏ khai thác đá VLXD trên địa bàn các tỉnh Duyên hải Nam Trung bộ được đề xuất theo sơ đồ hình 5. Chỉ số ATVSLĐ trong hoạt động khoan - nổ mìn “I_a” là tổng các giá trị thể hiện trong kết quả của phép nhân ma trận giữa giá trị trọng số của phương án theo 20 tiêu chí (T1 ÷ T20, ma trận kích thước n × 20) và giá trị trọng số (ma trận kích thước 20 × 1):

$$I_a = \sum_{i=1}^{20} T_i \times \beta_i \quad (4)$$

Trong đó T_i là điểm đánh giá mức độ ATVSLĐ của tiêu chí thứ “i” có trọng số tương ứng là β_i.

Dựa theo giá trị chỉ số ATVSLĐ trong hoạt động khoan - nổ mìn “I_a” thực hiện phân loại mức độ ATVSLĐ trong hoạt động khoan nổ mìn thành 5 nhóm như sau:

- + Nhóm I (N1): Nguy cơ mất an toàn rất cao, không chấp nhận được ($I_a < 60$);
- + Nhóm II (N2): Nguy cơ mất an toàn cao, cần phải khắc phục ngay ($I_a = 61 \div 120$);
- + Nhóm III (N3): Nguy cơ mất an toàn trung bình, cần phải theo dõi thường xuyên ($I_a = 121 \div 150$);
- + Nhóm IV (N4): Nguy cơ mất an toàn thấp, cần phải theo dõi ($I_a = 151 \div 180$);
- + Nhóm V: Bảo đảm an toàn ($I_a > 180$).



Hình 5. Quy trình xác định chỉ số an toàn trong hoạt động khoan nổ mìn tại các mỏ đá VLXD khu vực Nam Trung Bộ.

Qua khảo sát điều kiện thực tế của các mỏ khai thác đá VLXD khu vực Nam Trung Bộ, tiến hành cho điểm đánh giá với 24 mỏ và xử lý số liệu đưa ra kết quả tham khảo thể hiện trong Bảng 6. Các giá trị mức độ an toàn theo từng nhóm phân loại ở trên N_j tương ứng với tổng giá trị chỉ số ATVSLĐ (I_a) của các tiêu chí có trọng số tiêu chí là β_j , (với giá trị $j =$

1,2,3,4 thể hiện trong bảng 5). Theo kết quả thì 8 mỏ có nguy cơ mất ATVSLĐ thấp, 16 mỏ có nguy cơ mất ATVSLĐ trung bình. Cần có các biện pháp hiệu quả để giảm thiểu các nguy cơ mất ATVSLĐ trong hoạt động khoan nổ mìn tại các mỏ này.

Bảng 6. Chỉ số ATVSLĐ tính cho các nhóm trọng số tiêu chí.

Tỉnh	TT	Mỏ	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	I _a
Phú Yên	1	Hòa Mỹ	32	39	60	8	139
	2	Phú Thanh	32	36	46	7	121
	3	Dốc Súc	44	42	60	7	153
	4	Suối Biều	44	48	48	8	148
	5	Suối Cối	40	45	58	11	154
	6	Tân Lập	32	39	52	11	140
	7	Á Châu	36	39	60	10	145
	8	Thiên Phú Phát	36	42	50	9	137
Khánh Hòa	9	Hòn Thị	32	45	52	11	140
	10	Hồ Hành	48	45	46	11	150
	11	Thanh Danh	40	45	58	10	153
	12	Hòn Hèo	28	48	52	10	138
	13	Hòn Giải	32	48	58	7	145
	14	Cô Lô	36	42	48	7	133
	15	Cô Lô 2	40	33	48	5	126
	16	Tà Liên	44	45	52	9	150
Ninh Thuận	17	Núi Giăng	36	51	54	5	146
	18	Lạc Tiến	32	42	48	7	129
	19	Núi Tào	36	51	54	9	150
	20	Núi Dây	40	57	50	7	154
	21	Tazon 2	48	51	56	9	164
	22	Bắc Tazon	44	45	44	10	143
	23	Chóp Vung	44	45	48	8	145
	24	Tazon 5	32	36	46	8	122

Thảo luận: Qua khảo sát điều kiện thực tế của các mỏ khai thác đá VLXD khu vực Nam Trung Bộ, tiến hành cho điểm đánh giá với 24 mỏ và xử lý số liệu đưa ra kết quả tham khảo thể hiện như sau: có 1 mỏ có nguy cơ mất an toàn cao cần phải khắc phục ngay, 16 mỏ có nguy cơ mất an toàn trung bình cần phải theo dõi và kiểm tra quy trình ATVSLĐ thường xuyên, 8 mỏ có nguy cơ mất an toàn thấp cần phải theo dõi. Các mỏ có nguy cơ mất ATVSLĐ trung bình có hiện trạng công nghệ, thiết bị khai thác khá lạc hậu tại mỏ, công nhân có tuổi đời và kinh nghiệm chưa nhiều, quá trình thi công nổ mìn tiềm ẩn nhiều nguy cơ có thể xảy ra tai nạn lao động, ảnh hưởng tới sức khỏe người lao động. Trong các tiêu chí đánh giá thì tiêu chí về các biện pháp thi công khoan, nổ mìn được xây dựng khá chi tiết, cùng với việc tuân thủ các quy phạm an toàn thì đây là 2 tiêu chí được đánh giá với trọng số cao, nếu không tuân thủ có thể gây tai nạn lao động nghiêm trọng không thể kiểm soát. Các tiêu chí về con người cũng dần được chuyên môn hóa khi nhiều mỏ thuê các đơn vị chuyên môn thực hiện công tác nổ mìn trên các mỏ, các thợ mìn của các đơn vị thuê ngoài được đào tạo tay nghề khá bài bản và có chuyên môn tốt. Tuy nhiên, một số mỏ vẫn tự thực hiện công tác khoan nổ mìn cho mỏ với đội ngũ thợ mìn chưa được đào tạo tốt về chuyên môn và không thường xuyên được huấn luyện an toàn. Các quy trình về nhận diện, đánh giá và kiểm soát rủi ro ATVSLĐ trong hoạt động nổ mìn cũng như các hoạt động khai thác chưa được xây dựng bài bản chi tiết các tài liệu về ATVSLĐ chủ yếu vẫn là các bộ quy chuẩn quy phạm ATVSLĐ.

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu muốn nhấn mạnh vào phương pháp để xác định chỉ số ATVSLĐ thông qua việc đánh giá các tiêu chí liên quan khi thực hiện công tác khoan nổ mìn tại các mỏ đá VLXD nói chung. Thông qua phương pháp này có thể giúp doanh nghiệp kiểm tra lại quy trình tổ chức sản xuất và quản lý về ATVSLĐ trong hoạt động nổ mìn của doanh nghiệp

các doanh nghiệp khai thác đá VLXD tại khu vực Nam Trung Bộ nói riêng và các mỏ khai thác khoáng sản sử dụng phương pháp khoan nổ mìn để chuẩn bị đất đá ở Việt Nam nói chung.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: D.N.H., N.D.A.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: D.N.H., T.D.B.; Xử lý số liệu: D.N.H., N.D.A., T.D.B.; Khảo sát lấy phiếu cho điểm: N.D.A.;Viết bản thảo bài báo: D.N.H., N.D.A., T.D.B.; Chỉnh sửa bài báo: D.N.H., N.D.A., T.D.B.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin cảm ơn sự tài trợ từ đề tài cấp cơ sở, Mã số T24-21: “Nghiên cứu đề xuất các giải pháp nâng cao hiệu quả công tác quản lý an toàn, vệ sinh lao động cho các đơn vị khai thác mỏ sử dụng vật liệu nổ công nghiệp trên địa bàn tỉnh Ninh Bình” của Trường Đại học Mở - Địa chất.

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. Akbar, D.; Rolfe, J.; Rahman, A.; Schrobback, P.; Kinnear, S.; Bhattarai, S. Stakeholder collaboration models for exporting agricultural commodities in Asia: Case for Avocado, Lychee and Mango. Milestones 11-13 Report for CRCNA. CQUniversity Australia, Rockhampton, 2019, pp. 74.
2. Alireza, A.; Majid, M.; Rosnah, M.Y. Simple additive weighting approach to personnel selection problem. *Int. J. Innovation Technol. Manage.* **2010**, *1*(5), 511–515.
3. Antwi, E.K.; Owusu-Banahene, W.; Boakye-Danquah, J.; Mensah, R.; Tetteh, J.D.; Nagao, M.; Takeuchi, K. Sustainability assessment of mine-affected communities in Ghana: Towards ecosystems and livelihood restoration. *Sustain. Sci.* **2001**, *12*, 747–767.
4. Badri, M.A. Combining the analytic hierarchy process and goal programming for global facility location-allocation problem. *Int. J. Prod. Econ.* **1999**, *62*, 237–248.
5. Bascetin, A. A decision support system using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open-pit mine. *Environ. Geol.* **2007**, *52*, 663–672.
6. Bui, V.C.; Vo, A.K.; Dang, V.D. Research and test the AHP analytical hierarchy method to detail the risk level of Baoc in Ninh Thuan province. *J. Hydrometeorol.* **2018**, *1*, 34–40.
7. Che, D.L. Process of hierarchical analysis. Master's Lecture, Vietnam National University, Ho Chi Minh City, 2012.
8. Dam, T.T.; Bui, X.N.; Tran, Q.H. Blasting in the mining and construction industry, Natural Science and Technology Publishing House, 2015.
9. Dang, T.T.; Pham, Q.N.; Nguyen, K.H. Using GIS and Analytic Hierarchy Process (AHP) in order to map arsenic pollution zonation in groundwater based on the influence of geological factors in the Red River Delta. *J. Nat. Resour. Environ. Sci.* **2020**, *29*, 24–35.
10. Daniel, J.E.; Elena, C.L.; Jorge, R.H.; Juan, C.C.J. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Autom. Constr.* **2014**, *45*, 151–162.
11. Do, M.N.; Dang, T.T.; Do, M.D. Applying GIS and analytical hierarchy method (AHP) to create a landslide risk map in Xin Man district, Ha Giang province, Vietnam. *VNU Sci. Magazine: Earth Environ. Sci.* **2016**, *32* (2S), 206–216.

12. Do, N.H.; Tran, Q.H.; Pham, H.N. Identification and assessment of OSH risks in small-capacity quarrying activities of construction materials in Vietnam. *Int. J. Sci. Eng. Res.* **2022**, *13*, 727–736.
13. Ho, S.G.; Bui, X.N.; Nguyen, A.T. Mining of solid minerals by open-pit mining. Science and Technology Publishing House, Hanoi, 2009.
14. Ho, W. Integrated analytic hierarchy process and its applications - A literature review. *Eur. J. Oper. Res.* **2008**, *186*, 211–228.
15. Hoang, N.T.; Ly, T.B.T.; Do, T.T.H.; Nguyen, M.H. Integrating the Fuzzy-AHP hierarchical analysis method and the Fuzzy-GIS method in zoning wind power development in Bac Lieu province in a sustainable way. *J. Sci. Technol. Dev. Earth Environ. Sci.* **2022**, *6(1)*, 493–506.
16. Huang, C.C.; Chu, P.Y.; Chiang, Y.H. A fuzzy AHP application in government-sponsored R&D project selection. *ACS Omega.* **2008**, *36*, 1038–1052.
17. Liberatore, M.J.; Nydick, R.L. The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: A literature review. *Eur. J. Oper. Res.* **2008**, *89*, 194–207.
18. Nguyen, D.A.; Tran, Q.H.; Tran, D.B.; Phonpaserth, S. Evaluation of some shock prediction models when blasting at Ninh Dan limestone mine, Thanh Ba district, Phu Tho province. *J. Min. Sci. Technol. Geol.* **2020**, *61*, 102–109.
19. Nhu, V.B. Improving the efficiency of breaking soil and rock by blasting in mining, Transport Publishing House, Hanoi, 2008.
20. Palassis, J. A new American management Systems Standard in Occupational Safety and Health – ANSI Z10. *J. Chem. Health Saf.* **2006**, *13(1)*, 20–23.
21. Pham, T.H.L.; Ngo, L.L.; Do, Q.M. Research on analytical hierarchy method (AHP) to evaluate the risk of riverbank erosion in the downstream of Dong Nai river system. *J. Water Resour. Technol. Environ.* **2020**, *70*, 17–24.
22. Pham, T.H.L.; Nguyen, H.S.; Ngo, K.L. Research and develop a set of criteria and indicators to determine water resource functions based on the value of economic benefits and environmental protection of surface water for the Dong Nai river basin. *J. Hydrometeorol.* **2023**, *755*, 88–99. doi:10.36335/VNJHM.2023(755).88-99.
23. Phan, H.V.; Bui, X.N.; Do, N.T.; Do, N.H. Selecting a suitable model for the closure of building material stone mines for sustainable development in Binh Duong, Vietnam. *J. Min. Earth Sci.* **2023**, *64 (4)*, 89–102.
24. Rashidi, K. AHP versus DEA: comparative analysis for the gradual improvement of unsustainable suppliers. *Benchmarking: Int. J.* **2019**, *27(8)*, 39. <https://doi.org/10.1108/BI-11-2019-0505>.
25. Saaty, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Services Sci.* **2008**, *1(1)*, 83–98.
26. Sohrab, F.O.; Parisa, D.N.; El, G.T.; Reza, T.M. Meta-heuristics for sustainable supply chain management: a review. *Int. J. Prod. Res.* **2022**, *61(6)*, 1979–2009. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2045377>.
27. Tran, Q.H.; Nguyen, D.A.; Tran, D.B.; Phonpaserth, S. Assessing the impact of blasting shock waves on protective structures and determining the appropriate blast scale for Phong Xuan limestone mine - Thua Thien Hue. *Min. Geol. Eng. Sci.* **2020**, *61(4)*, 118–125.
28. Truong, T.T.; Nguyen, T.T. Implementaon mul-criteria decision-making model based on ICT criteria to evaluate E-learning lessons in educaonprograms: Logiscsandsupplychain management. *Hongbang Int. Univ. J. Sci.* **2023**, *N-25*, 45–54. <https://doi.org/10.59294/HIUJS.25.2023.501>.
29. Vaidya, O.S.; Kumar, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. *Eur. J. Oper. Res.* **2006**, *169*, 1–29.

30. Vu, T.T.; Pham, T.T.H. Analyzing criteria to select business partners for logistics firms: Applying randomized block design. *J. Mar. Sci. Technol.* **2021**, *N-65*, 81–85.
31. Vuong, N. Using the synthetic score scale method combined with the analytical hierarchy process to evaluate sustainable tourism development in Phu Quoc. *Dong Thap Univ. Sci. Magazine* **2019**, *39*, 35–44. <https://doi.org/10.52714/dthu.39.8.2019.714>.
32. Worrall, R.; Neil, D.; Brereton, D.; Mulligan, D. Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine land. *J. Cleaner Prod.* **2009**, *17(16)*, 1426–1434.
33. Nam Trung Bo Mining Chemical industry Company limited - Micco, Mining Services Development Plan. Periodic reports on business production activities of the enterprise, 2024.

Applying a multi-criteria evaluation method to determine the level of occupational safety and health in the blasting process for limestone quarries in the Nam Trung Bo of Vietnam

Nguyen Dinh An^{1,2}, Do Ngoc Hoan^{1,2}, Tran Dinh Bao^{1,2*}

¹ Lecturers, Faculty of Mining, University of Mining - Geology;

dongochoan@humg.edu.vn; nguyendinhhan@humg.edu.vn; trandinhbao@humg.edu.vn

² Innovations for sustainable and responsible mining (ISRM), University of Mining -

Geology; dongochoan@humg.edu.vn; nguyendinhhan@humg.edu.vn;

trandinhbao@humg.edu.vn

Abstract: Blasting operations for quarrying are inherently associated with numerous occupational safety and health risks, including explosions, collapses, generation of dust and toxic gases, and the impact of shock waves and air blasts. Therefore, it is essential to conduct stringent assessments and controls of production activities to ensure the safety and health of workers. This study employs a multi-criteria evaluation method, based on establishing safety and health objectives to develop a set of assessment criteria. These criteria are analyzed and evaluated based on their relevance, feasibility, measurability, and suitability to the spatial and temporal conditions during blasting operations at construction material quarries. The study uses a dimensionless linear combination function to determine the criteria scores, which form the basis for identifying the safety and health levels in blasting activities at these quarries. The hierarchical analysis method is incorporated to prioritize the criteria in relation to each other, allowing for the calculation of a safety and health index. With 55 quarrying limestone in the Nam Trung Bo region of Vietnam, this study selected 22 representative quarries to investigate and determine occupational safety and health indices during blasting operations. By synthesizing the research results for blasting activities at construction material quarries in the Nam Trung Bo region, the study contributes a new method to practice for identifying hazards and forecasting safety and health levels in blasting operations. This aims to develop technical safety measures for these activities.

Keywords: Safety; Occupational hygiene; Multi-criteria; Construction materials; Analytic hierarchy process.

Bài báo khoa học

Đánh giá tác động ngập lụt và đề xuất giải pháp thích ứng cho các thành phố tỉnh Bình Dương - Giai đoạn 2030-2050

Đoàn Thu Hà^{1*}, Nguyễn Trung Nam²

¹ Trường Đại học Thủy lợi; thuha_ctn@tlu.edu.vn

² Viện Quy hoạch Thủy lợi Miền Nam; nguyentrungnam47v@gmail.com

*Tác giả liên hệ: thuha_ctn@tlu.edu.vn; Tel.: +84-948172299

Ban Biên tập nhận bài: 5/10/2024; Ngày phản biện xong: 20/11/2024; Ngày đăng bài: 25/4/2025

Tóm tắt: Bình Dương là tỉnh công nghiệp ở phía Nam, có tốc độ thị hóa cao với 5 thành phố tỷ lệ đô thị hóa trên 84,4%. Tình trạng ngập lụt đô thị gia tăng về tần suất và mức độ, ảnh hưởng tới phát triển kinh tế cũng như đời sống xã hội những năm gần đây. Tuy nhiên, nghiên cứu về ngập đô thị cho tỉnh Bình Dương khá hạn chế, điều này dẫn đến thiếu cơ sở khoa học cho xây dựng các giải pháp quản lý lũ ở Bình Dương giai đoạn 2030 và 2050. Ngoài ra, lựa chọn giải pháp cho quản lý ngập đô thị hiện nay còn khoảng trống trong nghiên cứu kết hợp giữa hai nhóm giải pháp công trình và giải pháp dựa vào tự nhiên, mà chủ đạo đề xuất riêng lẻ. Vì vậy, mục tiêu nghiên cứu xác định nguyên nhân, xu thế yếu tố gây ngập lũ, đồng thời dự báo tác động ngập lũ trên 5 thành phố của tỉnh, từ đó đề xuất giải pháp thích ứng kết hợp giữa giải pháp công trình và giải pháp dựa vào tự nhiên. Phương pháp kiểm định thông kê và mô hình thủy văn - thủy lực được áp dụng. Kết quả cho thấy mưa lớn và triều cường có xu thế ngày càng gia tăng và đây nguyên nhân chính làm tình trạng ngập, và mức độ ngập trầm trọng hơn bởi tình trạng đô thị hóa và biến đổi khí hậu. Nghiên cứu đề xuất ba nhóm giải pháp chính gồm (i) hoàn thiện hệ thống công trình dọc sông chính (ii) cải tạo duy trì các suối thoát nước kết hợp với giải pháp động lực (iii) duy trì khu vực trữ nước dọc sông Sài Gòn.

Từ khóa: Ngập lụt; Thành phố; Đô thị hóa; Triều cường; Mưa lớn; Đồng Nai - Sài Gòn; Bình Dương.

1. Đặt vấn đề

Ngập lụt đô thị ngày càng trở thành vấn đề toàn cầu do ảnh hưởng của quá trình đô thị hóa nhanh và biến đổi khí hậu làm gia tăng về tần suất và cường suất của các trận mưa [1, 2]. Những tiến bộ gần đây trong nghiên cứu về ngập lụt đô thị bao gồm sự phát triển của các mô hình dựa trên nguyên tắc vật lý (thủy văn - thủy lực) tiên tiến và ứng dụng các kỹ thuật trí tuệ nhân tạo và học máy [2, 3]. Một số mô hình điển hình như HEC-RAS/HMS, MIKE, và SWMM, ngày càng được sử dụng để đánh giá nguy cơ ngập lụt, mặc dù vẫn tồn tại thách thức trong việc thu thập dữ liệu có độ phân giải cao để mô phỏng chính xác 4. Các giải pháp quản lý ngập lụt đô thị phổ biến bao gồm các giải pháp công trình, giải pháp phi công trình có tính đổi mới thiên hướng giảm tác động và dựa vào tự nhiên 4. Giải pháp dựa vào tự nhiên ngày càng được công nhận có triển vọng trong quản lý rủi ro lũ lụt đô thị và thích ứng với biến đổi khí hậu. Các giải pháp như hệ thống thoát nước đô thị bền vững, cơ sở hạ tầng xanh và thành phố bọt biển, có thể thích ứng với lũ lụt do các sự kiện mưa lớn có tần suất cao đồng thời mang lại các lợi ích kinh tế, sinh thái và xã hội [5, 6]. Tuy nhiên, những giải pháp này có thể kém hiệu quả hơn đối với hiện tượng thời tiết cực đoan, và cộng

gộp nhiều yếu tố (lũ, mưa lớn, nước dâng), đòi hỏi phải tích hợp với giải pháp công trình truyền thống. Việc tích hợp công nghệ tiên tiến, hạ tầng xanh và kết hợp với các giải pháp công trình xem xét cả yếu tố kinh tế - xã hội là điều cần thiết để xây dựng các chiến lược hiệu quả và toàn diện nhằm tăng cường khả năng chống chịu với ngập lụt đô thị [1, 4].

Ở Việt Nam, ngập lụt đô thị đang trở thành vấn đề nghiêm trọng đặc biệt ở các thành phố lớn như Tp. Hồ Chí Minh, Hà Nội, Đà Nẵng, Cần Thơ, đã gây ra những tổn thất kinh tế, ảnh hưởng chất lượng cuộc sống của người dân và thiệt hại cho cơ sở hạ tầng. Các yếu tố chính góp phần gây ra ngập lụt bao gồm mưa lớn, triều cường, nước biển dâng do biến đổi khí hậu (BĐKH), quá trình đô thị hóa nhanh chóng, và quy hoạch chưa phù hợp. Về mặt phương pháp, ứng dụng mô hình toán thủy văn, thủy lực để đánh giá nguyên nhân và xây dựng giải pháp áp dụng phổ biến trong các nghiên cứu ngập lụt đô thị [7–10]. Giải pháp chống, giảm thiểu và thích ứng ngập lụt đô thị, các giải pháp công trình như cống ngăn triều, đê, trạm bơm hiện nay đóng vai trò chủ đạo trong khi đó các giải pháp về thoát nước đô thị bền vững, giải pháp dựa vào tự nhiên dần được nghiên cứu ở quy mô nhỏ [11, 12]. Một vấn đề còn đang bỏ ngỏ chính là nghiên cứu sự kết hợp giữa các giải pháp công trình có quy mô lớn và các giải pháp dựa vào tự nhiên phân tán quy mô nhỏ để gia tăng hiệu quả chống lũ, thích ứng với biến đổi khí hậu cho khu vực đô thị [11, 13].

Bình Dương được đánh giá là một trong những tỉnh có tốc độ đô thị hóa, công nghiệp hóa nhanh ở Việt Nam, với 65% cơ cấu kinh tế là sản xuất công nghiệp, trong đó số khu và cụm công nghiệp lần lượt là 29 khu và 12 cụm với tổng diện tích 21 ngàn ha. Về mặt đô thị hóa, 5 thành phố của Bình Dương (Thủ Dầu Một, Dĩ An, Thuận An, Tân Uyên và Bến Cát) có tỷ lệ đô thị hóa đều trên 84,4%. Dân số tỉnh Bình Dương là 2.685.513 người năm 2021, mật độ 964 người/km² cao hơn mật độ trung bình của cả nước (297 người/km²), đứng thứ 2 sau TP. Hồ Chí Minh trong vùng Đông Nam Bộ.

Về tác động của ngập lụt đô thị, ngập lụt đô thị có thể gây ra thiệt hại lớn về kinh tế và làm gián đoạn nghiêm trọng đời sống người dân cũng như chức năng đô thị [14, 15]. Xem xét ở khía cạnh kinh tế, cho thấy đối với các đô thị với mức độ đô thị hóa cao, và là nơi tập trung nhiều cụm, khu công nghiệp, thương mại, dịch vụ như TP. Hồ Chí Minh, Bình Dương... mức độ tổn thương do ngập lũ gây ra sẽ là rất lớn. Hiện trạng nghiên cứu ngập lũ ở đô thị tỉnh Bình Dương khá hạn chế, các nghiên cứu ngập chủ yếu trong các quy hoạch ở quy mô lưu vực [16, 17].

Từ những phân tích trên về hiện trạng nghiên cứu ngập đô thị tại Bình Dương, về khoảng trống trong đánh giá sự kết hợp giữa các giải pháp chống ngập quy mô lớn kết hợp với các giải pháp dựa vào tự nhiên ở Việt Nam, đặc biệt xem xét tới đặc điểm địa phương trong ra quyết định lựa chọn giải pháp. Mục tiêu của nghiên cứu này cứu nhằm làm rõ: (i) xác định nguyên nhân, xu thế của các yếu tố gây ngập lụt trên địa bàn tỉnh Bình Dương; (ii) dự báo tác động ngập lũ lên năm thành phố gồm Dĩ An, Thuận An, Bến Cát, Thủ Dầu Một và Tân Uyên xem xét tới ảnh hưởng của biến đổi khí hậu nước biển dâng (BĐKH-NBD); (iii) đề xuất giải pháp thích ứng kết hợp giữa giải pháp công trình và giải pháp dựa vào tự nhiên phù hợp với đặc điểm ngập lũ của từng thành phố. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng làm cơ sở khoa học trong xây dựng giải pháp quản lý bền vững cho các đô thị tỉnh Bình Dương. Tương tự, áp dụng cho các đô thị, thành phố khác trong áp dụng kết hợp giải pháp công trình và giải pháp dựa vào tự nhiên thích ứng với ngập lụt dưới tác động của phát triển kinh tế và BĐKH.

2. Phương pháp nghiên cứu và dữ liệu

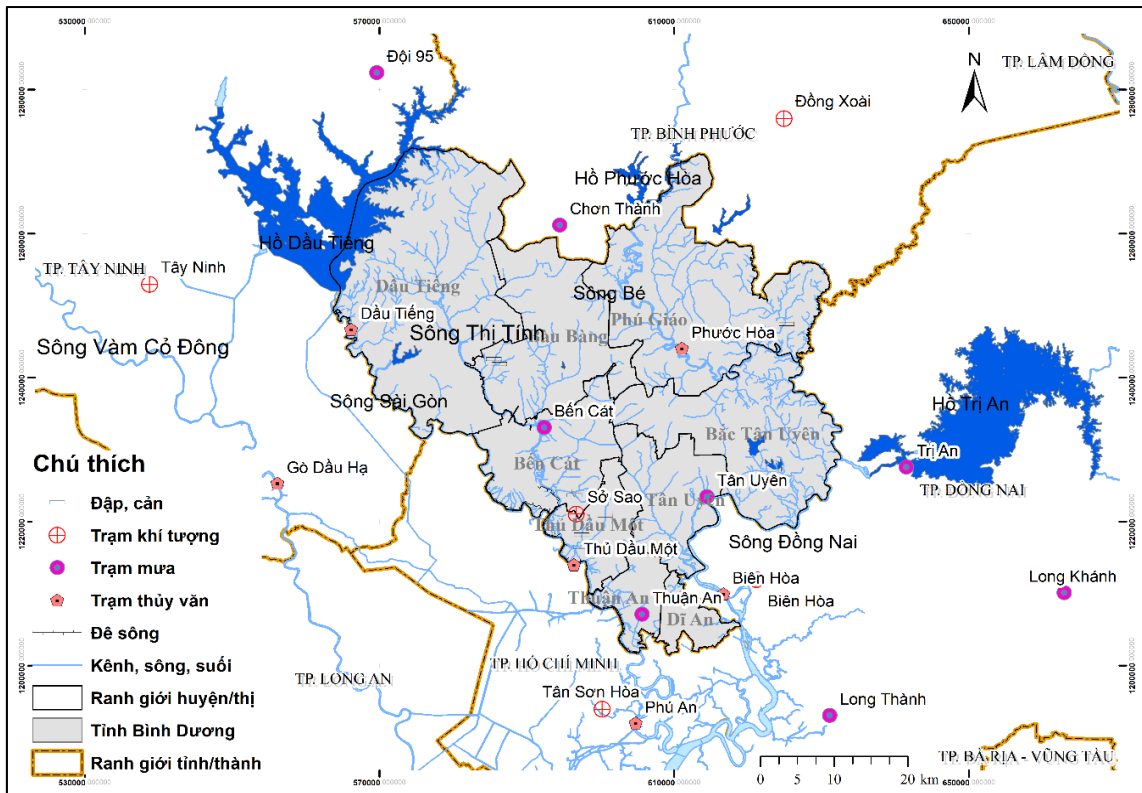
2.1. Giới thiệu khu vực nghiên cứu

Về mặt tự nhiên, Bình Dương thuộc khu vực hạ lưu vực hệ thống sông Đồng Nai - Sài Gòn, với 4 sông lớn chảy qua địa bàn tỉnh (sông Đồng Nai, sông Sài Gòn, sông Bé, và sông Thị Tín). Ngoài ra, suối, và rạch là phụ lưu các sông này phân bố ở các khu vực ven

sông. Về mặt địa hình, có hai dạng địa hình chính: đồi núi thấp và bằng phẳng phân bố chủ đạo trên toàn tỉnh, trong khi đó địa hình núi và thung lũng, bãi bồi có tỷ lệ nhỏ. Dạng bãi bồi phân bố dọc các sông lớn với giá trị cao độ thấp hơn 2,0 m, đây là khu vực có rủi ro cao tác động bởi lũ lụt, ngập triều.

Về hiện trạng hạ tầng thoát nước và thủy lợi, một số khu vực hạ tầng xây dựng đã lâu và thiếu đồng bộ và chưa khép kín giữa các khu vực cũ và mới. Ngoài ra tình trạng các suối, rạch chính bị lấn chiếm không gian dẫn tới giảm khả năng thoát nước [18]. Hạ tầng thủy lợi hiện trạng gồm: đê sông với chiều dài 44,757 km (cao trình từ +1,7-2,2 m) công trình thủy lợi và hạ tầng kỹ thuật thoát nước lần lượt là 38 và 8 công trình. Với hệ thống này, tổng diện tích tưới thiết kế 3.891 ha và 21.338 ha tiêu thoát nước. Nhiệm vụ chính của hạ tầng thủy lợi hiện nay là tưới, tiêu phòng lũ trong sản xuất nông nghiệp, và hỗ trợ tiêu thoát nước cho khu vực đô thị, dân cư và khu, cụm công nghiệp. Đánh giá chung hạ tầng thủy lợi, hỗ trợ tiêu thoát lũ xây dựng khá lâu, và chưa khép kín đặc biệt ở một số khu vực đô thị [19].

Đặc điểm và hiện trạng ngập lụt, các yếu tố gây ngập lụt ở Bình Dương đến từ tác động riêng rẽ và cộng gộp của lũ từ thượng nguồn của lưu vực sông Đồng Nai - Sài Gòn, mưa lớn và triều cường. Nhóm yếu tố làm gia tăng mức độ ngập gồm đô thị hóa, yếu tố biến đổi khí hậu. Trong hơn 20 năm trở lại đây, tình trạng ngập đặc biệt ngập lụt đô thị của Bình Dương có xu hướng gia tăng, với hơn 88 điểm ngập khu vực dân cư, và 13 điểm ngập khu vực nông nghiệp trên toàn tỉnh; và đặc biệt có nhiều điểm ngập nặng và thường xuyên xảy ra khi có mưa lớn, đặc biệt ở các TP. Thuận An, Thủ Dầu Một, Dĩ An [18].

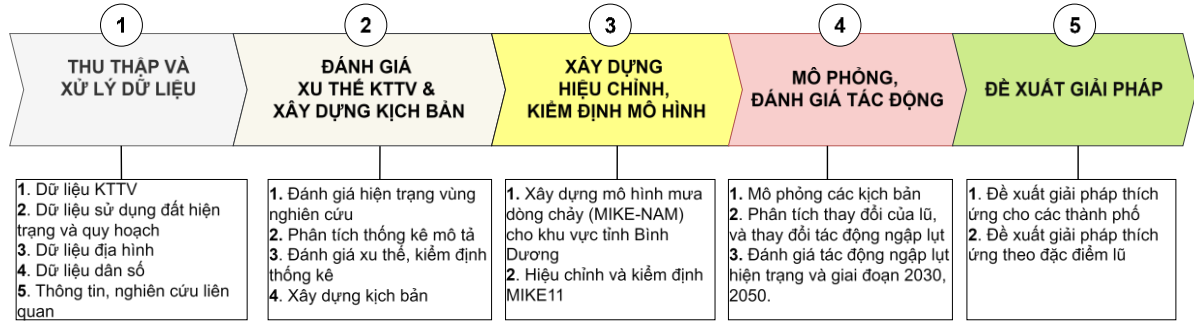


Hình 1. Khu vực nghiên cứu.

2.2. Tài liệu sử dụng trong nghiên cứu

Khung nghiên cứu: Nghiên cứu thực hiện qua năm bước chính như trình bày trong 0 gồm: (i) thu thập và xử lý dữ liệu về khí tượng thủy văn (KTTV), số liệu địa hình, sử dụng đất và số liệu dân số để phục vụ đánh tác tác động ngập, cũng như đánh giá xu thế, và xây dựng kiểm định mô hình toán; (ii) kiểm định thống kê xu thế của các yếu tố gây ngập từ đó làm cơ sở xây dựng kịch bản mô phỏng, xây dựng kịch bản cho nghiên cứu; (iii) xây dựng

mô hình mưa dòng chảy (MIKE11-NAM) chi tiết cho các suối tỉnh Bình Dương, hiệu chỉnh và kiểm định mô hình MIKE11; (iv) đánh giá tác động ngập lũ lên dân sinh, sử dụng đất và phân tích đặc điểm ngập lũ; (v) đề xuất giải pháp thích ứng.

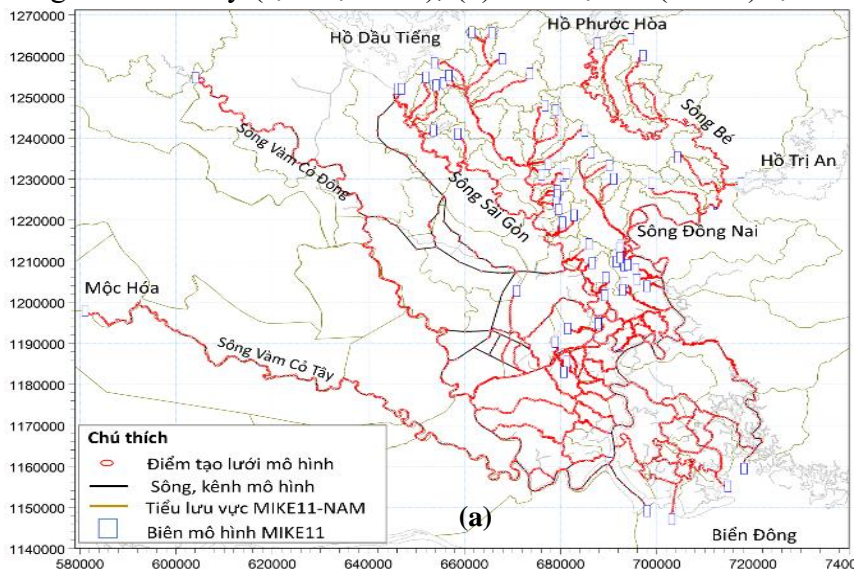


Hình 2. Sơ đồ cấu trúc của nghiên cứu.

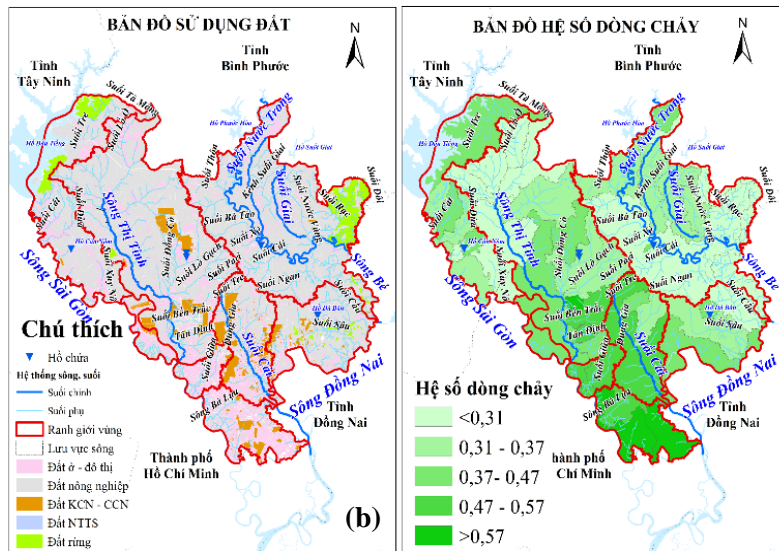
Số liệu, tài liệu sử dụng trong nghiên cứu: Mô hình MIKE gồm (MIKE11 và MIKE11-NAM) phát triển bởi Viện thủy lực Đan Mạch [20, 21]. Mô hình MIKE trong nghiên cứu kế thừa từ mô hình của Viện Quy hoạch Thủy lợi Miền Nam [22], đối với khu vực tỉnh Bình Dương MIKE11-NAM được chi tiết hóa cho các sông, suối trong tỉnh, có 47 tiểu lưu vực; số liệu xả từ các hồ thượng lưu Dầu Tiếng, Phước Hòa, và Trị An từ 1980-2021; số liệu mực nước triều đặc trưng tại trạm Thủ Dầu Một, Dầu Tiếng, Phú An, Biên Hòa từ 1980-2022; số liệu mực nước triều giờ Thủ Dầu Một, Dầu Tiếng, Phú An, Biên Hòa năm 2019 & 2020; số liệu mưa ngày từ 1980-2021 tại các trạm Sở Sao, Dầu Tiếng, Phước Hòa, Tân Uyên và Thuận An; Bản đồ sử dụng đất năm 2021, số liệu dân số thống kê đến năm 2021.

2.3. Thiết lập mô hình toán

Phạm vi mô hình MIKE11, mô hình xây dựng cho khu vực hạ lưu sông Đồng Nai-Sài Gòn, từ hạ lưu hồ Dầu Tiếng, hồ Phước Hòa, Trị An chảy ra Biển Đông trình bày trong Hình 3a. Cụ thể, mô hình có 126 sông kênh lớn nhỏ, trong đó có các sông lớn như sông Sài Gòn, Đồng Nai, sông Bé, và sông Thị Vải. Biên mô hình gồm: (1) Biên thượng lưu (5 biên) lưu lượng xả từ các hồ Dầu Tiếng, Phước Hòa, Trị An, sông Vàm Cỏ Đông (tính từ mô hình mưa dòng chảy), và sông Vàm Cỏ Tây (tại Mộc Hóa); (2) biên hạ lưu (4 biên) tại các cửa sông Thị Vải, Lòng Tàu, Đồng Tranh, Soài Rạp, số liệu này lấy từ trạm hải văn Vũng Tàu; (3) biên nhập lưu khu giữa từ mô hình MIKE11-NAM, có 111 tiểu lưu vực trong đó đối với nội tỉnh Bình Dương có 47 tiểu lưu vực. Kết quả từ MIKE11-NAM nhập dọc sông, suối theo tỷ lệ lưu vực. Hệ số dòng chảy được xác định từ bản đồ sử dụng đất cho các tiểu lưu vực, như trình bày Hình 3b.



Hình 3. (a) Mạng lưới mô hình MIKE11 và tiểu lưu vực mô hình MIKE 11-NAM vùng nghiên cứu.



Hình 3. (b) Bản đồ sử dụng đất - hệ số dòng chảy các tiểu lưu vực.

2.4. Phương pháp đánh giá xu thế và đánh giá khả năng mô hình toán

Do các đặc trưng số liệu đánh giá xu thế không tuân theo phân phối chuẩn. Vì vậy, phương pháp kiểm định phi tham số gồm kiểm định Mann-Kendall và ước lượng xu thế Sen được lựa chọn để đánh giá xu thế [23]. Đây là những phương pháp phi tham số được dùng phổ biến để xác định xu thế thay đổi các yếu tố khí tượng, thủy văn, hải văn [24, 25].

Kiểm định Mann-Kendall: Kiểm nghiệm Mann-Kendall dạng kiểm định phi tham số [26, 27] chỉ số thống kê Mann-Kendall S được tính bởi:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\text{Trong đó } \text{sign}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & \text{khi } x_i - x_j > 0 \\ 0 & \text{khi } x_i - x_j = 0 \\ -1 & \text{khi } x_i - x_j < 0 \end{cases}$$

Giá trị $S > 0$ chỉ xu thế tăng, $S < 0$ chỉ xu thế giảm. Tuy nhiên cần phải tính toán xác suất đi kèm với S và n để xác định mức ý nghĩa của xu hướng.

Phương sai của S được tính theo công thức:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (2)$$

Trong đó g là số các nhóm có giá trị giống nhau, t_p là số phần tử thuộc nhóm thứ p. Trường hợp số lượng cỡ mẫu, $n > 10$, chỉ số thống kê kiểm tra chuẩn, Z_s tính theo công thức sau.

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{VAR}(S)]^{1/2}}, & \text{nếu } S > 0 \\ 0, & \text{nếu } S = 0 \\ \frac{S+1}{[\text{VAR}(S)]^{1/2}}, & \text{nếu } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Phương pháp ước lượng xu thế Sen (Sen's slope): Đây là phương pháp phi tham số để ước tính xu hướng trong mẫu N cặp số liệu 23.

$$Q_i = \text{median} \left\{ \frac{x_j - x_k}{j - k} \right\} \text{ với } i=1, 2, \dots, N \quad (4)$$

Trong đó x_i , và x_k là số liệu bước thời gian thứ j, và k với ($j > k$); n: số phần tử trong chuỗi số liệu tính toán.

Các giá trị N của Q_i được xếp hạng từ thấp nhất đến cao nhất và độ dốc Sen được ước tính như sau:

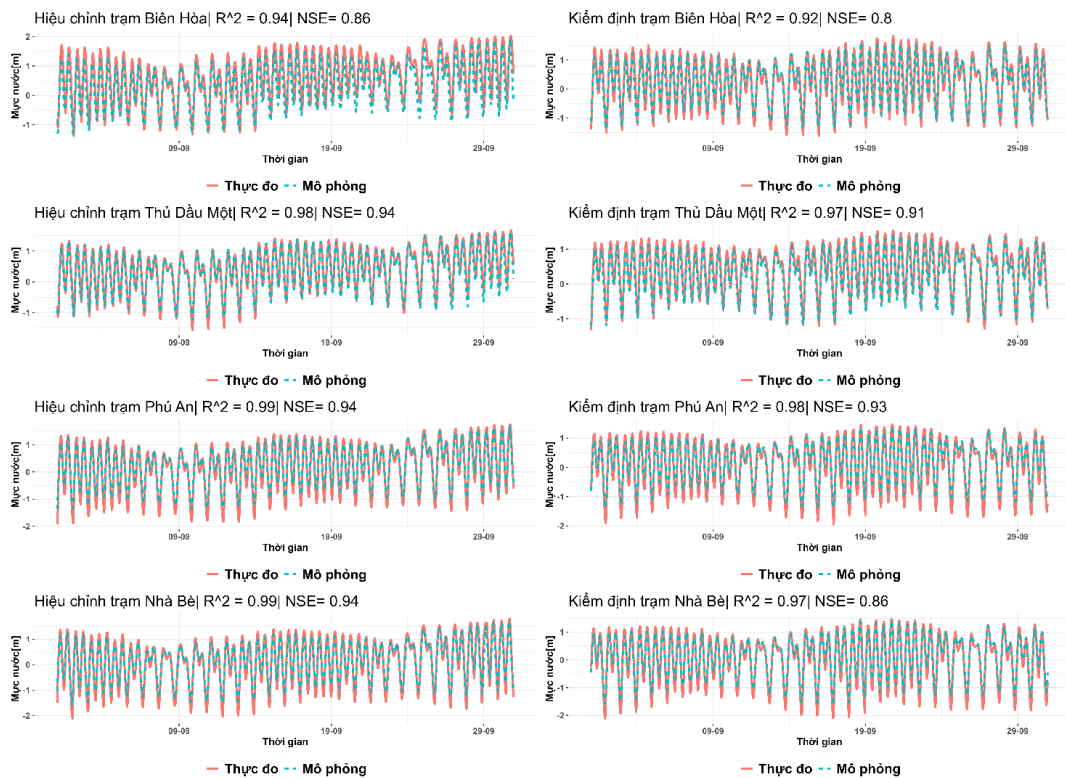
$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{\lfloor \frac{N+1}{2} \rfloor}, & \text{nếu } N \text{ lẻ} \\ \frac{Q_{\frac{N}{2}} + Q_{\frac{N+2}{2}}}{2}, & \text{nếu } N \text{ chẵn} \end{cases} \quad (5)$$

Giá trị Q_{med} dương phản ánh xu thế gia tăng, và ngược lại.

Đánh giá độ tin cậy của mô hình toán: Hệ số tương quan (R^2) và hiệu quả Nash-Sutcliffe (NSE) được sử dụng để kiểm tra mức độ phù hợp của mô hình. Hệ số tương quan (R^2) thể hiện mối quan hệ tuyến tính giữa các giá trị đo đạc và mô phỏng tính toán từ mô hình. Hệ số NSE đo lường mức độ biến thiên quan sát được được giải thích bằng mô phỏng. Giá trị R^2 , và NSE tiến đến 1 thì mô hình được xem là đạt mức độ tin cậy tối đa [28].

2.5. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình toán

Mô hình được hiệu chỉnh thời gian mùa lũ 2019 và kiểm định mùa lũ 2020. Hình 4 trình bày so sánh mực nước giờ kết quả hiệu chỉnh và kiểm định tháng 9 tại các trạm Biên Hòa, Thủ Dầu Một, Phú An và Nhà Bè. Kết quả cho tương đồng về pha giữa kết quả mô phỏng và thực đo, giá trị R^2 ở các trạm đều lớn hơn 0,9 trong khi đó NSE lớn hơn 0,8 so sánh với tiêu chí đánh giá mô hình [28]. Kết quả cho thấy mô hình phản ánh tốt chế độ thủy văn, thủy lực, độ tin cậy để ứng dụng mô phỏng các kịch bản trong nghiên cứu.



Hình 4. Kết quả hiệu chỉnh, kiểm định với số liệu thực đo các trạm thủy văn trong vùng nghiên cứu.

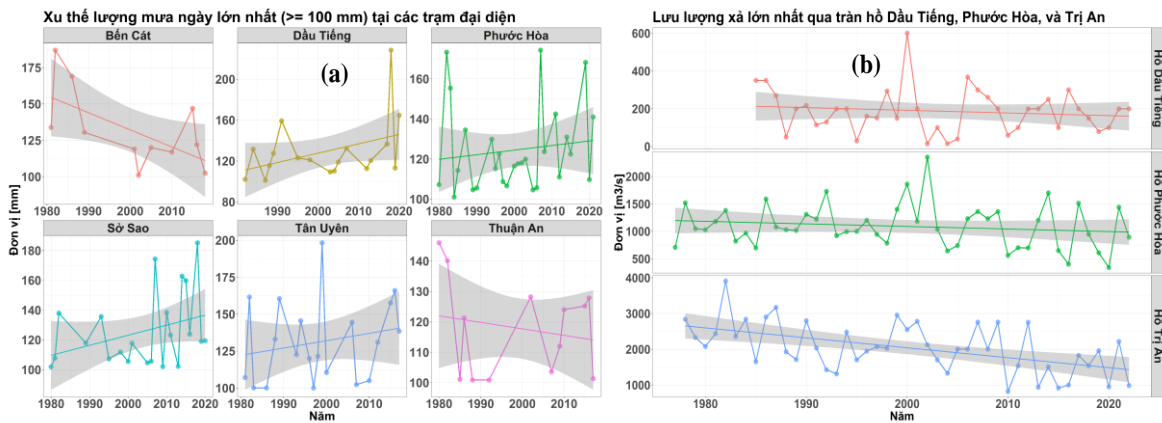
2.6. Thiết lập kịch bản nghiên cứu

Nghiên cứu lựa chọn đánh giá ngập ở tổ hợp tần suất $P = 1\%$ xem xét tác động của BĐKH-NBD giai đoạn hiện trạng, 2030 và 2050 xem xét các yếu tố gồm mưa, triều và xả lũ tại $P = 1\%$. Tần suất $P = 1\%$ đánh giá tác động nguy cơ ngập lũ lên các đô thị, khu dân cư với yêu cầu bảo vệ cao. Dự báo nước biển dâng khu vực từ Mũi Kê Gà - Mũi Cà Mau theo kịch bản RCP 8.5 năm 2030 tăng 14 cm và 2050 tăng 28 cm. Về lượng mưa cực trị một ngày lớn nhất dự báo tăng phổ biến 15÷25% vào giữa thế kỷ [29].

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đánh giá xu thế các yếu tố gây ngập

Xu thế mưa cực trị ngày với giá trị lớn hơn 100 mm/24h trình bày trong 0. Trạm Dầu Tiếng, Phước Hòa, Sở Sao, và Tân Uyên có xu hướng gia tăng. Ngược lại, Bến Cát và Thuận An có xu thế giảm. Điều này cho thấy, đa phần tỉnh Bình Dương mưa cực trị có xu hướng gia tăng. Định lượng xu hướng gia tăng của lượng mưa cực trị một ngày lớn nhất, giá trị độ dốc và hằng số tau-value âm tại trạm Bến Cát và Thuận An thể hiện xu thế giảm, với giá trị phần trăm lần lượt là 30% và 1%. Ngược lại, các trạm còn lại độ dốc và hằng số tau-value đều dương cho thấy xu hướng tăng, với tỷ lệ phần trăm tại Dầu Tiếng và Sở Sao lớn nhất trong chuỗi đánh giá lần lượt là 18,3 % và 15% (Bảng 2).



Hình 5. Xu thế lượng mưa ngày lớn nhất trên 100 mm tại một số trạm mưa đại diện (a) và Lưu lượng lớn nhất và lưu lượng xả lớn nhất các hồ Dầu Tiếng, Phước Hòa và Trị An (b).

Xu thế đỉnh lũ từ phía thượng lưu, dòng chảy phía thượng lưu được điều hòa bởi hệ thống hồ chứa bậc thang. Trong đó, ba hồ cuối cùng trong hệ thống bậc thang gồm hồ Trị An trên sông Đồng Nai đi vào hoạt động chính thức từ năm 1991, hồ Dầu Tiếng trên sông Sài Gòn từ năm 1986 và hồ Phước Hòa trên sông Bé từ năm 2012. Lưu lượng xả từ các hồ từ năm 1980 đến năm 2022 cho cả giai đoạn chưa có hồ xây dựng và sau khi đi vào vận hành trình bày trong Hình 5. Tổng quan, có thể thấy trong 42 năm giám sát, lũ năm 2000 là trận lũ có lưu lượng đỉnh lũ ở trên cả 3 sông đều nằm trong ngưỡng giá trị lớn. Trong đó hồ Dầu Tiếng xả với lưu lượng 600 m³/s, tại trạm thủy văn Phước Hòa lưu lượng ước tính là 1.860 m³/s và hồ Trị An xả là 2.550 m³/s. Về mặt xu thế, lưu lượng đỉnh lũ về phía hạ lưu trên các sông có xu thế giảm so sánh trong và cả trước thời kỳ các hồ Trị An, Phước Hòa đi vào hoạt động.

Xu thế đỉnh triều, tại các trạm như Phú An, Thủ Dầu Một và Biên Hòa đỉnh triều thường xuyên vượt cấp báo động những năm gần đây. Cụ thể, tại Thủ Dầu Một mực nước lớn nhất năm 2021, và 2022 ghi nhận giá trị cực đại lần lượt là 1,74 m và 1,76 m vượt BĐ3 (1,6 m) là 14-16 cm. Tương tự, tại Phú An và Nhà Bè ghi nhận giá trị quanh ngưỡng 1,7 m và vượt BĐ 3 trên 10 cm. Tại trạm Biên Hòa, mực nước lớn nhất từ năm 2016 đến 2021 ghi nhận xấp xỉ BĐ 2 (2,0 m). Kết quả kiểm định xu thế của đỉnh triều bằng phương pháp ước lượng độ dốc Sen và kiểm định Mann-Kendall trình bày trong Bảng 1. Tổng quan chung, giá trị độ dốc và hệ số Tau-value được ghi nhận phổ biến dương ở tất cả các trạm và các đặc trưng. Điều này cho thấy, xu thế gia tăng của các đặc trưng mực nước đỉnh triều ở các trạm trong chuỗi đánh giá, điều này phù hợp với một số nghiên cứu liên quan [30–32]. Riêng trạm Dầu Tiếng, đặc trưng chế độ thủy văn ảnh hưởng trực tiếp bởi vận hành của hồ Dầu Tiếng. Như đã phân tích, những năm gần đây xu thế lưu lượng xả lũ giảm, do đó mực nước lớn nhất tại trạm Dầu Tiếng giảm.

Bảng 1. Kiểm định định triều bằng phương pháp Mann-Kendall và ước lượng độ dốc Sen.

Trạm	P-value ¹	Độ dốc	Tau-value ²	Trung bình [m]	Số năm	Tỷ lệ thay đổi [%]	Xu hướng
Biên Hòa	7,33E-08	0,02	0,59	1,72	41	37,75	Tăng
Dầu Tiếng	1,00E+00	0,00	0,00	2,30	21	-0,87	Giảm
Phú An	4,17E-13	0,01	0,80	1,42	41	39,43	Tăng
Thủ Dầu Một	1,30E-04	0,04	0,92	1,56	11	24,74	Tăng

¹ P-value: Hệ số ước tính mức ý nghĩa thống kê của kiểm định, giá trị P xác định liệu xu hướng đó có ý nghĩa thống kê hay không, hay phản ánh mức độ chắc chắn của kiểm định thống kê, với P-value ≤ 0,05 có thể nhận định xu hướng có ý nghĩa thống kê, ngược lại chưa đủ số liệu để khẳng định có hay không, hay chỉ là xu hướng có tính ngẫu nhiên.

² Tau-value: Hay còn gọi là Kendall's tau, một thước đo về độ mạnh và hướng của mối quan hệ đơn điệu giữa hai biến, Tau biến đổi từ -1 đến 1, với giá trị gần +1 phản ánh xu hướng gia tăng liên tục, với giá trị 0 không có xu hướng, gần -1 xu hướng giảm liên tục.

Bảng 2. Kết quả kiểm định xu hướng Sen's slope và Mann-Kendall cho mưa ngày ≥ 100 mm.

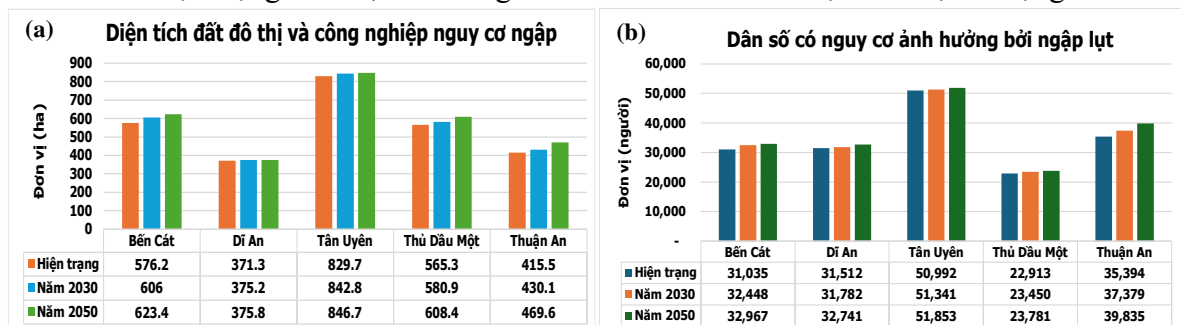
Trạm	P-value	Độ dốc	Tau-value	Trung bình [mm]	Số năm	Tỷ lệ thay đổi [%]	Xu hướng
Bến Cát	0,09	-3,67	-0,42	131,70	11	-30,6	Giảm
Dầu Tiếng	0,13	1,31	0,27	129,29	18	18,3	Tăng
Phước Hòa	0,19	0,48	0,18	124,46	28	10,8	Tăng
Sở Sao	0,14	0,86	0,23	125,63	22	15,0	Tăng
Tân Uyên	0,40	1,10	0,14	131,28	20	16,8	Tăng
Thuận An	0,81	-0,08	-0,06	117,88	13	-0,9	Giảm

3.2. Tác động ngập lũ dự báo đến năm 2030 và 2050

Về diện tích ngập, tổng diện tích ngập ở 5 thành phố khoảng 9.724 ha trong đó TP. Bến Cát có diện tích lớn nhất là 2.884 ha và TP. Thuận An nhỏ nhất là 931 ha ở hiện trạng. Giá trị này dự báo gia tăng 3% và 5% diện tích tương ứng với 10.001 ha và 10.187 ha lần lượt đến năm 2030 và 2050 nếu không thực hiện bất kỳ giải pháp thích ứng. Một số khu vực ngập sâu ven sông và khu vực các suối trong khu vực thành phố với mực ngập trên 1,0 m. Cụ thể, tại TP. Tân Uyên các xã/phường như Thạnh Hội, Bạch Đằng và Thạnh Phước; TP. Thuận An gồm An Thạnh, An Sơn, Vĩnh Phú; TP. Thủ Dầu Một gồm phường Tân An, Chánh Mỹ, Chánh Nghĩa; TP. Dĩ An gồm phường Tân Bình và Bình Thắng (Hình 8, 9).

Đánh giá tác động lên dân số, với lũ hiện trạng tổng số người nguy cơ bị ảnh hưởng khoảng 171.846 người, và gia tăng lên 176.400 người năm 2030 và 181.177 người năm 2050. Trong đó TP. Tân Uyên và Thuận An có số người bị ảnh hưởng lớn nhất lần lượt là 50.992 và 35.394 người ở hiện trạng và dự báo gia tăng lên 51.853 và 39.835 người giai đoạn 2050. Có thể thấy, TP. Thuận An mặc dù diện tích ngập nhỏ nhất trong 5 thành phố nhưng do mật độ dân số cao vì vậy số người dự báo nguy cơ ảnh hưởng bởi ngập đứng thứ hai sau TP. Tân Uyên (Hình 7b).

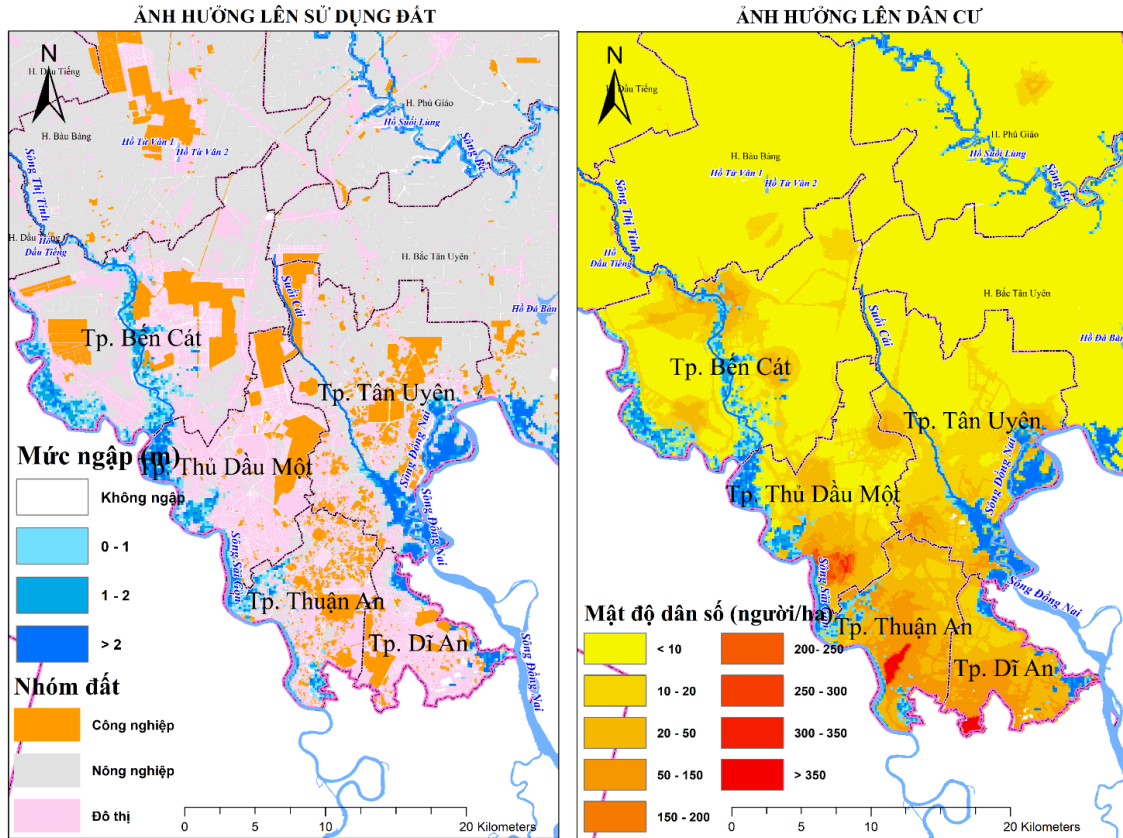
Tác động lên cơ sở hạ tầng đất đô thị và đất công nghiệp trình bày tại **Error! Reference source not found.a**, cụ thể TP. Tân Uyên dự báo có diện tích ảnh hưởng ngập lớn nhất ở hiện trạng là 829,7 ha trong khi đó TP. Dĩ An có diện tích bị tác động nhỏ nhất



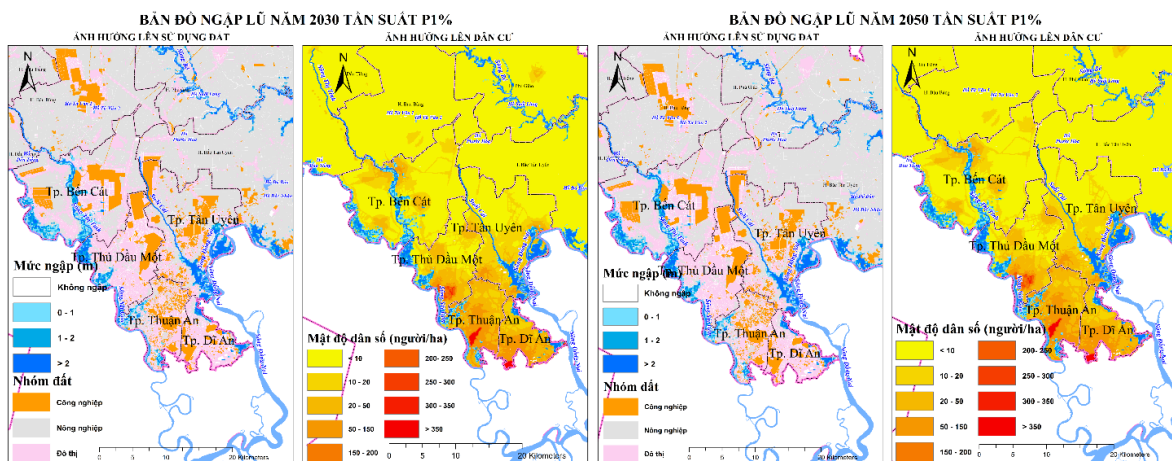
Hình 6. (a) Diện tích đất đô thị và công nghiệp nguy cơ ngập, (b) Dân số có nguy cơ ảnh hưởng bởi ngập lụt.

371,3 ha. Tuy nhiên, tỷ lệ diện tích đất công nghiệp ở TP. Dĩ An bị tác động chiếm hơn 30% tổng diện tích bị tác động trong khi đó ở TP. Tân Uyên chỉ chiếm 2%. Mức độ gia tăng diện tích ngập bị ảnh hưởng của TP. Thuận An dự báo lớn nhất tăng 13% (từ 415,5 ha lên 469,6 ha), và tăng 8% ghi nhận được tại TP. Thủ Dầu Một và Bến Cát. Ngược lại, ở TP. Dĩ An và Tân Uyên mức gia tăng biến động 1-2%.

BẢN ĐỒ NGẬP LŨ HIỆN TRẠNG TẦN SUẤT P1%



Hình 7. Bản đồ ngập lũ lên sử dụng đất và dân số ở hiện trạng.



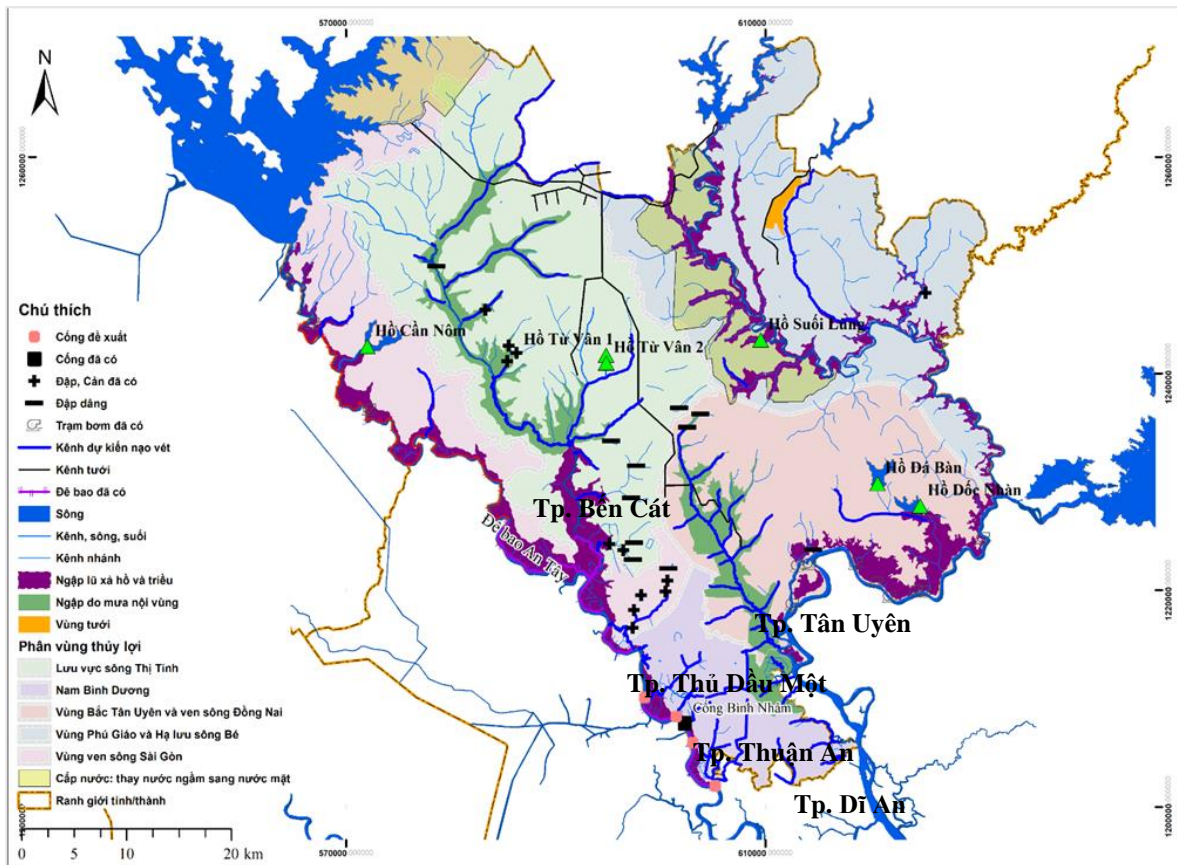
Hình 8. Bản đồ ngập lũ lên sử dụng đất và dân số năm 2030 và năm 2050.

Dự báo tác động ngập lũ ở năm thành phố giai đoạn 2030 và 2050 cho thấy ngập lũ có xu hướng gia tăng tác động lên dân cư, khu vực đô thị, công nghiệp với mức độ rủi ro lũ ở các thành phố khác nhau. Cụ thể, TP. Tân Uyên dự báo có diện tích ngập lớn nhất phổ biến là đất đô thị, trong khi đó TP. Dĩ An có diện tích đất công nghiệp dự báo ảnh hưởng lớn nhất. Mức gia tăng diện tích bị tác động ngập lũ đến năm 2050 trong kịch bản mô phỏng dự

báo TP. Thuận An có giá trị gia tăng lớn nhất 14%, tiếp đến TP. Thủ Dầu Một và Bến Cát ở mức 8%. Ngược lại, Tân Uyên và Dĩ An thay đổi không nhiều. Tác động lên dân cư, Tân Uyên, và Thuận An là hai thành phố có số người dự báo bị tác động lớn nhất; trong đó mặc dù diện tích ngập lũ nhỏ nhất trong năm thành phố nhưng do mật độ dân số cao nên mức độ tác động lên dân cư ở TP. Thuận An đứng thứ hai sau TP. Tân Uyên.

3.3. Đề xuất các giải pháp thích ứng giảm thiểu tác động ngập lũ

Kết quả phân tích tác động cho thấy mặc dù một số khu vực có tuyến đê dọc sông Sài Gòn, Thị Tính tuy nhiên cao trình đỉnh đê không đảm bảo chống lũ theo kịch bản tính toán và hệ thống đê chưa khép kín. Vì vậy, lũ trên sông tràn vào khu vực thấp của các thành phố gây ngập. Ngoài ra, năng lực thoát của các suối không đảm bảo nên gây ngập một số khu vực cục bộ trong thành phố như đã phân tích (Hình 9).



Hình 9. Phân vùng thủy lợi và các nguyên nhân gây ngập.

Điều này cho thấy, giải pháp tổng thể giảm thiểu tác động của ngập lũ, cần xem xét nâng cấp hoàn thiện tuyến phòng thủ dọc sông (đê, tường chắn, cống ngăn triều...), kết hợp duy trì không gian thoát nước, giải pháp động lực và giải pháp dựa vào tự nhiên các khu trũng phân tán vùng trũng. Trong nghiên cứu này đề xuất cần kết hợp đồng bộ giải pháp công trình và giải pháp phi công trình như áp dụng giải pháp dựa vào tự nhiên (NbS) như phục hồi dòng chảy tự nhiên của suối, rạch; hồ điều hòa; gia tăng khả năng thấm; gia tăng tham gia của cộng đồng; hạ tầng xanh như mái nhà xanh, tường xanh.. hay các giải pháp của hệ thống tiêu thoát nước đô thị bền vững (SUDs) cũng là một thành phần của NbS, thiên hướng phù hợp cho các khu vực đã đô thị hóa với không gian hạn chế. Trong khi đó, cái giải pháp NbS dường như gặp thách thức ở các đô thị hiện hữu và phù hợp hơn cho các đô thị mới [13]. Do đó, trong nghiên cứu này dựa trên đặc điểm ngập, điều kiện tự nhiên, hiện trạng và định hướng sử dụng đất sẽ đề xuất kết hợp giữa NbS, SUDs với giải pháp công trình cho mỗi đô thị khác nhau, chi tiết trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Đề xuất giải pháp kết hợp giữa giải pháp công trình và phi công trình cho từng thành phố.

Thành phố	Giải pháp công trình	Giải pháp phi công trình
Bến Cát	- Lên đề kết hợp giao thông từ cửa sông Thị Tính tới thị trấn Mỹ Phước	- Nạo vét suối như (Cầu Định, Ông Tề, Chà Vi, Cầu Quan) - Khu vực trữ chậm lũ ven sông Sài Gòn - Duy trì hồ điều hòa - Kiểm soát hệ số dòng chảy nhỏ hơn 0.45
Thủ Dầu Một	- Kép kín và nâng cấp đê dọc sông Sài Gòn đảm bảo chống lũ P1%. - Giải pháp bơm hỗ trợ	- Nạo vét rạch tự nhiên (Suối Giữa - Bung Cầu - rạch Bà Cô, Bung Biệp - Suối Cát, Rạch Bà Lụa, Ông Đành, Thủy Năng, Thủ Ngự, rạch Trầu) - Áp dụng các giải pháp SUDs gia tăng khả năng thấm bề mặt
Thuận An	- Hoàn thiện tuyến đê An Sơn -Lái Thiêu - Xây dựng cống ngăn triều (Vĩnh Bình, Lái Thiêu, Vàm Búng, Bà Lụa)	- Nâng cấp các rạch Rạch Ông Bó, Cầu Miếu, Vĩnh Bình, rạch Lái Thiêu, Thủy Năm, Rạch Bà Lụa - Xây dựng quy trình vận hành kết hợp giữ hệ thống bảo vệ bên ngoài (đê, cống ngăn triều) và không gian trữ bên trong - Áp dụng các giải pháp SUDs gia tăng khả năng thấm bề mặt
Dĩ An	- Xây dựng cống ngăn triều - Nâng cốt nền	- Nâng cấp nạo vét suối Cây Trường, suối Ông Ngời, suối sâu Tân Thắng, suối Bình Thắng, sông Ngọc - rạch Bà Lò, rạch Bà Khâm, rạch Cái Cầu (suối Xiệp), suối Nhum - Phối hợp với Tp. Biên Hòa của Đồng Nai trong kiểm soát lũ từ sông Đồng Nai - Áp dụng các giải pháp SUDs gia tăng khả năng thấm bề mặt
Tân Uyên	- Khép kín đê bao bảo vệ cù lao Thạnh Hội, và Bạch Đằng; và dọc suối Cái lên tới 3-4 km đi về phía thượng lưu	- Áp dụng NbS cho khu vực đô thị mới, kiểm soát hệ số dòng chảy nhỏ hơn 0,4

4. Kết luận

Nguyên nhân gây ngập lũ ở khu vực đô thị tỉnh Bình Dương gồm mưa lớn, triều cường và lũ trên lưu vực. Các yếu tố này tác động riêng rẽ, công gộp kết hợp với tác động gia tăng của quá trình đô thị hóa và BĐKH làm cho tần suất và mức độ ngập lũ gia tăng. Nghiên cứu đã chỉ ra mưa lớn và triều cường gia tăng trong giai đoạn hai thập niên gần đây và là hai nguyên nhân phổ biến gây ngập lũ ở các thành phố trong tỉnh Bình Dương; trong khi đó lũ từ thượng lưu cơ bản được kiểm soát tốt những năm gần đây.

Giải pháp đề xuất để giảm thiểu tác động và thích ứng với tác động của ngập lũ, xây dựng kết hợp giữa giải pháp công trình và phi công trình phù hợp các yếu tố tự nhiên của từng thành phố. Nhóm giải pháp đề xuất gồm gồm hoàn thiện tuyến phòng lũ dọc sông (đê, tường chắn, cống ngăn triều...), kết hợp duy trì, cải tạo không gian thoát nước của trục thoát nước, giải pháp động lực và giải pháp dựa vào tự nhiên duy trì khu trữ vùng trũng ven sông Sài Gòn để trữ lũ.

Nghiên cứu này đã tìm ra được nguyên nhân, phân tích xu thế các yếu tố gây ngập lụt và bước đầu dự báo tác động ngập lũ lên năm thành phố theo kịch bản tần suất P1% giai đoạn 2030 và 2050 từ đó đề xuất các giải pháp thích ứng. Một số yếu tố chưa xem xét trong nghiên cứu này như đánh giá năng lực tiêu thoát của hệ thống thoát nước đô thị, kết nối với hệ thống thoát nước tự nhiên. Nghiên cứu chi tiết cho từng lưu vực độc lập theo từng thành phố dựa trên nền tảng nghiên cứu lưu vực là điều cần thiết để kiểm tra các giải pháp đề xuất một cách cụ thể. Vấn đề này sẽ được tiếp tục làm rõ trong những nghiên cứu tiếp theo.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: D.T.H.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: D.T.H., N.T.N.; Xử lý số liệu, mô phỏng, phân tích số liệu: N.T.N.; Viết bản thảo bài báo: D.T.H., N.T.N.; Chỉnh sửa bài báo: D.T.H.

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. Aghaloo, K.; Sharifi, A.; Habibzadeh, N.; Ali, T.; Chiu, Y.R. How nature-based solutions can enhance urban resilience to flooding and climate change and provide other co-benefits: A systematic review and taxonomy. *Urban For. Urban Greening* **2024**, *95*, 128320. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128320>.
2. Agonafir, C.; Lakhankar, T.; Khanbilvardi, R.; Krakauer, N.; Radell, D.; Devineni, N. A review of recent advances in urban flood research. *Water Secur.* **2023**, *19*, 100141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasec.2023.100141>.
3. Dharmarathne, G.; Waduge, A.O.; Bogahawaththa, M.; Rathnayake, U.; Meddage, D.P.P. Adapting cities to the surge: A comprehensive review of climate-induced urban flooding. *Results Eng.* **2024**, *22*, 102123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102123>.
4. Giang, N.V.; Dat, N.T. Solutions to deal with flooding by using green buildings in Vietnamese urban areas from Japanese experience. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2020**, *869(7)*, 072001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/7/072001>.
5. Guo, K.; Guan, M.; Yu, D. Urban surface water flood modelling - A comprehensive review of current models and future challenges. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **2021**, *25(5)*, 2843–2860. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2843-2021>.
6. Huang, Y.; Tian, Z.; Ke, Q.; Liu, J.; Irannezhad, M.; Fan, D.; Hou, M.; Sun, L. Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management. *WIREs Water* **2020**, *7(3)*, 1421. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wat2.1421>.
7. Phùng, H.L.T.; Phùng, N.K.; Hiền, L.T. Đánh giá tác động của một số yếu tố tự nhiên và nhân sinh đến ngập lụt thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2017**, *704*, 8–19. [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2019\(704\).8-19](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2019(704).8-19).
8. Manandhar, B.; Cui, S.; Wang, L.; Shrestha, S. Urban flood hazard assessment and management practices in South Asia: A review. *Land* **2023**, *12*, 627. <https://doi.org/10.3390/land12030627>.
9. My, N.H.D.; Tuấn, T.H.; Toledo-Gallegos, V.M.; Börger, T.; Tuấn, Đ.D.A. Phân tích lợi ích - chi phí cho giải pháp hạ tầng xanh nhằm giảm thiểu rủi ro ngập lụt ở Thành phố Cần Thơ. *Tạp chí Kinh tế và Phát triển* **2023**, *313*, 80–90. <https://doi.org/10.33301/JED.VI.1198>.
10. Nguyen, M.T.; Sebesvari, Z.; Souvignet, M.; Bachofer, F.; Braun, A.; Garschagen, M.; Schinkel, U.; Yang, L.E.; Nguyen, L.H.K.; Hochschild, V.; Assmann, A.; Hagenlocher, M. Understanding and assessing flood risk in Vietnam: Current status, persisting gaps, and future directions. *J. Flood Risk Manage.* **2021**, *14(2)*, 12689. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfr3.12689>.
11. Rana, A.; Zhu, Q.; Detken, A.; Whalley, K.; Castet, C. Strengthening climate-resilient development and transformation in Viet Nam. *Clim. Change* **2022**, *170(1)*, 4. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03290-y>.
12. Scheiber, L.; David, C.G.; Jalloul, M.H.; Visscher, J.; Nguyen, H.Q.; Leitold, R.; Diez, J.R.; Schlurmann, T. Low-regret climate change adaptation in coastal megacities – evaluating large-scale flood protection and small-scale rainwater detention measures for Ho Chi Minh City, Vietnam. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2023**, *23(6)*, 2333–2347. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2333-2023>.

13. Sagala, S.; Murwindarti, A.; Avila, B.E.; Rosyidie, A.; Azhari, D. Sustainable urban drainage system (SUDS) as nature based solutions approach for flood risk management in high-density urban settlement. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **2022**, 986(1), 012055.
14. Thiện, T.Đ.; Linh, Đ.T.; Gám, V.T.; Thu, N.T.; Chiến, H.C. Thực trạng ngập úng đô thị Hà Nội giai đoạn 2012-2022. *Tạp chí Kiến trúc* **2023**, 2, 72–75.
15. UNISDR. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, 2015.
16. Vo, N.D.P.; Huynh, T.T.T.; Vo, T.D. Potential application of LID techniques to reduce urban flooding in different rainfall pattern, case study for Quy Nhon, Vietnam. In P. Gourbesville and G. Caignaert (Eds) *Advances in Hydroinformatics*. Singapore: Springer Singapore, 2023, pp. 517–526.
17. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn. Quy hoạch phòng, chống thiên tai và thủy lợi thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2023.
18. Viện Quy hoạch Xây dựng Miền Nam, Quy hoạch Cao độ nền - Thoát nước mặt đô thị Bình Dương đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2021.
19. Chi cục Thủy lợi tỉnh Bình Dương. Báo cáo: Kết quả kiểm tra công trình thủy lợi, đê bao, phòng chống thiên tai, tiêu thoát nước trong mưa lũ năm 2022, 2022.
20. DHI. MIKE 11: User Guide - A modelling system for Rivers and Channels, 2014.
21. Clilverd, H.M.; Thompson, J.R.; Heppell, C.M.; Sayer, C.D.; Axmacher, J.C. Coupled hydrological/hydraulic modelling of river restoration impacts and floodplain hydrodynamics. *River Res. Appl.* **2016**, 32(9), 1927–1948. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/rra.3036>.
22. Viện Quy hoạch Thủy lợi Miền Nam. Quy hoạch tổng thể thủy lợi vùng Đông Nam Bộ giai đoạn đến 2030 và định hướng đến năm 2050 thích ứng với biến đổi khí hậu, nước biển dâng, 2018.
23. Sen, P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.* **1968**, 63(324), 1379–1389.
24. Hung, P.M. Nghiên cứu đánh giá xu hướng biến động lượng mưa lớn nhất theo các thời đoạn khác nhau giai đoạn 1975-2021, tỉnh Vĩnh Phúc. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*.
25. Frimpong, B.F.; Koranteng, A.; Molkenhain, F. Analysis of temperature variability utilising Mann-Kendall and Sen's slope estimator tests in the Accra and Kumasi Metropolises in Ghana, *Environ. Syst. Res.* **2022**, 11(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s40068-022-00269-1>.
26. Kendall, M.G. Rank correlation methods, 1955.
27. Mann, H.B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* **1945**, 13(3), 245–259. <https://doi.org/10.2307/1907187>.
28. McCuen, R.H.; Knight, Z.; Cutter, A.C. Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. *J. Hydrol. Eng.* **2006**, 11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:6\(597\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597)).
29. Bộ Tài nguyên và Môi trường. Kịch bản biến đổi khí hậu, 2020.
30. Quỳnh, N.P. Đánh giá biến động mực nước và ngập lụt vùng hạ lưu sông Sài Gòn dưới tác động của đô thị hóa, xây dựng công trình chống ngập và xả lũ các hồ chứa nước thượng lưu. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, 2018.
31. Ngân hàng Phát triển Châu Á (ADB). Thành phố Hồ Chí Minh thích nghi với biến đổi khí hậu, 2010.
32. Giang, N.N.H.; Quang, C.N.X.; Long, D.T.; Ky, P.D.; Vu, N.D.; Tran, D.D. Statistical and hydrological evaluations of water dynamics in the lower Sai Gon-Dong Nai River, Vietnam. *Water* **2022**, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010130>.

Assessment of flooding impact and investigation of adaptive measures for cities in Binh Duong Province, 2030-2050

Doan Thu Ha^{1*}, Nguyen Trung Nam²

¹ Thuyloi University; thuha_ctn@tlu.edu.vn; trunghieu.ma@hotmail.com

² Southern Institute of Water Resources Planning; nguyentrungnam47v@gmail.com

Abstract: Binh Duong Province, an industrial hub in southern Vietnam, has a high urbanization rate exceeding 84.4%. In recent years, the province has encountered a significant challenge of urban flooding with increasing frequency and intensity, which adversely affects socio-economic activities. Despite its importance, there is a noticeable gap of urban flooding research in Binh Duong, resulting in a lack of scientific basic for formulating the flood management for the 2030 and 2050 planning horizons. Moreover, research on integrating structural and nature-based solution remains limited, as current proposals predominantly focus on these approaches in isolation. This study aimed to investigate the causes, trends, and potential mitigation measures for impacts of flooding in five highly urbanized cities in Binh Duong. Statistical trend tests and hydraulic modeling method were employed in the study. The results revealed that predominant causes of urban flooding were found intensified heavy rainfall and high tides, exacerbated by climate change and rapid urban development. To tackle this issue, it necessitates a multi-faceted approach includes enhancing flood defenses along major rivers such as Sai Gon, Dong Nai and Thi Tinh, maintaining drainage capacity in smaller watercourses within cities, integrating pumping stations in areas constrained by spatial limitations, and preserving floodplains along Saigon River.

Keywords: Flooding; City; Urbanization; Heavy rainfall; High tide; Dong Nai - Sai Gon; Binh Duong.

Bài báo khoa học

Nghiên cứu ứng dụng ảnh viễn thám Sentinel-2 kết hợp hồi quy đa biến xác định diễn biến nồng độ tổng chất rắn lơ lửng sông Thị Tính, tỉnh Bình Dương

Dương Bích Tuyền¹, Đỗ Xuân Hồng², Lê Trọng Diệu Hiền^{3*}

¹ Chương trình Thạc sĩ Khoa học Môi trường, Đại học Thủ Dầu Một, 06 Trần Văn Ôn, Thành phố Thủ Dầu Một, Việt Nam; tuyenduong0965@gmail.com

² Khoa Môi trường và Tài nguyên, Đại học Nông Lâm Tp. HCM; doxuanhong@hcmuaf.edu.vn

³ Khoa tài nguyên và Môi trường, Đại học Thủ Dầu Một, 06 Trần Văn Ôn, Thành phố Thủ Dầu Một, Việt Nam; hienltd@tdmu.edu.vn

*Tác giả liên hệ: hienltd@tdmu.edu.vn; Tel.: +84-372831517

Ban biên tập nhận bài: 7/10/2024; Ngày phản biện xong: 20/11/2024; Ngày đăng bài: 25/4/2025

Tóm tắt: Ô nhiễm chất lượng nước là một vấn đề môi trường nghiêm trọng, ảnh hưởng đến hệ sinh thái, đến sức khỏe con người và đến sự phát triển nền kinh tế. Khi các chất ô nhiễm như hóa chất, kim loại nặng, chất thải hữu cơ và vi khuẩn từ các nguồn công nghiệp, nông nghiệp dẫn đến sự suy giảm chất lượng nước. Ô nhiễm nước thường được đo lường qua sự gia tăng nồng độ các thông số chất lượng nước. Nghiên cứu trích xuất chỉ số nước (AWEI, WRI, và NDWI) từ dữ liệu ảnh viễn thám Sentinel-2 kết hợp với dữ liệu đo đạc thông số TSS thực tế để xây dựng mô hình hồi quy xác định diễn biến nồng độ TSS trên phạm vi sông Thị Tính và các phụ lưu. Kết quả nghiên cứu cho thấy phương pháp nghiên cứu mang tính thực tiễn cao giúp đánh giá nhanh và hiệu quả. Kết quả dự đoán giá trị nồng độ TSS giai đoạn 2021-2024 trong nước mặt dao động trong khoảng 1,97-83,78 mg/l. Mô hình hồi quy có hệ số xác định $R^2 = 67,4\%$ và $MSE = 0,17$. Phương pháp được áp dụng trong nghiên cứu có thể được sử dụng để đánh giá chất lượng nước các khu vực khác của tỉnh Bình Dương.

Từ khóa: Hồi quy đa biến; TSS; Sông Thị Tính; Sentinel-2.

1. Mở đầu

Tổng chất rắn lơ lửng (TSS) được xem là một trong những chất gây ô nhiễm chính góp phần làm suy giảm chất lượng nước, là một trong những thông số làm tăng chi phí xử lý nước, tác động đến loài động thực vật có trong nước. Các hạt lơ lửng (SPM) ảnh hưởng trực tiếp lẫn gián tiếp đến hệ sinh thái trong môi trường nước và các hoạt động có liên quan đến con người [1]. Các phương pháp đánh giá chất lượng nước truyền thống vẫn còn tồn tại nhiều hạn chế về thiết bị, phương pháp, và quy mô nghiên cứu, đặc biệt chi phí thực hiện là một vấn đề lớn. Phương pháp truyền thống đòi hỏi số lượng mẫu lớn và thời gian thực hiện kéo dài, điều này không chỉ làm giảm độ chính xác của nghiên cứu mà có khả năng gây phát sinh chi phí [2]. So với các phương pháp truyền thống, công nghệ viễn thám có nhiều lợi thế nổi bật, chẳng hạn như khả năng thu thập lượng dữ liệu lớn, tiết kiệm chi phí và thời gian so với việc chụp ảnh từ trên không ở các khu vực rộng. Thêm vào đó, công nghệ này còn cho phép phân tích dữ liệu và theo dõi sự thay đổi của chúng theo thời gian [3]. Công nghệ viễn thám, với khả năng sử dụng dữ liệu ảnh đa phổ và đa thời gian, đem lại một công cụ hiệu quả trong việc theo dõi liên tục và toàn diện diễn biến của chất lượng nước. Những yếu tố như độ đục, *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2025**, 772, 38-50; doi:10.36335/VNJHM.2025(772).38-50 <http://tapchikttv.vn/>

độ mặn, và sự hiện diện của chất rắn lơ lửng trong nước có thể được theo dõi thường xuyên mà không bị ảnh hưởng từ các trạm quan trắc cố định [4]. Để đảm bảo việc quản lý và bảo vệ môi trường nước tại các con sông đạt hiệu quả cao, việc phát triển và áp dụng các giải pháp giúp chiết tách chỉ số chất lượng nước từ các dữ liệu ảnh viễn thám một cách nhanh chóng và chính xác là vô cùng quan trọng. Việc sử dụng công nghệ viễn thám cho phép thu thập và xử lý dữ liệu chất lượng nước từ một phạm vi rộng lớn mà không gặp phải các rào cản về thời gian và không gian như các phương pháp truyền thống. Một trong những công cụ mạnh mẽ hỗ trợ cho công tác này là Google Earth Engine, một nền tảng điện toán đám mây tiên tiến, được thiết lập đặc biệt để phục vụ các phân tích dữ liệu quy mô toàn cầu. Nền tảng này không chỉ cung cấp khả năng xử lý và phân tích khối lượng lớn dữ liệu ảnh vệ tinh, mà còn giúp người sử dụng thực hiện các nghiên cứu và theo dõi các biến động môi trường một cách hiệu quả và toàn diện, hỗ trợ quá trình ra quyết định trong việc bảo vệ tài nguyên nước. Nó cung cấp quyền truy cập vào một loạt hình ảnh vệ tinh, đặc biệt là các sản phẩm Landsat và Sentinel-2, đồng thời tạo điều kiện cho điện toán hiệu suất cao để phân tích xã hội và môi trường, bao gồm cả giám sát nước [5]. Việc Cơ quan Vũ trụ Châu Âu (ESA) ra mắt chương trình Sentinel như một phần của chương trình Copernicus là một thời điểm đột phá vì lần đầu tiên nó cung cấp quyền truy cập vào các hình ảnh có độ phân giải cao, miễn phí trên quy mô lớn. Các đặc điểm băng tần và phương pháp phản xạ quang phổ của dữ liệu Sentinel-2 rất hữu ích để phát hiện các vùng nước bề mặt [6]. Do đó, trong nghiên cứu này, Google Earth Engine đã được sử dụng để ứng dụng tiềm năng của các phương pháp tính toán chỉ số nước và chọn ra các chỉ số hoạt động tốt nhất để phát hiện nồng độ ô nhiễm bề mặt nước bằng cách sử dụng hình ảnh vệ tinh đa phổ của dữ liệu ảnh viễn thám Sentinel-2. Nghiên cứu liên quan đến sử dụng các chỉ số nhận biết nước trên nền tảng Google Earth Engine từ dữ liệu ảnh viễn thám Sentinel-2, tác giả đã tiến hành nghiên cứu sử dụng ba chỉ số NDWI, MNDWI và WNDWI để phân biệt và nhận diện các khu vực có nước và không có nước trong thành phố Sa Đéc, tỉnh Đồng Tháp. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng chỉ số WNDWI và MNDWI hiệu quả hơn chỉ số NDWI trong việc phân biệt và nhận diện các khu vực có nước và không có nước. Cụ thể, các chỉ số WNDWI và MNDWI cho ra kết quả chính xác hơn, với giá trị của các chỉ số OA (*Overall Accuracy*), KC (*Kappa Coefficient*), EC (*Error Commission*), và EO (*Error Omission*) lần lượt là 0,98, 0,85, 0,015 và 0,006, cho thấy mức độ phân biệt rõ ràng và độ chính xác cao hơn so với chỉ số NDWI [7]. Trong một nghiên cứu gần đây, tác giả đã áp dụng phương pháp hồi quy để phân tích mối tương quan giữa chỉ số vật chất lơ lửng (*Normalized Suspended Material Index - NSMI*) từ ảnh viễn thám Sentinel-2A và lượng phù sa thực đo để xây dựng sơ đồ phân bố không gian của nồng độ tổng chất rắn lơ lửng (TSS) trong nước mặt tại tỉnh An Giang. Các nhà nghiên cứu đã sử dụng ảnh vệ tinh quang học Sentinel-2A để tính toán giá trị chỉ số NSMI và xác định hàm lượng TSS trong nước mặt, với giá trị khoảng từ 0-100 mg/l. Áp dụng phương trình hồi quy tuyến tính để thể hiện mối quan hệ này, cho ra hệ số xác định $R^2 = 0,868$, cho thấy sự tương quan mạnh mẽ giữa chỉ số NSMI và hàm lượng TSS. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng việc sử dụng dữ liệu từ vệ tinh Sentinel-2A có thể hỗ trợ hiệu quả trong việc thành lập bản đồ phân bố hàm lượng ô nhiễm TSS trong nước mặt, đặc biệt là đối với năm 2019, và có độ tin cậy cao. Công nghệ viễn thám này không chỉ giúp theo dõi chất lượng nước một cách chính xác mà còn đóng góp trong việc bảo vệ tài nguyên nước và cải thiện công tác bảo vệ môi trường của cơ quan quản lý [8]. Chất lượng nước mặt sông Hồng và suối Đuống đoạn chảy qua thành phố Hà Nội cũng được nhóm tác giả xem xét bằng phương pháp tương tự. Nhóm tác giả đã lựa chọn phương pháp đánh giá dựa trên kết quả đo phổ phản xạ của mặt nước và kết quả phân tích mẫu nước để xác định các thông số chất lượng nước, bao gồm Độ đục, COD, BOD₅ và NH₄⁺. Qua nghiên cứu, nhóm tác giả nhận thấy rằng thông số Độ đục có mối liên hệ mật thiết với quang phổ phản xạ mặt nước, với hệ số xác định $R^2 = 0,663$, cho thấy sự phù hợp cao trong các mô hình hồi quy. Điều này cho thấy khả năng sử dụng phổ phản xạ để dự báo độ đục của nước một cách hiệu quả. Tuy nhiên, các thông số còn lại như COD, BOD₅ và NH₄⁺ không có mối liên hệ mật

thiết với quang phổ phản xạ mặt nước, cho thấy rằng việc sử dụng phổ phản xạ để xác định những thông số này không đạt được hiệu quả tương tự. Kết quả nghiên cứu này cung cấp một cái nhìn sâu sắc về mối quan hệ giữa các thông số chất lượng nước và đặc tính phổ phản xạ của mặt nước, góp phần vào việc cải thiện các phương pháp giám sát chất lượng nước từ xa [9].

Sông Thị Tính là một nhánh phụ của sông Sài Gòn, bắt nguồn từ huyện Bình Long, tỉnh Bình Phước, và chảy qua các khu vực như huyện Dầu Tiếng, huyện Bàu Bàng, thành phố Bến Cát, cùng một phần của thành phố Thủ Dầu Một, tỉnh Bình Dương. Con sông này chủ yếu chảy qua vùng địa hình gò đồi thấp, trước khi hợp lưu với sông Sài Gòn [10]. Trong nước cũng đã có những nghiên cứu về sông Thị Tính đa phần tập trung vào các thông số hữu cơ, điển hình là nhóm tác giả đã áp dụng mô hình MIKE 11 để tiến hành tính toán khả năng tiếp nhận và xác định mức độ phục hồi chất lượng nước của sông Thị Tính. Nghiên cứu này tập trung vào việc xem xét ảnh hưởng của các nguồn thải phân tán và nguồn thải điểm trong mùa mưa, đặc biệt là từ tháng 5 - tháng 9/2010, đối với hai chỉ tiêu nghiên cứu là BOD₅ và NH₄⁺. Các kết quả tính toán từ các kịch bản mô phỏng cho thấy rằng nếu các cơ sở xử lý đạt nước thải theo tiêu chuẩn xử lý cho phép, chất lượng nước sông sẽ có sự cải thiện rõ rệt. Tuy nhiên, bên cạnh sự cải thiện, các giá trị của một số chỉ tiêu chất lượng nước vẫn vượt quá mức quy chuẩn cho phép, điều này cho thấy rằng cần tiếp tục nỗ lực tăng cường hiệu quả của các công nghệ xử lý nước thải để đảm bảo đạt các tiêu chuẩn môi trường trong tương lai [11]. Bên cạnh đó, nhóm tác giả trong nước đã nghiên cứu và tính toán về hiện trạng chất lượng nước sông Thị Tính, đồng thời dự báo khả năng tiếp nhận chất ô nhiễm hữu cơ của con sông này đến năm 2020. Nghiên cứu được thực hiện với hai kịch bản khác nhau: một là kịch bản quản lý không tốt và một là kịch bản quản lý tốt. Kết quả của nghiên cứu cho thấy, dưới điều kiện quản lý không tốt, sông Thị Tính có dấu hiệu ô nhiễm nghiêm trọng, đặc biệt là đối với các hợp chất hữu cơ gây ô nhiễm, khả năng tiếp nhận chất ô nhiễm hữu cơ của sông đã giảm sút nghiêm trọng, đến mức không còn khả năng đáp ứng nhu cầu sử dụng nước cho sinh hoạt. Tuy nhiên, đối với mục đích sử dụng nước cho nông nghiệp, khả năng tiếp nhận chất ô nhiễm vẫn còn, mặc dù ở mức độ hạn chế, không đủ để đảm bảo nước có thể sử dụng lâu dài cho các hoạt động nông nghiệp, không tạo nên tác động tiêu cực. Kết quả này cho thấy sự cần thiết phải cải thiện công tác quản lý chất lượng nước sông Thị Tính nhằm bảo vệ và duy trì các mục đích sử dụng nước cho cộng đồng và sản xuất [12]. Một nghiên cứu khác cũng đã tiến hành đánh giá sự phân bố tải lượng ô nhiễm hữu cơ tại các tiểu vùng trong lưu vực sông Thị Tính, sử dụng phương pháp điều tra thực tế kết hợp với việc lấy mẫu nước để phân tích các chỉ tiêu ô nhiễm hữu cơ, bao gồm BOD, COD, tổng Nitơ (N) và tổng Phốt pho (P). Các mẫu được lấy tại các điểm xả thải lớn ở ba tiểu vùng 1, 2 và 3, nơi nước thải được xả vào sông Thị Tính. Từ các kết quả phân tích này, nghiên cứu đã tính toán tải lượng ô nhiễm dự báo cho đến năm 2020. Kết quả nghiên cứu cho thấy, với ba kịch bản khác nhau, các cơ quan quản lý môi trường địa phương đã nhận được một cái nhìn tổng thể và chi tiết về sự phân bố mức độ ô nhiễm cũng như các nguồn ô nhiễm chính trong từng tiểu vùng của lưu vực sông Thị Tính. Những thông tin này đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng các giải pháp quản lý, nâng cao chất lượng nước và bảo vệ môi trường sống của cộng đồng tại khu vực này [13].

Nhận thấy các nghiên cứu về thông số vô cơ tại sông Thị Tính tương đối ít, từ đó tác giả lựa chọn thông số TSS và sử dụng ảnh vệ tinh có độ phân giải không gian và thời gian kết hợp với dữ liệu quan trắc thông số TSS thực tế trên bề mặt nước, được thu thập từ các vị trí quan trắc cố định. Phương pháp này cho phép tận dụng ưu thế của ảnh vệ tinh trong việc giám sát và phân tích diễn biến chất lượng nước trong không gian rộng lớn, đồng thời kết hợp chặt chẽ với các số liệu quan trắc thực tế để nâng cao độ chính xác và độ tin cậy trong việc đánh giá mức độ ô nhiễm và các xu hướng thay đổi của thông số TSS trên sông Thị Tính. Sự kết hợp này dựa trên việc tích hợp công nghệ viễn thám và hệ thống thông tin địa lý (GIS), giúp tận dụng hết những ưu điểm của cả hai công nghệ trong việc thu thập, lưu trữ,

phân tích và xử lý dữ liệu địa lý. Từ đó, việc xây dựng, cập nhật và phân tích thông tin không gian được thực hiện một cách hiệu quả hơn, cho phép theo dõi chi tiết sự biến động của các chỉ số môi trường trong thời gian thực và trên phạm vi rộng. Điều này không chỉ hỗ trợ các nhà nghiên cứu trong việc đánh giá chất lượng môi trường mà còn cung cấp một công cụ mạnh mẽ cho quản lý môi trường. Mục tiêu của nghiên cứu là theo dõi diễn biến nồng độ TSS sông Thị Tính, tỉnh Bình Dương bằng dữ liệu viễn thám Sentinel-2 kết hợp hồi quy đa biến từ đó phân vùng mức độ ô nhiễm TSS theo các mức rất thấp, thấp, cao, rất cao giúp nhằm quản lý chất lượng nước khoanh vùng ô nhiễm TSS và có biện pháp quản lý kịp thời.

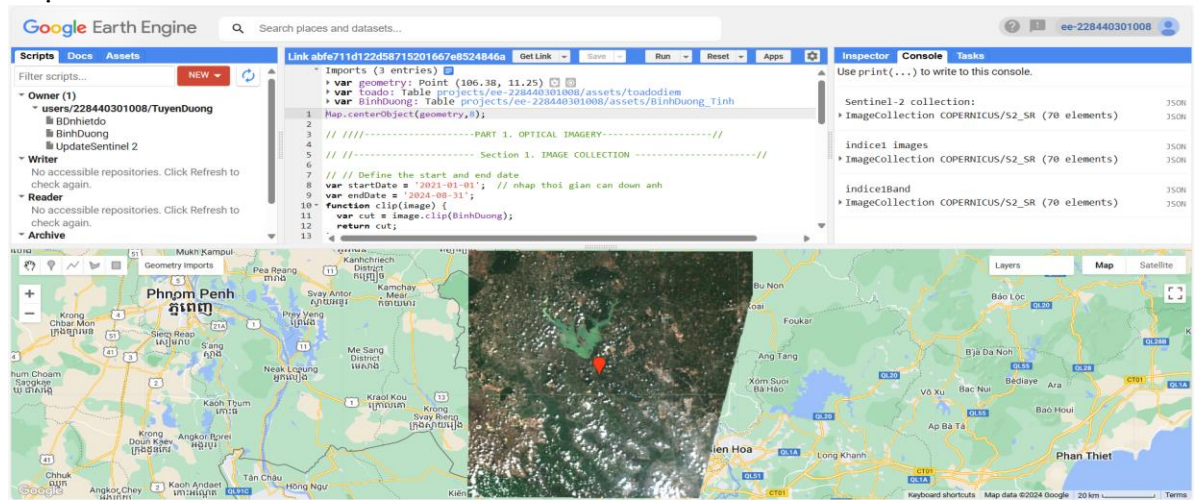
2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Dữ liệu

Thu thập ảnh viễn thám Sentinel-2 và chỉ số nước AWEI, WRI, và NDWI tính toán trực tiếp trên nền Google Earth Engine (GEE) tại website: <https://earthengine.google.com/> giai đoạn 2021-2024 với độ phân giải không gian 10m, độ che phủ mây dưới 30% (Hình 1). Thay vì chỉ tính toán trên một máy tính, GEE có thể phân phối công việc xử lý cho nhiều máy tính để giảm thời gian xử lý. Trong một số trường hợp, hình ảnh vệ tinh đã trải qua quá trình xử lý cơ bản. Điều này có nghĩa là xử lý bộ dữ liệu RS nhanh hơn, mang lại thời gian quay vòng nhanh hơn cho người dùng với chi phí thấp hơn [5].

Thu thập số liệu mẫu phân tích thông số TSS cùng thời điểm thu thập ảnh viễn thám hoặc chênh lệch không quá 5 ngày.

Thu thập bản đồ ranh giới hành chính huyện thuộc tỉnh Bình Dương và lớp bản đồ sông Thị Tính.



Hình 1. Giao diện website Google Earth Engine.

2.2. Khảo sát thực tế và phân tích chất lượng nước

Dữ liệu ban đầu bao gồm 82 mẫu phân tích nồng độ tổng chất rắn lơ lửng (TSS) có trong nước mặt, được kết hợp với dữ liệu tính toán các chỉ số nước như AWEI, NDWI, và WRI. Trong đó, nghiên cứu thực hiện thu thập 70 mẫu phân tích nồng độ TSS có trong nước mặt tại 5 vị trí thuộc Chương trình quan trắc chất lượng môi trường của tỉnh Bình Dương trong giai đoạn 2021-2024 và thực hiện lấy bổ sung 12 mẫu phân tích nồng độ TSS tại 6 vị trí vào 2 thời điểm (tháng 2 và tháng 6) năm 2024 (Bảng 1).

Bảng 1. Điểm quan trắc.

Vị trí	Ký hiệu mẫu	Tọa độ X	Tọa độ Y
Điểm thu thập			
Cầu Phú Bình	STT1	106.4922	11.2408
Cầu trên đường vành đai 4	STT2	106.5983	11.1008
Cầu Ông Cộ	STT3	106.6108	11.0383

Vị trí	Ký hiệu mẫu	Tọa độ X	Tọa độ Y
Suối Cắm Xe tại ngã 3 suối Bài Lãng và suối Cắm Xe	RTT1	106.4756	11.3233
Hộp lưu của suối Đông Sô và suối Đồi tại Cầu Quan	RTT2	106.5858	11.1542
Điểm lấy mẫu bổ sung			
Suối Hồ Muồng	NM1	106.5117	11.2642
Suối Đá Yêu	NM2	106.5109	11.3012
Suối Nhà Mát	NM3	106.5339	11.2240
Suối Bà Lãng	NM4	106.6022	11.2017
Suối Cầu Củi	NM5	106.5935	11.1581
Suối Tân Định	NM6	106.6125	11.0686

Bảng 2. Thời gian lấy mẫu.

STT	Ngày lấy mẫu	Ký hiệu mẫu				
		STT1	STT2	STT3	RTT1	RTT2
1	03/03/2021	24	20	18	25	25
2	06/05/2021	41	18	24	25	21
3	09/06/2021	97	29	36	68	29
4	05/11/2021	49	57	57	19	40
5	07/01/2022	27	9	15	14	22
6	03/03/2022	29	20	32	18	31
7	06/06/2022	5	8	8	6	7
8	05/12/2022	11	50	68	9	47
9	06/02/2023	27	134	58	7	20
10	03/11/2023	23	33	29	25	41
11	05/12/2023	28	33	33	24	26
12	29/02/2024	17	13	32	10	11
13	09/04/2024	8	15	17	6	14
14	13/06/2024	22	28	11	22	21

Mẫu nước được lấy ở giữa sông và ở bề mặt (cách 30 cm), lưu và bảo quản trong bình nhựa dung tích 1 lít. Các điểm lấy mẫu bổ sung được lựa chọn phân bố tại các nhánh phụ lưu chính của sông Thị Tịnh. Tọa độ vị trí lấy mẫu được xác định bằng thiết bị định vị toàn cầu GPS và kỹ thuật lấy mẫu được thể hiện trên Hình 2.



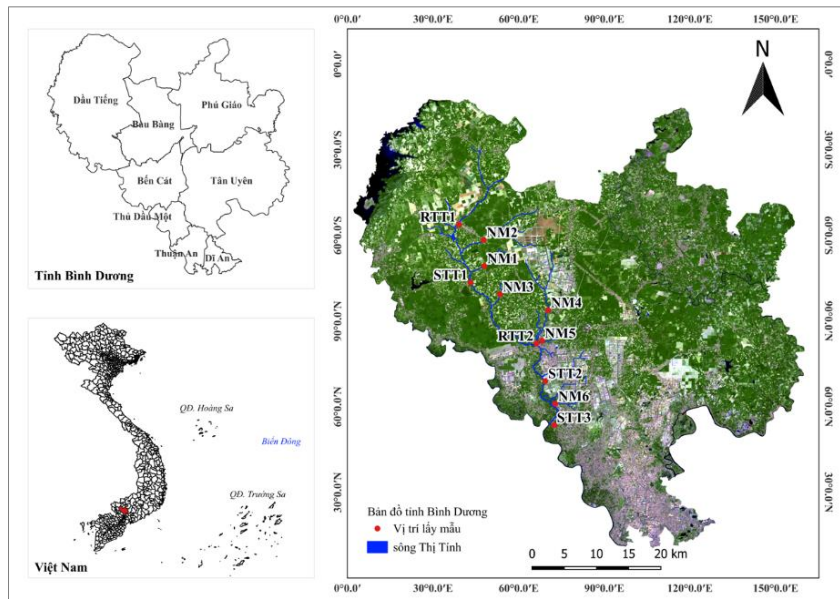
Hình 2. Minh họa thiết bị định vị toàn cầu GPS và kỹ thuật lấy mẫu.

Nghiên cứu áp dụng phương pháp phân tích theo TCVN 6625:2000 - Phương pháp phân tích khối lượng. Giá trị thông số TSS phân tích chất lượng nước trong các mẫu nước mặt có giá trị trong khoảng 4-97 mg/l. Các mẫu được chia thành hai nhóm ngẫu nhiên, 70% mẫu được dùng để tính toán và lựa chọn các chỉ số tối ưu nhất nhằm xây dựng mô hình dự đoán và 30% mẫu còn lại được sử dụng để kiểm định kết quả của mô hình dự đoán. Kết quả tích nồng độ TSS được sử dụng làm biến phụ thuộc, trong khi đó các biến độc lập là các chỉ số nước (AWEI, WRI và NDWI) được chiết tách từ dữ liệu ảnh viễn thám.

2.3. Giá trị chỉ số nước mặt từ dữ liệu ảnh viễn thám Sentinel-2

Một trong những phương pháp phổ biến trong việc chiết tách nước (*Water Indices - WIs*) là sử dụng các chỉ số toán học được tính từ các kênh hình ảnh, nhờ tính hiệu quả và tiện lợi. Dữ liệu các kênh đa phổ (Green, Red, NIR với độ phân giải không gian 10m; SWIR với độ phân giải không gian 20m) từ ảnh viễn thám Sentinel-2 [14] được lựa chọn để áp dụng nghiên

cứ. Các chỉ số nước như chỉ số khác biệt nước được chuẩn hóa (NDWI) [15] và chỉ số chiết tách nước tự động (AWEI) [16] và chỉ số tỉ lệ nước (WRI) [17] được tính toán thông qua các kênh ảnh (kênh 3), Red (kênh 4), NIR (kênh 8), SWIR1 (kênh 11) và SWIR2 (kênh 12) của Sentinel-2. Các chỉ số được thiết lập nhằm tăng cường sự khác biệt với các đối tượng nước trên ảnh quang học, bằng cách tăng sự khác biệt giữa các điểm ảnh chứa thông tin về nước và các điểm ảnh đại diện cho các đối tượng khác xung quanh, đồng thời loại bỏ các điểm ảnh không đạt.

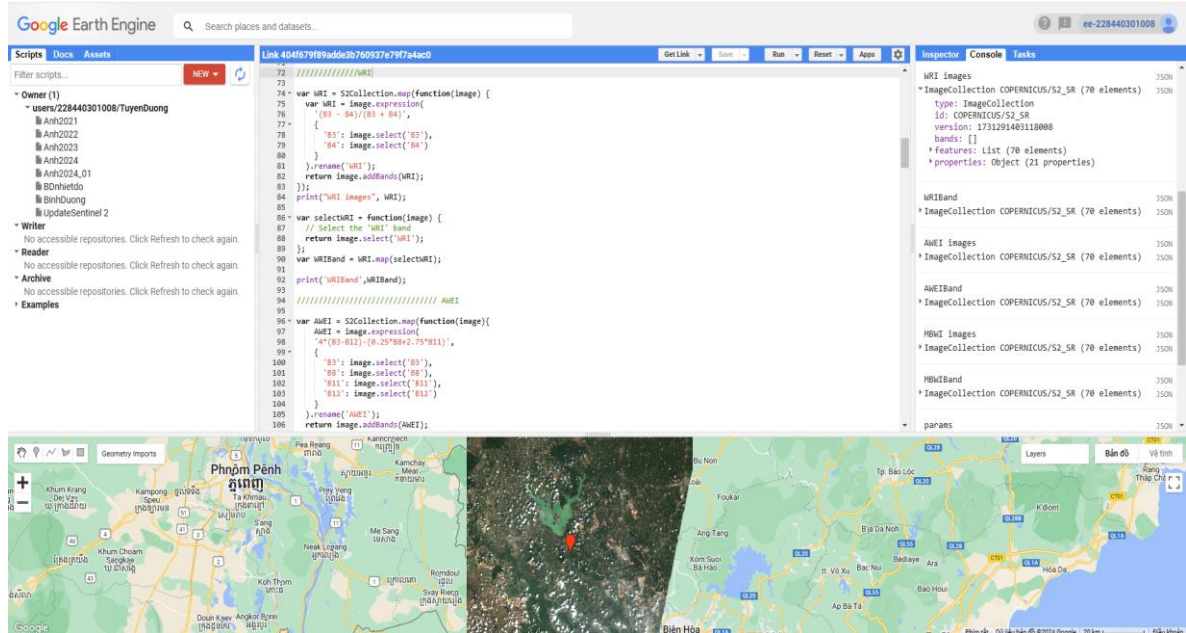


Hình 3. Vị trí lấy mẫu khu vực nghiên cứu.

Bảng 3. Chỉ số chiết tách từ dữ liệu viễn thám.

Chỉ số	Mô tả	Công thức
NDWI	Normalized Difference Water Index	$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$
WRI	Water Ratio Index	$WRI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + SWIR1}$
AWEI	Automated Water Extraction Index	$AWEI = 4 \times (GREEN - SWIR2) - (0,25 \times NIR + 2,75 \times SWIR1)$

Những chỉ số này được tính toán và trích xuất từ dữ liệu viễn thám Sentinel-2 trên nền tảng Google Earth Engine và được tải về Google Drive để dễ dàng xử lý dữ liệu và xây dựng mô hình (Hình 4).



Hình 3. Tính toán và trích xuất dữ liệu trên nền tảng Google Earth Engine.

2.4. Xây dựng mô hình quy tuyến tính

Ứng dụng mô hình hồi quy đa biến để tính toán thông số TSS thể hiện diễn biến chất lượng nước từ dữ liệu ảnh viễn thám. Nồng độ TSS được ước tính bằng cách sử dụng các biến độc lập khác nhau trong các thuật toán hồi quy đa biến. Nghiên cứu đã sử dụng 70% dữ liệu tham gia xây dựng mô hình và lựa chọn các chỉ số tối ưu nhất ước tính chất lượng nước bằng thông số TSS. Mô hình hồi quy đa biến thực hiện dựa trên các nghiên cứu đã công bố liên quan đến mô hình chất lượng nước [18–20] thực hiện phương trình (1) như sau:

$$y = \beta_0 + \beta_1(x_1) + \beta_2(x_2) + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon \quad (1)$$

Trong đó y là biến phụ thuộc; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots$ là các tham số; x_1, x_2 là các biến độc lập; ε : sai số ngẫu nhiên. Phương trình có nhiều biến x (x_1, x_2, \dots, x_k) và mỗi biến có một thông số β_p ($k = 1, 2, \dots, p$) cần phải ước tính. Vì thế mô hình còn được gọi là mô hình hồi quy tuyến tính đa biến.

2.5. Kiểm định và đánh giá độ chính xác mô hình

Từ mô hình tính toán, kết quả của các phương trình hồi quy được kiểm định, đánh giá bằng cách sử dụng 30% dữ liệu còn lại để đối chiếu và lựa chọn mô hình tối ưu nhất. Phương trình tối ưu nhất được chọn dựa trên giá trị hệ số tương quan R^2 lớn nhất và sai số bình phương trung bình MSE giữa các giá trị được dự đoán và thực tế nhỏ nhất gần bằng 0. Tính toán giá trị hệ số tương quan R^2 để đánh giá mức độ tin cậy, nghiên cứu sử dụng công thức (2) như sau:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} \right]^2 \quad (2)$$

Trong đó x_i là giá trị thực đo; \bar{x}_i là giá trị thực đo trung bình; y_i là giá trị dự đoán; \bar{y}_i là giá trị dự đoán trung bình; n là số lượng giá trị tính toán.

Giá trị hệ số tương quan R^2 nằm trong khoảng từ 0-1, thể hiện mối tương quan giữa giá trị thực đo và giá trị dự đoán. Trường hợp R^2 gần bằng 0, thì kết quả có độ tin cậy kém. Ngược lại, nếu những giá trị này bằng 1, thì kết quả mô phỏng của mô hình là tối ưu nhất.

Sự khác nhau giữa giá trị đo đạc và giá trị dự báo được gọi là sai số. Khi sai số càng nhỏ thì độ chính xác sẽ càng cao. Kiểm định mô hình bằng sai số bình phương trung bình MSE, sai số càng thấp thì mô hình dự đoán càng tốt, nghiên cứu sử dụng công thức (3) như sau:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3)$$

Trong đó \hat{y}_i là giá trị thực đo; y_i là biến dự đoán; n là biểu thị tổng giá trị.

3. Phân tích kết quả và thảo luận

3.1. Xây dựng mô hình hồi quy tương quan sử dụng nồng độ TSS và các chỉ số nước tính toán từ dữ liệu ảnh viễn thám Sentinel-2

Tiến hành xử lý dữ liệu đầu vào, thực hiện các bước kiểm tra phân phối chuẩn (histogram) và loại bỏ các giá trị ngoại lai (outliers) để đảm bảo chất lượng dữ liệu đầu vào. Những mẫu không đạt yêu cầu hoặc có khả năng gây sai lệch trong kết quả mô hình hồi quy được loại bỏ, sau cùng tổng số mẫu cuối cùng còn lại là 76 mẫu, đáp ứng tiêu chuẩn để đưa vào tính toán và kiểm định.

Thực hiện chia bộ dữ liệu ngẫu nhiên, nghiên cứu sử dụng 63 mẫu hiện trường kết hợp với dữ liệu tính toán các chỉ số nước (AWEI, NDWI, WRI) chiết tách từ ảnh Sentinel-2 để xây dựng mô hình hồi quy tuyến tính, tính toán mối quan hệ thống kê giữa nồng độ TSS trong nước mặt sông Thị Tính với 3 chỉ số nước.

Thực hiện kiểm tra mối tương quan giữa các biến độc lập, phân tích tương quan thực hiện trong phần mềm SPSS 20, kết quả thể hiện trong Bảng 4.

Bảng 4. Kết quả tương quan các biến độc lập.

		AWEI	NDWI	lnWRI
AWEI	Tương quan	1	-0,515	-0,274
	Mức ý nghĩa (2 đầu)		0,0	0,030
	Cỡ mẫu	63	63	63
NDWI	Tương quan	-0,515	1	0,55
	Mức ý nghĩa (2 đầu)	0,0		0,0
	Cỡ mẫu	63	63	63
lnWRI	Tương quan	-0,274	0,550	1
	Mức ý nghĩa (2 đầu)	0,030	0,0	
	Cỡ mẫu	63	63	63

Kết quả đầu ra phân tích về mối tương quan giữa các chỉ số nước < 0,6 và hệ số tương quan rất có ý nghĩa vì giá trị p-value là 0.00 và nhỏ hơn mức ý nghĩa ($\alpha = 5\%$). Kết quả mô hình và phân tích các giá trị hồi quy tuyến tính được trình bày ở Bảng 5 và 6.

Bảng 5. Tóm tắt mô hình hồi quy.

Mô hình	Hệ số R	Hệ số R bình phương	Hệ số R bình phương hiệu chỉnh	Sai số chuẩn của ước lượng	Trị số Durbin-Waston
1	0,821	0,675	0,685	0,434	1,015

Bảng 6. Mô hình quy tuyến tính thể hiện mối tương quan giữa các chỉ số nước và nồng độ TSS.

Mô hình với biến phụ thuộc là lnTSS						
Mô hình	Hệ số chưa chuẩn hóa		Hệ số đã chuẩn hóa		Kiểm định t	Mức ý nghĩa
	Hệ số B	Sai số chuẩn	Hệ số Beta			
Hằng số	2,962	0,055			54,012	0,00
AWEI	0,258	0,064	0,347		4,007	0,00
NDWI	-0,547	0,077	-0,708		-7,096	0,00
lnWRI	0,222	0,066	0,299		3,358	0,001

Như vậy, phương trình hồi quy để tính toán nồng độ TSS từ dữ liệu ảnh viễn thám được tính theo công thức như sau:

$$\ln TSS = 2,962 + 0,258 \times AWEI - 0,547 \times NDWI + 0,222 \times \ln WRI \quad (4)$$

Mô hình có hệ số xác định $R^2 = 0,675$, từ phương trình hồi quy tuyến tính được xây dựng có thể dự đoán giá trị của biến TSS (biến phụ thuộc) dựa trên giá trị của biến AWEI, NDWI, WRI (biến độc lập) cho thấy các biến độc lập phản ánh được 67% giá trị biến động nồng độ TSS.

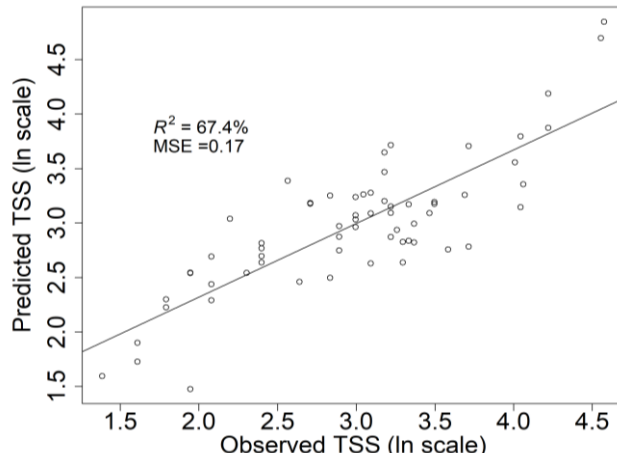
3.2. Đánh giá mức độ chính xác của mô hình

Kết quả của mô hình hồi quy tuyến tính được đánh giá độ tin cậy bằng hệ số MSE cho thấy mối tương quan giữa nồng độ TSS thực đo và dữ liệu TSS dự đoán. Mô hình hồi quy đáp ứng với hệ số xác định (R^2) và sai số bình phương trung bình (MSE). Kết quả cho thấy kiểm định mô hình có mức độ chính xác với tương quan thuận 0,17, hệ số xác định $R^2 = 67,4\%$ giá trị biến động (Hình 5).

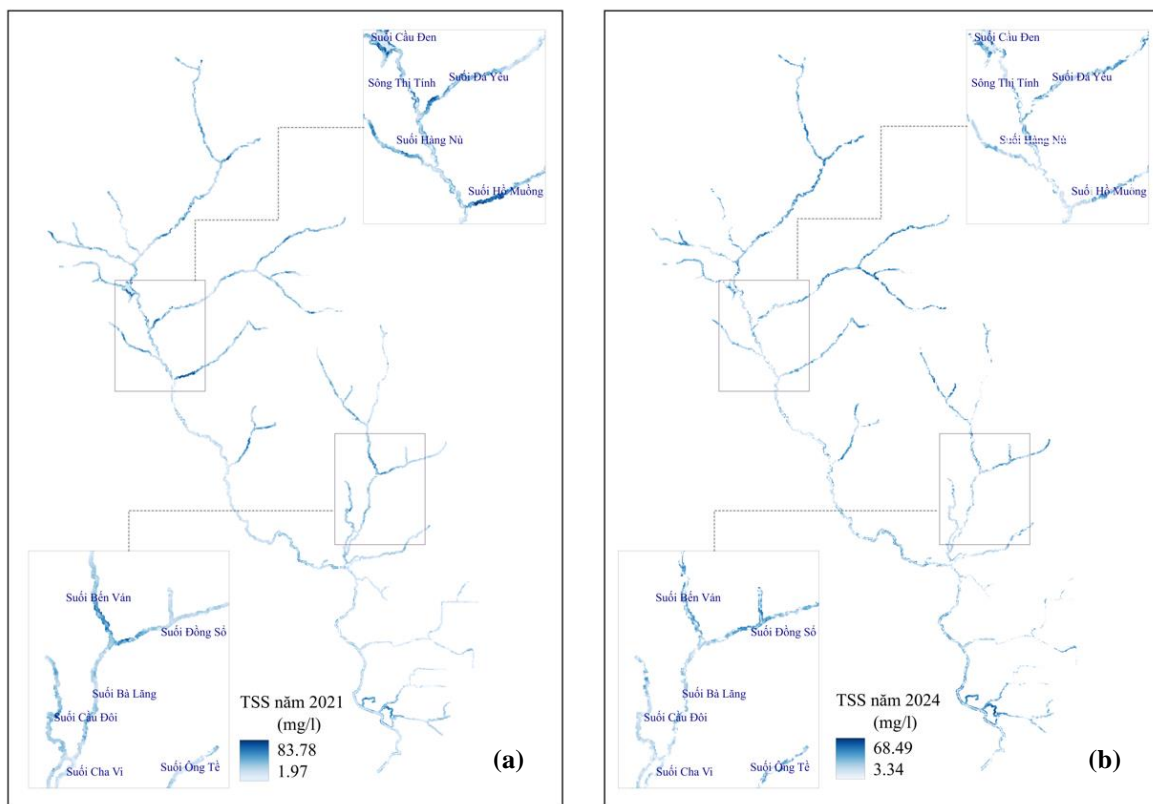
3.3. Phân bố không gian nồng độ TSS

Nồng độ TSS phân bố trong nước mặt sông Thị Tính, tỉnh Bình Dương giai đoạn 2021-2024 được trình bày trong Hình 6. Nồng độ TSS được tính toán từ dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-2 theo công thức (4).

Sự phân bố không gian nồng độ TSS tương đối cao ở điểm hợp lưu suối đổ vào sông Thị Tính như suối Đá Yêu, suối Hồ Muồng, nồng độ năm 2021 dao động trong khoảng 1,9-83,7 mg/l (Hình 6a) và sự phân bố không gian nồng độ TSS cải thiện đáng kể khi nồng độ năm 2024 dao động trong khoảng 3,3-68,4 mg/l (Hình 6b).



Hình 4. Kết quả kiểm định mô hình hồi quy tuyến tính.



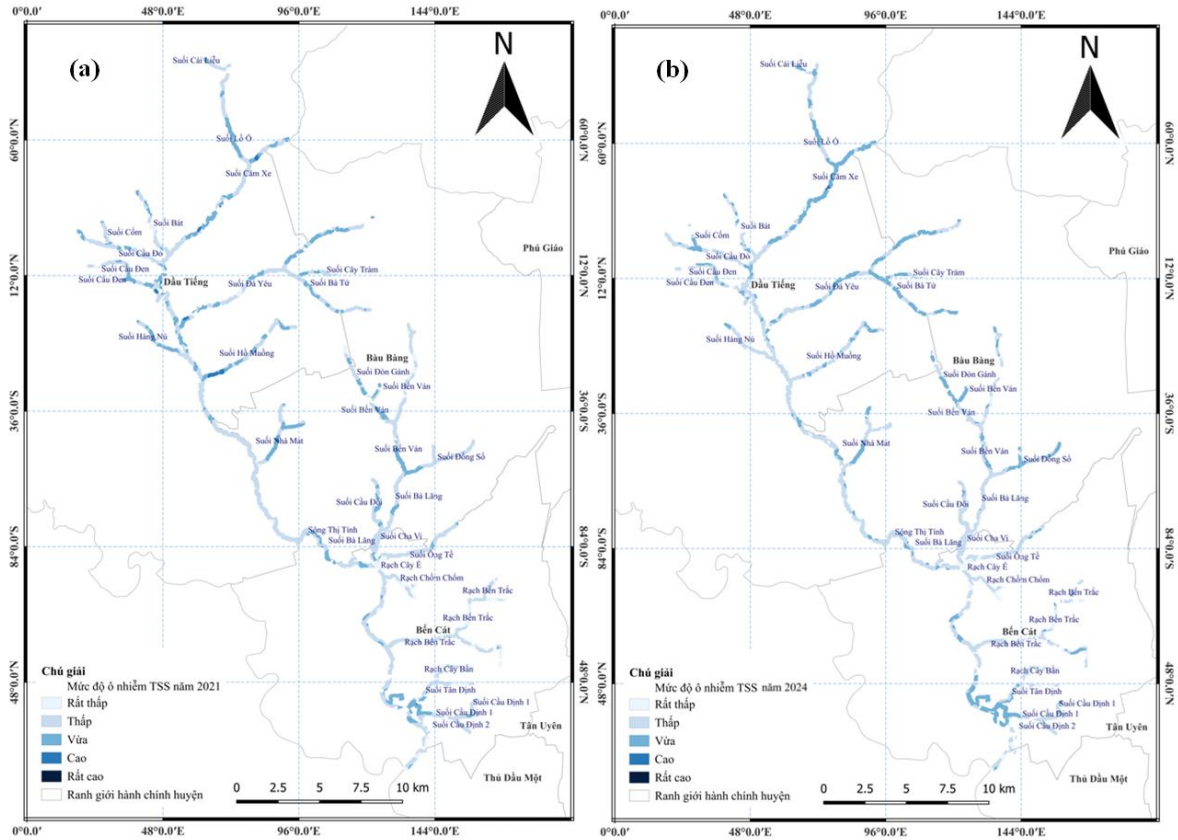
Hình 5. Phân bố nồng độ TSS năm 2021 (a) và năm 2024 (b).

3.4. Bản đồ phân bố không gian mức độ ô nhiễm TSS sông Thị Tính, tỉnh Bình Dương

Thông số TSS dùng để đánh giá sự thay đổi trong chất lượng nước sông Thị Tính được dự đoán từ mô hình, bản đồ phân bố nồng độ ô nhiễm nước mặt được xác định cụ thể. Kết quả thể hiện trong Hình 7 thể hiện sự phân bố theo không gian của nồng độ TSS sông Thị Tính, tỉnh Bình Dương. Mức độ ô nhiễm TSS tham khảo từ nghiên cứu [21] được phân thành 5 mức độ: (i) Ô nhiễm rất thấp, (ii) Ô nhiễm thấp, (iii) Ô nhiễm vừa, (iv) Ô nhiễm cao; (v) Ô nhiễm rất cao.

Bảng 7. Mức độ ô nhiễm khu vực nghiên cứu.

Rất thấp	Thấp	Vừa	Cao	Rất cao
< 11,3	11,3 – 34,2	34,2 – 63,9	63,9 – 104,3	>104,3



Hình 6. Bản đồ phân bố không gian mức độ ô nhiễm TSS giai đoạn 2021-2024.

Từ bản đồ phân bố không gian mức độ ô nhiễm TSS cho thấy, ô nhiễm khu vực nghiên cứu năm 2021 tập trung chủ yếu tại các điểm hợp lưu khu vực thượng nguồn sông Thị Tính. Tại khu vực suối Hồ Muồng, suối Đá Yêu đổ vào sông Thị Tính có nồng độ TSS ô nhiễm từ vừa đến cao. Việc xả nước thải từ hoạt động nuôi chăn nuôi gia súc, gia cầm là các tác nhân chủ yếu dẫn đến ô nhiễm nước ở các khu vực này. Ngoài ra, khu vực hợp lưu suối Bến Ván và suối Đồng Sở chảy ra suối Bà Lăng nồng độ ô nhiễm ở mức vừa do ảnh hưởng từ hoạt động công nghiệp, tại đây tập trung nhiều doanh nghiệp sản xuất quy mô lớn và suối Bến Ván là nguồn tiếp nhận nước thải cho một số doanh nghiệp sản xuất mủ cao su và KCN Bầu Bàng (Hình 7a). Đến năm 2024, các suối này đều có chất lượng nước được cải thiện khi nồng độ TSS ô nhiễm giảm từ mức cao về vừa và từ vừa về thấp. Tuy nhiên, tại khu vực đầu nguồn suối Đá Yêu và suối Bà Tứ khu vực tiếp nhận nước thải KCN Bầu Bàng mở rộng, nồng độ TSS ô nhiễm có mật độ tăng khi KCN Bầu Bàng mở rộng sau khi thành lập đã dần hoạt động ổn định. Khu vực hạ nguồn sông Thị Tính tại các suối Tân Định, suối Cầu Định nơi tiếp nhận nước thải các khu vực có mật độ đô thị cao, đồng thời là nguồn tiếp nhận cho một số doanh nghiệp sản xuất giấy quy mô lớn và khu du lịch có mật độ ô nhiễm tăng dần (Hình 7b). Kết quả mô hình cho thấy sông Thị Tính từ thượng nguồn chảy về hạ nguồn tăng dần nguy cơ ô nhiễm khi phải tiếp nhận nguồn nước thải từ hoạt động chăn nuôi, công nghiệp và đô thị, du lịch gây ảnh hưởng trực tiếp đến môi trường nước dẫn đến tác động tiêu cực cho đời sống người dân và tiềm ẩn những hậu quả lâu dài đến tương lai.

3.5. Thảo luận

Nghiên cứu cho thấy được kết quả dự đoán phân bố không gian diễn biến nồng độ TSS ô nhiễm trên sông Thị Tính bằng phương pháp sử dụng dữ liệu ảnh viễn thám Sentinel-2 kết hợp với dữ liệu phân tích thực tế thể hiện nhanh chóng và hiệu quả. Mô hình sẽ cải thiện và hiệu quả hơn nữa nếu mẫu phân tích thực tế được lấy cùng ngày với dữ liệu ảnh viễn thám, tuy nhiên nếu so sánh kết quả mô hình hồi quy có hệ số tương quan $R^2 = 0,675$ với kết quả

nghiên cứu đã được công bố tại [9] hệ số tương quan $R^2 = 0,663$ thì kết quả này có thể chấp nhận được. Bên cạnh đó, kết quả kiểm định mô hình khi hệ số xác định $R^2 = 67,4\%$ và $MSE = 0,17$ cho thấy nghiên cứu đã khai thác khả năng dự đoán vượt trội của phương pháp này. Một nghiên cứu tương tự trong đó tác giả chứng minh sự phù hợp mạnh mẽ giữa các giá trị dự đoán với giá trị đo đạc thực tế khi hệ số xác định $R^2 = 87\%$ [22].

4. Kết luận

Nghiên cứu từ việc sử dụng công nghệ viễn thám trong đánh giá diễn biến chất lượng nước mặt sông Thị Tính, tỉnh Bình Dương cho thấy kết quả tích cực. Lựa chọn kết quả đo đạc thực tế thông số TSS kết hợp với chỉ số nước chiết tách từ dữ liệu ảnh viễn thám Sentinel-2 là những tiêu chí đầu vào dùng để xây dựng mô hình hồi quy tuyến tính xác định nồng độ TSS trên phạm vi rộng một cách hiệu quả. Giá trị nồng độ TSS giai đoạn 2021-2024 trong nước mặt dao động trong khoảng 1,97-83,78 mg/l từ kết quả dự đoán của mô hình quy tuyến tính với hệ số xác định $R^2 = 0,675$. Kết quả thể hiện trên bản đồ cho thấy, giai đoạn 2021-2024 tại điểm hợp lưu suối Đá Yêu với sông Thị Tính và điểm hợp lưu suối Hồ Muồng với Thị Tính có nồng độ TSS ô nhiễm giảm đáng kể. Tại khu vực hạ lưu sông Thị Tính nồng độ ô nhiễm TSS có xu hướng tăng lên, sự phân bố nồng độ TSS cao ở một số phụ lưu chịu sự ảnh hưởng của hoạt động công nghiệp, nông nghiệp và đô thị.

Bên cạnh kết quả đạt được, nghiên cứu cũng có mặt hạn chế nhất định, hệ số xác định R^2 tuy ở mức chấp nhận được nhưng độ chính xác vẫn chưa cao. Sự phân bố nồng độ TSS chịu sự ảnh hưởng lớn từ các hoạt động công nghiệp, nông nghiệp và đô thị nhưng nghiên cứu chưa thể định lượng chính xác mức độ tác động của từng loại hình hoạt động và từng nguyên nhân cụ thể.

Nghiên cứu cũng có thể nhân rộng quy mô khi bổ sung thêm các mẫu thực tế để cải thiện độ chính xác của mô hình hồi quy và tăng hệ số xác định R^2 . Đồng thời, mở rộng nghiên cứu đến các sông lớn khác như sông Sài Gòn, sông Đồng Nai trên địa bàn tỉnh Bình Dương để tạo nên bức tranh toàn diện về chất lượng nước mặt của tỉnh.

Đóng góp tác giả: Đóng góp vào việc thu thập dữ liệu, trích xuất dữ liệu, phân tích dữ liệu, soạn thảo bài báo: D.B.T.; Kiểm định mô hình, giải thích dữ liệu, chỉnh sửa bản thảo: L.T.D.H.; Chỉnh sửa bài báo, giải trình số liệu: D.X.H.

Lời cảm ơn: Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Trung tâm Quan trắc - Kỹ thuật Tài nguyên và Môi trường tỉnh Bình Dương đã cấp cung cấp dữ liệu đo đạc thông số TSS phục vụ cho nghiên cứu này. Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số: 105.06-2021.17.

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. Gernez, P. Toward Sentinel-2 high resolution remote sensing of suspended particulate matter in very turbid waters: SPOT4 (Take5) experiment in the Loire and Gironde estuaries. *Remote Sens.* **2015**, 7(8), 9507–9528. doi: 10.3390/rs70809507.
2. Graveline, N.; Maton, L.; Rinaudo, J.D.; Lückge, H.; Interwies, E.; Rouillard, J.; Strosser, P.; Palkaniete, K.; Taverne, D. An operational perspective on potential uses and constraints of emerging tools for monitoring water quality. *TrAC Trends Anal. Chem.* **2010**, 29(5), 378–384. doi: 10.1016/j.trac.2010.02.006.
3. Stacy, L.; Marvin, E. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetl. Ecol. Manag.* **2002**, 10, 381–402.
4. Vũ, N.N.; Trung, LV.; Vân T.T. Đánh giá xâm nhập mặn vùng cửa sông từ dữ liệu viễn thám kết hợp quan trắc mặt đất. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi* **2018**,

- 2(2), 50–56.
5. Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; lyushchenko, S.; Thau, I.D.; Moore, R. Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* **2017**, *202*, 18–27. doi: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
 6. Jiang, W. An effective water body extraction method with new water index for Sentinel-2 imagery. *Water* **2021**, *13*(12), 1647. doi: 10.3390/w13121647.
 7. Chiến P. V. Nghiên cứu các chỉ số nhận biết nước từ ảnh Sentinel-2 trên nền Google Earth Engine: Áp dụng cho thành phố Sa Đéc, tỉnh Đồng Tháp. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi* **2020**, *60*, 1–8.
 8. Điệp, N.T.H.; Nam, T.S.; Tiễn, P.D.; Linh, T.B.; Hồ, N.; Giám, T.T.; Nhung, Đ.T.C. Phân bố hàm lượng chất rắn lơ lửng (TSS) tỉnh An Giang sử dụng ảnh viễn thám sentinel 2A. *Can Tho Univ. J. Sci.* **2021**, *57*(1), 1–7. doi: 10.22144/ctu.jvn.2021.001.
 9. Thắng, Đ.L.; Hiền, Đ.T.T.; Thức, C.V.; Hùng, T.L.; Nga, N.T.T. Xây dựng quy trình xác định một số thông số chất lượng nước từ ảnh viễn thám quang học Sentinel 2 và số liệu quan trắc. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và bản đồ* **2022**, *53*, 57–64. doi: 10.54491/jgac.2022.53.656.
 10. Tiên, C.T.T.; Sỹ, P.C. Đánh giá hiện trạng và dự báo tải lượng các nguồn thải đổ vào sông Thị Tịch. *Tài nguyên và môi trường* **2012**, 46–47.
 11. Thắng, L.V.; Tân, L.M.; Quân, N.H.; Triết, L.M. Mô hình toán tích hợp các nguồn thải điểm và nguồn phân tán cho lưu vực sông Thị Tịch, phục vụ công tác đánh giá khả năng tiếp nhận và phục hồi chất lượng nước. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2012**, *620*, 21–26.
 12. Sỹ, P.C.; Tiên, C.T.T. Tính toán hiện trạng và dự báo khả năng tiếp nhận chất ô nhiễm hữu cơ trên sông Thị Tịch. *Tài nguyên và Môi trường* **2013**, 19–22.
 13. Tiên, C.T.T.; Hà, L.T.Q.; Sỹ, P.C. Đánh giá phân bố tải lượng ô nhiễm hữu cơ theo các tiêu vùng thuộc lưu vực sông Thị Tịch. *Tạp chí Đại học Thủ Dầu Một* **2014**, *1*, 59–66.
 14. Đỗ, T.N.; Nguyễn, T.D.M.; Trần, Q.T.; Nghiêm, V.T.; Phạm, V.M. Định lượng ô nhiễm nước mặt tại thành phố Hội An dựa trên dữ liệu viễn thám và mô hình học máy. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ* **2022**, (52), 54–64. doi: 10.54491/jgac.2022.52.598.
 15. McFeeters, S. Using the normalized difference water index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: A practical approach. *Remote Sens.* **2013**, *5*(7), 3544–3561. doi: 10.3390/rs5073544.
 16. Feyisa, G.L.; Meilby, H.; Fensholt, R.; Proud, S.R. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *140*, 23–35. doi: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
 17. Fang-fang, Z.; Bing, Z.; Jun-sheng, L.; Qian, S.; Yuanfeng, W.; Yang, S. Comparative analysis of automatic water identification method based on multispectral remote sensing. *Procedia Environ. Sci.* **2011**, *11*, 1482–1487. doi: 10.1016/j.proenv.2011.12.223.
 18. Schneider, A.; Hommel, G.; Blettner, M. Linear regression analysis. *Dtsch. Arztebl. Int.* **2010**, *107*(44), 776–782. doi: 10.3238/arztebl.2010.0776.
 19. Japitana, M.V.; Burce, M.E.C. A Satellite-based remote sensing technique for surface water quality estimation. *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.* **2019**, *9*(2), 3965–3970. doi: 10.48084/etasr.2664.
 20. Al-Mukhtar, M.; Al-Yaseen, F. Modeling water quality parameters using data-driven models, a case study Abu-Ziriq Marsh in South of Iraq. *Hydrology* **2019**, *6*(1), 24. doi: 10.3390/hydrology6010024.
 21. Đỗ, T.N.; Nguyễn, N.T.D.; Nguyễn, T.H.; Bùi, Q.T.; Lư, T.P.M.; Phạm, V. M. Ứng dụng định lượng rủi ro ô nhiễm nước mặt dựa trên dữ liệu viễn thám quang học và

phương pháp phân tích đa tiêu chí. *Tap chí khoa học Trường Đại học Sư phạm TPHCM* **2019**, 15(3), 2283–2296. doi:10.54607/hcmue.js.15.3.145(2018).

22. Thao, N.T.P.; Ha, N.T.T.; Vinh, P.Q.; Hien, T.T.; Thanh, D.X. A multivariate linear regression model for estimating chlorophyll-a concentration in Quan Son Reservoir (Hanoi, Vietnam) using Sentinel-2A Imagery. *VN J. Earth Sci.* **2024**, 360–380.

Application of Sentinel-2 Remote Sensing Imagery Combined with Multivariate Regression to Determine the Dynamics of Total Suspended Solids Concentration in Thi Tinh River, Binh Duong Province

Duong Bich Tuyen¹, Do Xuan Hong², Le Trong Dieu Hien^{3*}

¹ Master's Program in Environmental Science, Thu Dau Mot University, 06 Tran Van On Street, Thu Dau Mot City, Binh Duong Province, Vietnam; tuyenduong0965@gmail.com

² Department of Environment and Natural Resources, Nong Lam University, Ho Chi Minh City; doxuanhong@hcmuaf.edu.vn

³ Faculty of Natural Resources and Environment, Thu Dau Mot University, 06 Tran Van On Street, Thu Dau Mot City, Binh Duong Province, Vietnam; hienltd@tdmu.edu.vn

Abstract: Water quality pollution is a serious environmental issue that affects ecosystems, human health, and economic development. When pollutants such as chemicals, heavy metals, organic waste, and bacteria from industrial and agricultural sources lead to the degradation of water quality, it often results in measurable increases in concentrations of water quality indicators. In this study, we extracted water indices (AWEI, WRI, and NDWI) from Sentinel-2 satellite remote sensing data, combined with actual measured TSS parameters, to develop a regression model that identifies TSS concentration trends across the Thi Tinh River and its tributaries. The research results show that the method is highly practical, enabling quick and effective evaluation. Predicted TSS concentrations for the 2021-2024 period in surface water range from 1.97 to 83.78 mg/l. The regression model achieved an R^2 value of 67.4% and an MSE of 0.17. The method applied in this research can be utilized to assess water quality in other areas within Binh Duong Province.

Keywords: Multivariate regression; TSS; Thi Tinh River; Sentinel-2.

Bài báo khoa học

Ứng dụng Google Earth Engine trong phát triển hệ thống giám sát biến động lớp phủ rừng Việt Nam

Vũ Xuân Định^{1*}

¹ Bộ môn Trắc địa bản đồ và GIS, Viện Quản lý đất đai và PTNT, Trường Đại học Lâm nghiệp; dinh.vuxuan@gmail.com

*Tác giả liên hệ: dinh.vuxuan@gmail.com; Tel.: +84-989640422

Ban Biên tập nhận bài: 10/10/2024; Ngày phản biện xong: 27/11/2024; Ngày đăng bài: 25/4/2025

Tóm tắt: Nghiên cứu này tập trung phát triển một hệ thống tự động giám sát diễn biến lớp phủ rừng tại Việt Nam thông qua nền tảng Google Earth Engine (GEE) và các chỉ số thực vật thông dụng. Trước bối cảnh mất rừng và biến đổi khí hậu đang gia tăng, hệ thống này cung cấp giải pháp nhanh chóng, chính xác, và hiệu quả về chi phí trong việc theo dõi biến động rừng mà không đòi hỏi đầu tư lớn vào cơ sở hạ tầng. Các chỉ số NDVI, EVI, SAVI, NDWI, NBRI, GCI, và BSI được áp dụng để đánh giá sức khỏe và mức độ che phủ của rừng. Nghiên cứu nhấn mạnh vai trò quan trọng của công nghệ viễn thám trong giám sát biến động lớp phủ rừng, tận dụng dữ liệu vệ tinh để phân tích các biến động về diện tích và tình trạng sức khỏe hệ sinh thái. Nền tảng GEE, với khả năng xử lý quy mô lớn, cho phép phân tích diện rộng và phát hiện sớm các hiện tượng như phá rừng, cháy rừng, hoặc suy thoái rừng. Hệ thống này đóng vai trò hỗ trợ quan trọng trong việc ra quyết định quản lý và bảo tồn rừng bền vững, đồng thời tự động hóa quy trình theo dõi, góp phần nâng cao hiệu quả quản lý tài nguyên và bảo vệ đa dạng sinh học.

Từ khóa: Google Earth Engine; Công nghệ viễn thám; Chỉ số thực vật; Giám sát tài nguyên thiên nhiên; Phân loại thảm thực vật; Việt Nam.

1. Đặt vấn đề

Việt Nam, với diện tích rừng phong phú và đa dạng sinh học cao, đóng vai trò quan trọng trong việc duy trì cân bằng sinh thái, bảo tồn đa dạng sinh học, và giảm thiểu tác động của biến đổi khí hậu [1]. Tuy nhiên, rừng Việt Nam đang phải đối mặt với tình trạng suy giảm diện tích rừng nghiêm trọng. Theo số liệu của Tổng cục Lâm nghiệp, diện tích rừng tự nhiên của Việt Nam đã giảm từ khoảng 14,3 triệu ha năm 1943 xuống chỉ còn khoảng 10,3 triệu ha vào năm 2020 [2]. Tỷ lệ che phủ rừng, mặc dù có tăng nhẹ, nhưng chất lượng rừng lại suy giảm đáng kể do nạn phá rừng, khai thác gỗ trái phép, và chuyển đổi đất rừng sang mục đích sử dụng khác [3]. Mỗi năm, Việt Nam mất đi hàng nghìn hecta rừng, đặc biệt là ở các vùng Tây Nguyên và miền Trung. Sự suy giảm diện tích rừng không chỉ làm mất đi nguồn tài nguyên thiên nhiên quý giá mà còn gây ra những hệ lụy nghiêm trọng về môi trường, như lũ lụt, sạt lở đất, suy thoái đất, và thay đổi khí hậu [4]. Hệ sinh thái rừng đang dần mất đi tính đa dạng sinh học, ảnh hưởng trực tiếp đến sự sống của nhiều loài động thực vật quý hiếm.

Công nghệ viễn thám đóng vai trò quan trọng trong việc theo dõi hiện trạng rừng, đặc biệt trong bối cảnh suy thoái rừng và biến đổi khí hậu đang ngày càng gia tăng [5]. Viễn thám sử dụng hình ảnh vệ tinh và dữ liệu từ xa để thu thập thông tin liên tục về các khu vực rừng rộng lớn, từ đó giúp phát hiện những thay đổi trong diện tích rừng, mật độ che phủ, và sức khỏe của hệ sinh thái. Công nghệ này cho phép quan sát diễn biến rừng trên quy mô lớn, với

độ chính xác cao và thời gian cập nhật nhanh, vượt trội hơn so với các phương pháp truyền thống dựa trên khảo sát thực địa, vốn tốn kém về thời gian và nguồn lực. Tại Việt Nam, viễn thám đã được ứng dụng trong việc xác định và giám sát các điểm nóng về phá rừng, khai thác gỗ trái phép và cháy rừng. Nhờ khả năng cung cấp dữ liệu theo chu kỳ (hàng ngày, hàng tháng), các nhà quản lý có thể theo dõi kịp thời những thay đổi nhỏ trong hệ thống rừng, từ đó đưa ra các biện pháp can thiệp sớm, giảm thiểu tổn thất, cũng như giúp tổ chức lập kế hoạch bảo vệ và phục hồi rừng một cách hiệu quả.

Google Earth Engine (GEE) là một nền tảng điện toán đám mây mạnh mẽ được thiết kế để phân tích và xử lý dữ liệu viễn thám trên quy mô toàn cầu [6]. GEE cung cấp khả năng truy cập miễn phí vào kho dữ liệu hình ảnh vệ tinh khổng lồ, bao gồm dữ liệu từ các vệ tinh như Landsat, MODIS, Sentinel, giúp các nhà khoa học, nhà quản lý, và các tổ chức có thể phân tích và theo dõi diễn biến của các khu vực rừng trên toàn thế giới một cách nhanh chóng và chính xác. Với GEE, các nhà nghiên cứu có thể xử lý lượng lớn dữ liệu viễn thám mà không cần cơ sở hạ tầng phần cứng phức tạp. Nhờ khả năng tính toán mạnh mẽ của nền tảng này, các mô hình phân tích diễn biến rừng, bao gồm cả thay đổi diện tích, mức độ che phủ và sức khỏe của rừng, có thể được xây dựng và cập nhật liên tục. Các công cụ này giúp phát hiện nhanh các sự kiện như phá rừng, cháy rừng, hay suy giảm rừng do biến đổi khí hậu, cung cấp thông tin kịp thời để có các biện pháp can thiệp sớm. Trên quy mô toàn cầu, GEE đã được sử dụng để theo dõi nạn phá rừng ở rừng mưa Amazon, cháy rừng ở Australia, và các khu vực bị ảnh hưởng bởi biến đổi khí hậu. Việc ứng dụng Google Earth Engine trong phân tích tư liệu viễn thám không chỉ giúp theo dõi hiện trạng rừng mà còn hỗ trợ lập kế hoạch bảo vệ và khôi phục rừng bền vững, góp phần bảo vệ đa dạng sinh học và chống biến đổi khí hậu trên toàn cầu. Trong theo dõi rừng tại Việt Nam, GEE đã được sử dụng để phân tích sự thay đổi diện tích rừng tại các vùng nhạy cảm như Tây Nguyên và dải đất miền Trung, nơi nạn phá rừng và chuyển đổi mục đích sử dụng đất đang diễn ra phức tạp [7]. Bằng cách sử dụng dữ liệu hình ảnh vệ tinh kết hợp với các thuật toán phân tích trên GEE, có thể xác định các khu vực bị xâm hại và đưa ra các báo cáo nhanh chóng, hỗ trợ việc ra quyết định cho chính phủ và các tổ chức bảo tồn.

Việc xây dựng một hệ thống giám sát biến động lớp phủ rừng tự động dựa trên nền tảng Google Earth Engine (GEE) là vô cùng cần thiết trong bối cảnh suy giảm rừng và biến đổi khí hậu đang gia tăng [8]. Sử dụng nền tảng GEE làm nền tảng cho hệ thống giám sát biến động lớp phủ rừng tự động mang lại nhiều lợi ích vượt trội cho phép theo dõi diện tích rừng trên phạm vi lớn mà không đòi hỏi đầu tư lớn vào cơ sở hạ tầng. Một hệ thống như vậy sẽ cho phép giám sát chặt chẽ và liên tục các biến động của rừng, cung cấp dữ liệu thời gian thực với độ chính xác cao, và hỗ trợ phát hiện sớm các hiện tượng như phá rừng, cháy rừng, hay suy thoái rừng. Điều này đặc biệt quan trọng đối với các quốc gia như Việt Nam, nơi có diện tích rừng lớn nhưng đang đối mặt với các thách thức về quản lý tài nguyên và bảo vệ môi trường.

Hệ thống dựa trên GEE có thể được thiết kế như một ứng dụng thân thiện với người dùng, cho phép các nhà quản lý, chuyên gia lâm nghiệp và thậm chí cả cộng đồng địa phương dễ dàng truy cập và theo dõi tình trạng rừng trong khu vực của họ. Với giao diện trực quan và khả năng tự động phân tích dữ liệu, hệ thống có thể cung cấp các báo cáo và cảnh báo kịp thời về các khu vực có nguy cơ bị phá rừng, giúp đưa ra các biện pháp can thiệp nhanh chóng và hiệu quả. Việc xây dựng một ứng dụng như vậy không chỉ giúp tăng cường quản lý và bảo vệ rừng một cách bền vững mà còn góp phần vào các nỗ lực bảo tồn toàn cầu, đối phó với biến đổi khí hậu, và bảo vệ đa dạng sinh học. Một hệ thống giám sát biến động lớp phủ rừng tự động dựa trên GEE sẽ là công cụ hỗ trợ đắc lực cho chính phủ và các tổ chức trong việc duy trì và phát triển nguồn tài nguyên rừng.

2. Phương pháp nghiên cứu và thu thập số liệu

Hiện nay, việc theo dõi diễn biến lớp phủ rừng quốc gia tại Việt Nam đòi hỏi sự kết hợp của các chỉ số thực vật (*vegetation indices*) nhằm đánh giá chính xác và liên tục tình trạng sức khỏe rừng, độ che phủ và các thay đổi diễn ra theo thời gian. Các chỉ số: NDVI, EVI, SAVI, NDWI, NBRI, GCI, và BSI đều là những chỉ số hiệu quả và phổ biến trong việc giám sát diễn biến lớp phủ rừng. Trong đó, NDVI và EVI là những lựa chọn chủ đạo vì khả năng đánh giá nhanh chóng và toàn diện về sức khỏe và mật độ lớp phủ rừng [9–12]. Tùy thuộc vào điều kiện địa lý và đặc điểm của từng khu vực rừng, SAVI, NDWI và NBRI có thể được sử dụng để điều chỉnh theo môi trường đất và nước [13–15], trong khi GCI được dùng để đo lường hàm lượng diệp lục, giúp cung cấp cái nhìn sâu sắc hơn về sức khỏe cây cối [16]. Ngoài ra, BSI là chỉ số quan trọng để phát hiện và theo dõi sự suy thoái đất và vùng đất trống, cung cấp cái nhìn toàn diện hơn về sự biến động của rừng [17].

2.1. Chỉ số thực vật phân biệt (NDVI)

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) là một chỉ số quan trọng trong giám sát lớp phủ rừng, đặc biệt khi sử dụng công nghệ viễn thám [10]. NDVI được tính toán dựa trên dữ liệu từ các kênh phổ vệ tinh, sử dụng hai băng tần chính là cận hồng ngoại (NIR) và ánh sáng đỏ (Red), với công thức:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (1)$$

Trong đó NIR là ánh sáng cận hồng ngoại (*Near Infrared*); Red là ánh sáng đỏ.

NDVI rất cần thiết trong giám sát lớp phủ rừng vì nó cung cấp một chỉ số đơn giản và hiệu quả để đánh giá sức khỏe và mật độ của thảm thực vật [18]. NDVI dao động từ -1 đến +1, trong đó giá trị gần +1 chỉ ra mật độ thực vật xanh tươi dày đặc, trong khi giá trị gần -1 biểu thị vùng đất trống hoặc bị suy thoái [19]. Qua việc theo dõi chỉ số này, người quản lý có thể phát hiện sớm các thay đổi trong lớp phủ rừng, chẳng hạn như rừng bị suy giảm hoặc thay đổi cấu trúc, thường xuất hiện khi rừng bị khai thác, bị cháy hoặc chịu ảnh hưởng của biến đổi khí hậu [20]. Ứng dụng NDVI trong giám sát lớp phủ rừng dựa trên dữ liệu viễn thám từ các vệ tinh như Landsat, Sentinel, và MODIS [21]. Chỉ số này giúp xác định khu vực rừng bị tổn hại, khu vực rừng khỏe mạnh, và theo dõi sự phục hồi của rừng sau các sự kiện tự nhiên như cháy rừng [22]. Khi tích hợp NDVI vào các nền tảng phân tích như Google Earth Engine (GEE), người dùng có thể tự động tính toán, trực quan hóa và phân tích xu hướng biến đổi lớp phủ rừng theo thời gian, giúp đưa ra các quyết định chính xác trong việc bảo vệ và quản lý tài nguyên rừng [6]. NDVI không chỉ hữu ích trong giám sát các khu rừng lớn mà còn có thể ứng dụng ở các khu vực bị suy thoái hoặc cần bảo tồn đặc biệt, giúp tối ưu hóa các biện pháp can thiệp và bảo tồn rừng bền vững [23].

2.2. Chỉ số thực vật tăng cường (EVI)

EVI (Enhanced Vegetation Index) được thiết kế để khắc phục một số hạn chế của chỉ số NDVI, đặc biệt là trong các khu vực Rừng giàu đặc hoặc có nhiều khí quyển và bụi mù. EVI nhạy cảm hơn với các khu vực có thảm thực vật dày và ít bị bão hòa hơn so với NDVI, giúp cải thiện khả năng phân biệt sự thay đổi sức khỏe và mật độ rừng, đặc biệt trong các khu rừng mưa nhiệt đới và rừng có độ che phủ cao [9]. Công thức tính EVI như sau:

$$EVI = 2.5 \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + C1 \times Red - C2 \times Blue + L)} \quad (2)$$

Trong đó NIR là phản xạ ánh sáng cận hồng ngoại; Red là phản xạ ánh sáng đỏ; Blue là phản xạ ánh sáng xanh; C_1 và C_2 là các hệ số điều chỉnh cho ảnh hưởng của khí quyển (thường là 6 và 7,5); L là hệ số điều chỉnh nền đất (thường là 1).

EVI được thiết kế để khử tác động của khí quyển, loại bỏ ảnh hưởng của bụi, mây mờ, và cải thiện khả năng phân biệt giữa các loại thực vật có mật độ khác nhau, điều mà NDVI

có thể gặp khó khăn [24]. Ứng dụng của EVI trong giám sát lớp phủ rừng rất rộng rãi, đặc biệt trong các khu vực rừng nhiệt đới và rừng có độ dày thảm thực vật cao [25]. Bằng cách sử dụng dữ liệu từ các vệ tinh như MODIS và Landsat, EVI giúp đánh giá chính xác hơn sự thay đổi trong sinh khối rừng, mức độ quang hợp và sức khỏe cây rừng [26]. Điều này rất cần thiết trong việc phát hiện sớm sự suy giảm rừng do nạn phá rừng, cháy rừng, hay biến đổi khí hậu, cho phép các nhà quản lý đưa ra biện pháp can thiệp kịp thời [27]. Ngoài ra, EVI có thể được tích hợp vào các nền tảng phân tích dữ liệu lớn như Google Earth Engine để theo dõi và đánh giá diễn biến rừng trong thời gian dài [6]. Với khả năng nhạy bén hơn trong việc phát hiện các thay đổi về sức khỏe thực vật, EVI là một công cụ hữu ích trong việc bảo tồn và quản lý bền vững các hệ sinh thái rừng trên toàn cầu [28].

2.3. Chỉ số thực vật có hiệu chỉnh đất (SAVI)

SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) là một công cụ quan trọng trong giám sát lớp phủ rừng, đặc biệt trong các khu vực mà lớp phủ thực vật mỏng và bị ảnh hưởng đáng kể bởi sự hiện diện của đất trống. SAVI được phát triển nhằm giảm thiểu sự ảnh hưởng của ánh sáng phản xạ từ đất, yếu tố có thể làm sai lệch kết quả của các chỉ số thực vật như NDVI trong những khu vực có thảm thực vật thưa thớt [13]. Công thức tính SAVI như sau:

$$SAVI = 2,5 \times \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + L)} \times (1 + L) \quad (3)$$

Trong đó NIR là ánh sáng cận hồng ngoại (*Near Infrared*); Red là ánh sáng đỏ; L là hệ số hiệu chỉnh ảnh hưởng của đất (thường có giá trị là 0,5, nhưng có thể thay đổi tùy theo điều kiện đất và thảm thực vật).

SAVI được thiết kế để giảm thiểu sự nhiễu loạn do phản xạ từ đất bằng cách thêm vào một hệ số L, giúp điều chỉnh mức độ ảnh hưởng của đất lên chỉ số [29]. Khi lớp phủ thực vật thưa thớt, giá trị L có thể được điều chỉnh để làm tăng tính chính xác của chỉ số [30]. SAVI đặc biệt hiệu quả trong các khu vực rừng bị suy thoái, khu vực khô cằn hoặc nơi mà lượng đất trống lớn dễ ảnh hưởng đến phép đo lớp phủ thực vật [31]. Ứng dụng của SAVI trong giám sát lớp phủ rừng là rất cần thiết trong các nhiệm vụ theo dõi sự suy giảm rừng hoặc đánh giá tái tạo rừng ở các khu vực có lớp phủ thực vật thưa [32]. Nhờ khả năng loại bỏ ảnh hưởng của đất, SAVI cung cấp thông tin chính xác hơn về sức khỏe và mật độ của cây cối so với các chỉ số khác như NDVI, đặc biệt trong các điều kiện mà đất chiếm tỷ lệ cao trong vùng quan sát [33]. SAVI có thể được áp dụng trong việc theo dõi sự phục hồi rừng sau cháy rừng, khai thác gỗ hoặc các hiện tượng tự nhiên khác, giúp xác định khu vực nào cần trồng mới và khu vực nào đang phục hồi tốt [34]. Khi tích hợp vào các nền tảng phân tích như Google Earth Engine, SAVI có thể giúp giám sát và quản lý rừng trong thời gian dài, cung cấp dữ liệu quan trọng để lập kế hoạch bảo tồn và phát triển rừng bền vững [6]. Bằng cách sử dụng SAVI, các nhà quản lý rừng có thể nắm bắt rõ hơn về tình trạng rừng ở những khu vực nhạy cảm và đưa ra các biện pháp can thiệp phù hợp [35].

2.4. Chỉ số độ ẩm thực vật (NDWI)

NDWI (*Normalized Difference Water Index*) là một công cụ quan trọng trong giám sát lớp phủ rừng, đặc biệt trong việc đánh giá và theo dõi hàm lượng nước của thực vật và rừng. NDWI rất hữu ích trong việc giám sát sự thay đổi độ ẩm của thảm thực vật, điều này đóng vai trò quan trọng trong việc phát hiện các sự kiện như khô hạn, suy giảm sinh khối, và các yếu tố môi trường tác động đến rừng. Chỉ số này giúp phân biệt rõ hơn về tình trạng sức khỏe của thảm thực vật, bởi hàm lượng nước trong cây cối là chỉ dấu quan trọng cho quá trình quang hợp và phát triển thực vật [15]. Công thức tính NDWI như sau:

$$NDWI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (4)$$

Trong đó NIR là ánh sáng cận hồng ngoại (*Near Infrared*); SWIR là ánh sáng hồng ngoại sóng ngắn (*Shortwave Infrared*).

Chỉ số này sử dụng sự khác biệt giữa hai băng tần: cận hồng ngoại (NIR), phản xạ mạnh bởi thực vật khỏe mạnh, và hồng ngoại sóng ngắn (SWIR), hấp thụ bởi nước trong thảm thực vật [36]. Khi cây cối thiếu nước, phản xạ SWIR tăng lên, dẫn đến giá trị NDWI giảm [37]. Sự cần thiết của NDWI trong giám sát lớp phủ rừng chủ yếu nằm ở khả năng theo dõi sự thay đổi hàm lượng nước trong cây cối [38]. Điều này rất quan trọng trong việc phát hiện các hiện tượng khô hạn, cháy rừng hoặc suy thoái rừng do biến đổi khí hậu và các tác động nhân tạo [39]. Việc theo dõi hàm lượng nước giúp nhà quản lý rừng đánh giá sức khỏe của rừng theo thời gian, từ đó đưa ra các biện pháp bảo vệ kịp thời trước các nguy cơ tiềm tàng như mất nước, cháy rừng, hoặc suy giảm chất lượng sinh khối [40]. Ứng dụng của NDWI trong nhiệm vụ giám sát rừng cũng rất đa dạng. Chỉ số này có thể được sử dụng để giám sát khu vực rừng nhiệt đới có nguy cơ khô hạn, theo dõi sức khỏe các khu rừng bị ảnh hưởng bởi biến đổi khí hậu, và hỗ trợ trong việc quản lý nước ở các hệ sinh thái rừng đầm lầy hoặc rừng ngập nước [41]. Khi được tích hợp vào các hệ thống phân tích dữ liệu viễn thám như Google Earth Engine, NDWI giúp cung cấp thông tin chính xác và liên tục về tình trạng độ ẩm rừng, hỗ trợ trong việc lập kế hoạch bảo vệ và phục hồi rừng [6]. Với khả năng giám sát độ ẩm của thảm thực vật, NDWI trở thành một chỉ số thiết yếu giúp phát hiện sớm các thay đổi bất thường trong hệ sinh thái rừng, góp phần quan trọng vào việc quản lý bền vững và bảo vệ tài nguyên rừng toàn cầu [42].

2.5. Chỉ số cháy rừng (NBRI)

Chỉ số NBRI (Normalized Burn Ratio Index) đóng vai trò quan trọng trong giám sát lớp phủ rừng, đặc biệt là trong việc theo dõi và đánh giá sự ảnh hưởng của cháy rừng và phục hồi sau cháy. NBRI được thiết kế nhằm phát hiện các khu vực bị ảnh hưởng bởi lửa và theo dõi sự thay đổi của thảm thực vật trong các giai đoạn sau cháy [14]. Công thức tính NBRI dựa trên hai dải phổ hồng ngoại trung bình (SWIR) và hồng ngoại gần (NIR), cụ thể là:

$$NBRI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (5)$$

Trong đó NIR là ánh sáng cận hồng ngoại (*Near Infrared*); SWIR là giá trị phản xạ từ kênh hồng ngoại trung bình.

NBRI được sử dụng để so sánh giữa thời điểm trước và sau khi xảy ra cháy rừng, nhằm đánh giá mức độ thiệt hại và theo dõi quá trình phục hồi của hệ sinh thái [43]. Khi một khu vực bị cháy, thảm thực vật sẽ bị giảm mạnh về độ phản xạ hồng ngoại gần (NIR), trong khi độ phản xạ ở dải hồng ngoại trung bình (SWIR) sẽ tăng lên do sự giảm độ ẩm và sự xuất hiện của bề mặt trơ [44]. NBRI là một công cụ hiệu quả giúp các nhà quản lý tài nguyên rừng xác định các vùng bị thiệt hại bởi lửa, từ đó hỗ trợ các quyết định liên quan đến việc phục hồi hoặc quản lý rừng sau cháy [45]. Ứng dụng của NBRI trong giám sát lớp phủ rừng tại Việt Nam có tiềm năng rất lớn [46]. Việt Nam là quốc gia có hệ sinh thái rừng nhiệt đới đa dạng, dễ bị ảnh hưởng bởi cháy rừng tự nhiên và con người gây ra [47]. Việc sử dụng NBRI trong hệ thống giám sát rừng tự động trên nền tảng Google Earth Engine (GEE) giúp cải thiện khả năng phát hiện sớm các vụ cháy và đánh giá thiệt hại theo thời gian thực [6]. Hơn nữa, NBRI cũng giúp hỗ trợ các dự án phục hồi rừng sau cháy, đảm bảo rằng các biện pháp khắc phục được thực hiện kịp thời và hiệu quả [48].

Như vậy, chỉ số NBRI không chỉ cần thiết trong giám sát sự thay đổi thảm thực vật do cháy rừng mà còn là một công cụ mạnh mẽ để đánh giá mức độ thiệt hại và phục hồi sau các sự kiện thiên tai này [49]. Việc tích hợp NBRI vào các hệ thống giám sát rừng sẽ nâng cao hiệu quả quản lý tài nguyên rừng, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu và các nguy cơ cháy rừng ngày càng tăng [50].

2.6. Chỉ số chất diệp lục xanh (GCI)

GCI (Green Chlorophyll Index) là một công cụ quan trọng trong giám sát lớp phủ rừng, tập trung vào việc đo lường hàm lượng chlorophyll trong thảm thực vật, từ đó phản ánh trực tiếp sức khỏe và năng suất sinh học của cây cối. GCI đặc biệt nhạy cảm với sự thay đổi về mức độ quang hợp của thực vật, giúp phát hiện kịp thời các vấn đề liên quan đến stress môi trường như thiếu nước, sâu bệnh, hoặc các hiện tượng suy thoái sinh khối. Trong quản lý rừng, GCI là một chỉ số cần thiết để theo dõi sự thay đổi sức khỏe rừng một cách chính xác và nhanh chóng [16]. Công thức tính GCI như sau:

$$GCI = \frac{NIR}{Green} - 1 \quad (6)$$

Trong đó NIR là ánh sáng cận hồng ngoại (*Near Infrared*); Green là ánh sáng xanh (*Green*), là ánh sáng mà thực vật hấp thụ ít hơn so với các băng tần khác, do đó phản xạ mạnh.

GCI nhắm vào hàm lượng chlorophyll, thành phần thiết yếu của quang hợp, do đó nó có thể theo dõi sự thay đổi nhanh chóng trong quá trình sinh trưởng và phát triển của thực vật [51]. Điều này đặc biệt cần thiết trong giám sát lớp phủ rừng, vì hàm lượng chlorophyll có mối liên hệ chặt chẽ với sức khỏe của rừng [52]. Khi cây cối bị stress, hàm lượng chlorophyll giảm, làm cho giá trị GCI cũng giảm [53]. Ngược lại, một giá trị GCI cao phản ánh thảm thực vật có mật độ dày đặc và sức khỏe tốt [54]. Ứng dụng của GCI trong giám sát rừng bao gồm theo dõi sự thay đổi về sinh trưởng của cây rừng, đánh giá tác động của biến đổi khí hậu, phát hiện sớm sự suy giảm sức khỏe rừng do các yếu tố tự nhiên như hạn hán, hoặc các hoạt động nhân tạo như khai thác gỗ [55]. GCI có thể được sử dụng để đánh giá sự phục hồi của rừng sau các sự kiện phá hoại như cháy rừng hoặc sau các hoạt động tái trồng rừng [56]. Khi tích hợp vào các nền tảng phân tích dữ liệu viễn thám như Google Earth Engine, GCI cho phép các nhà nghiên cứu và quản lý rừng theo dõi diễn biến sức khỏe của rừng theo thời gian, trên quy mô lớn [6]. Điều này giúp đưa ra các quyết định nhanh chóng và hiệu quả về quản lý và bảo vệ tài nguyên rừng, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu và các hoạt động gây tổn hại đến hệ sinh thái rừng ngày càng gia tăng [57]. GCI cung cấp thông tin chi tiết và kịp thời, giúp bảo tồn và phát triển rừng bền vững [58].

2.7. Chỉ số đất trống (BSI)

Chỉ số BSI (*Bare Soil Index*) là một chỉ số quan trọng trong giám sát lớp phủ rừng, đặc biệt nhằm mục tiêu phát hiện và theo dõi các khu vực đất trống hoặc các khu vực bị suy thoái, nơi mà lớp phủ thực vật đã bị mất đi hoặc suy giảm nghiêm trọng. BSI được thiết kế để phát hiện các vùng đất trống bằng cách so sánh sự khác biệt giữa các dải phổ phản xạ của đất và thảm thực vật [17]. Công thức tính BSI như sau:

$$BSI = \frac{(SWIR+ Red) - (NIR+ Blue)}{(SWIR+ Red) + (NIR+ Blue)} \quad (7)$$

Trong đó NIR là giá trị phản xạ hồng ngoại gần; Blue là giá trị phản xạ ánh sáng xanh; Red là giá trị phản xạ ánh sáng đỏ; SWIR: là giá trị phản xạ hồng ngoại trung bình.

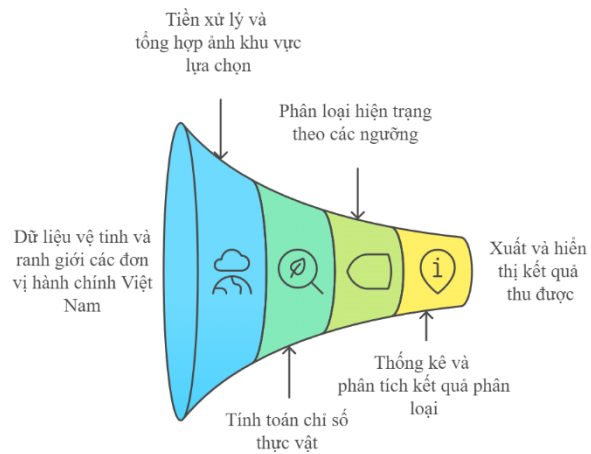
Chỉ số BSI đóng vai trò quan trọng trong việc giám sát và đánh giá quá trình suy thoái đất hoặc phá rừng, bởi nó giúp phát hiện các vùng đất trống một cách chính xác, từ đó hỗ trợ các hoạt động quản lý tài nguyên rừng [59]. Trong bối cảnh các khu vực rừng bị khai thác quá mức hoặc bị phá hủy để phục vụ cho các hoạt động kinh tế như nông nghiệp, BSI cho phép phát hiện kịp thời các khu vực bị suy thoái, hỗ trợ trong việc đưa ra các biện pháp quản lý và phục hồi kịp thời [60]. Ứng dụng của BSI trong giám sát rừng tại Việt Nam có ý nghĩa đặc biệt quan trọng, khi mà đất nước đang đối mặt với những thách thức nghiêm trọng về suy giảm diện tích rừng do khai thác gỗ, chuyển đổi đất nông nghiệp và phát triển hạ tầng [61]. Bằng cách tích hợp BSI vào các hệ thống giám sát tự động trên nền tảng Google Earth Engine (GEE), các nhà quản lý có thể theo dõi sự thay đổi của đất trống theo thời gian thực và ở quy

mô lớn [6]. BSI cũng cho phép phát hiện nhanh chóng những khu vực có nguy cơ bị sa mạc hóa hoặc suy thoái đất, từ đó giúp hỗ trợ các chiến lược phục hồi và quản lý tài nguyên rừng bền vững [62]. Như vậy, chỉ số BSI không chỉ là công cụ hữu ích trong việc phát hiện và theo dõi đất trồng, mà còn đóng góp tích cực vào việc quản lý và bảo vệ tài nguyên rừng tại Việt Nam [63]. Với tiềm năng lớn trong giám sát sự suy thoái thảm thực vật và đất đai, BSI sẽ tiếp tục là một thành phần quan trọng trong các hệ thống giám sát rừng hiện đại [64].

3. Kết quả và thảo luận

Ứng dụng dựa trên Google Earth Engine với nền tảng dữ liệu phong phú và công cụ tính toán mạnh mẽ sẽ giúp các nhà khoa học, nhà quản lý, và người dùng cá nhân có thể dễ dàng truy cập và phân tích dữ liệu viễn thám một cách nhanh chóng và hiệu quả, góp phần quan trọng trong quản lý tài nguyên thiên nhiên và bảo tồn môi trường. Quy trình xây dựng ứng dụng Google Earth Engine (GEE) nhằm mục đích tự động phân loại khu vực được người dùng lựa chọn dựa trên các chỉ số thực vật, và thực hiện phân tích thống kê về diện tích cũng như tạo ảnh sau phân loại.

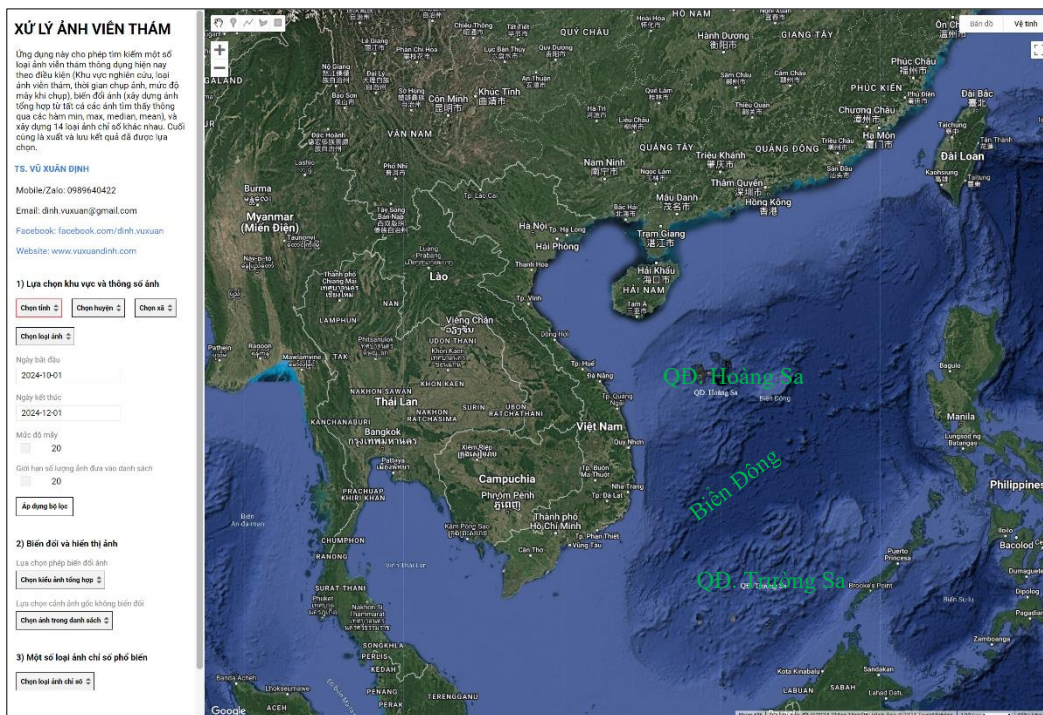
Hình 1 thể hiện sơ đồ khối mô tả hệ thống giám sát biến động lớp phủ rừng Việt Nam với cấu trúc gồm: thu thập dữ liệu vệ tinh và ranh giới hành chính, tiền xử lý và tổng hợp ảnh khu vực lựa chọn, tính toán các chỉ số thực vật (NDVI, EVI, SAVI...) sau đó phân loại hiện trạng lớp phủ theo các ngưỡng được định nghĩa. Kết quả phân loại được thống kê và phân tích, cuối cùng xuất và hiển thị qua các bản đồ, và số liệu thống kê.



Hình 1. Sơ đồ khối cấu trúc hệ thống giám sát biến động lớp phủ rừng

3.1. Thiết kế giao diện người dùng

Quy trình xây dựng ứng dụng Google Earth Engine (GEE) nhằm mục đích phân loại tự động các khu vực theo các chỉ số thực vật bắt đầu từ việc thiết kế giao diện người dùng (Hình 2). Trong ứng dụng này, người dùng có thể tùy chọn các thông số như



Hình 2. Giao diện hệ thống giám sát biến động lớp phủ rừng Việt Nam.

nguồn dữ liệu từ vệ tinh Landsat 8, Landsat 9, và Sentinel-2. Mỗi nguồn cung cấp dữ liệu với độ phân giải và đặc tính khác nhau, mang lại sự linh hoạt cho quá trình phân tích lớp phủ thực vật. Người dùng cũng có thể thiết lập khoảng thời gian nhất định và yêu cầu lọc dữ liệu theo tỷ lệ che phủ bởi mây, nhằm tối ưu hóa dữ liệu vệ tinh có chất lượng cao. Hơn nữa, ứng dụng cho phép người dùng lựa chọn khu vực quan tâm (AOI) bằng cách vẽ trực tiếp trên bản đồ, giúp đảm bảo quá trình phân loại được cá nhân hóa và chính xác theo yêu cầu.

3.2. Thu thập và lọc dữ liệu đầu vào

Dữ liệu bản đồ địa giới hành chính Việt Nam từ nguồn GADM (<https://gadm.org/>) đóng vai trò quan trọng trong nghiên cứu này, cung cấp ranh giới hành chính từ cấp tỉnh, huyện đến xã, giúp xác định chính xác các khu vực phân tích. Bộ dữ liệu này không chỉ hỗ trợ người dùng lựa chọn khu vực quan tâm mà còn đảm bảo tính đồng nhất và chính xác của dữ liệu đầu vào, giúp hệ thống cung cấp kết quả phân tích phù hợp với từng đơn vị hành chính. Nhờ đó, các cơ quan quản lý dễ dàng theo dõi và đưa ra quyết định về công tác bảo vệ và phát triển rừng tại các địa phương. Dữ liệu ranh giới này sẽ được tải lên và sử dụng trong các lựa chọn đầu tiên về khu vực giám sát lớp phủ rừng tại Việt Nam.

Bên cạnh đó, dữ liệu từ Landsat 8, 9 và Sentinel-2 giúp nâng cao hiệu quả giám sát biến động lớp phủ rừng nhờ độ phân giải không gian từ 10 đến 30 mét và các kênh phổ quan trọng cho việc tính toán chỉ số thực vật. Với chu kỳ lặp lại nhanh từ 5 đến 16 ngày, hệ thống có khả năng theo dõi chi tiết và kịp thời các biến động. Google Earth Engine cung cấp nền tảng tiếp cận hệ thống dữ liệu vệ tinh lớn này với các yêu cầu về thời gian và mức độ mây che phủ, tối ưu hóa chất lượng dữ liệu đầu vào bằng cách loại bỏ các ảnh bị ảnh hưởng bởi mây hoặc yếu tố thời tiết. Việc lọc theo các thông số đã chọn đảm bảo chỉ các ảnh có chất lượng cao nhất được sử dụng trong quá trình phân tích.

3.3. Tổng hợp và biến đổi ảnh

Tổng hợp ảnh vệ tinh trong một khoảng thời gian nhất định là kỹ thuật quan trọng trong nghiên cứu biến động lớp phủ rừng, giúp làm giảm ảnh hưởng của các yếu tố ngẫu nhiên ngắn hạn, chẳng hạn như thời tiết và nhiễu ảnh tạm thời, tạo ra cái nhìn ổn định và nhất quán hơn về xu hướng dài hạn của lớp phủ [65, 66]. Các phương pháp tổng hợp ảnh theo giá trị cực tiểu (min), cực đại (max), trung bình (mean), và trung vị (median) đóng vai trò khác nhau trong quá trình này: chúng không chỉ giảm thiểu nhiễu mà còn giúp tập trung vào các mô hình biến động bền vững theo thời gian. Ảnh tổng hợp trung bình cung cấp cái nhìn tổng quan, làm mờ các biến động ngắn hạn, trong khi ảnh cực đại và cực tiểu giúp xác định giới hạn của các giá trị phản xạ, qua đó phát hiện những khu vực có biến động bất thường [67, 68].

Trong điều kiện khí hậu nhiệt đới, nơi tỷ lệ mây che phủ cao và kéo dài suốt năm như tại Việt Nam, việc thu thập ảnh không bị ảnh hưởng bởi mây cho từng thời điểm riêng lẻ là một thách thức lớn. Kỹ thuật tổng hợp ảnh giúp khắc phục điều này, đặc biệt là phương pháp cực tiểu, có xu hướng loại bỏ các vùng mây do giá trị phản xạ cao của mây so với lớp phủ thực địa [69]. Các ảnh trung vị và trung bình cũng làm giảm tác động của mây, vì chúng sử dụng giá trị phản xạ phổ biến trong khoảng thời gian quan sát, làm mờ ảnh hưởng của các đám mây tạm thời. Ngược lại, ảnh cực đại, khi kết hợp với lọc mây ban đầu, có thể cung cấp thêm thông tin về mật độ lớp phủ tối đa của rừng trong một khu vực nhất định.

Nhờ các phép tổng hợp này, dữ liệu ảnh vệ tinh được tạo ra sẽ hỗ trợ theo dõi chính xác và liên tục các thay đổi trong lớp phủ rừng, đồng thời cải thiện khả năng phát hiện xu hướng phục hồi hoặc suy giảm của rừng. Điều này đặc biệt hữu ích trong công tác quản lý và bảo tồn tài nguyên rừng, đóng góp vào các chiến lược bền vững [6].

3.4. Tính toán các chỉ số thực vật

Các ảnh chất lượng cao thu được sau quá trình lọc, sẽ được đưa vào tự động tính toán các chỉ số thực vật quan trọng dựa trên dữ liệu đầu vào, bao gồm NDVI, EVI, SAVI và NDWI. Những chỉ số này giúp đánh giá mật độ và sức khỏe của thảm thực vật trong khu vực phân tích. NDVI là chỉ số phổ biến nhất, giúp đo lường sức khỏe thực vật bằng cách so sánh sự phản xạ của ánh sáng đỏ và cận hồng ngoại. EVI được sử dụng để tăng độ nhạy cảm trong các khu vực có mật độ thực vật cao, trong khi SAVI điều chỉnh các yếu tố liên quan đến lớp đất trống. NDWI hỗ trợ trong việc phát hiện các vùng nước và xác định độ ẩm của đất và thực vật. Việc sử dụng kết hợp các chỉ số này mang lại cái nhìn toàn diện về tình trạng lớp phủ thực vật và nước trong khu vực đã chọn. Các công thức chỉ số được triển khai dưới dạng script trên GEE, cho phép xử lý dữ liệu quy mô lớn, thực hiện phân tích chuỗi thời gian, và trích xuất thông tin không gian chi tiết. Kết quả từ các chỉ số này là cơ sở để xây dựng hệ thống giám sát lớp phủ rừng, hỗ trợ việc ra quyết định trong quản lý rừng bền vững tại Việt Nam.

3.5. Phân loại lớp phủ rừng

Quá trình phân loại hiện trạng rừng dựa trên các chỉ số thực vật đã được ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu viễn thám và quản lý tài nguyên rừng, đặc biệt là tại Việt Nam. Việc sử dụng các ngưỡng giá trị của các chỉ số thực vật như NDVI, EVI, SAVI, NDWI, NBRI, GCI và BSI đã được chứng minh qua nhiều nghiên cứu trong việc phân loại rừng, đất trống, đất nông nghiệp, và các dạng thảm thực vật khác. Những chỉ số này không chỉ giúp định hình rõ ràng sự khác biệt giữa các loại lớp phủ mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc theo dõi sự thay đổi của môi trường rừng qua thời gian. Cụ thể, các ngưỡng giá trị của các chỉ số này được thiết lập dựa trên các nghiên cứu về phản xạ quang phổ của thảm thực vật, giúp phân biệt các dạng lớp phủ một cách chính xác và hiệu quả. Bảng 1 dưới đây cung cấp các ngưỡng giá trị của từng chỉ số thực vật và các loại hình hiện trạng rừng tương ứng, được tổng hợp từ nhiều nghiên cứu đã được công bố tại Việt Nam và trên thế giới.

Bảng 1. Ngưỡng giá trị của các chỉ số trong phân loại lớp phủ rừng.

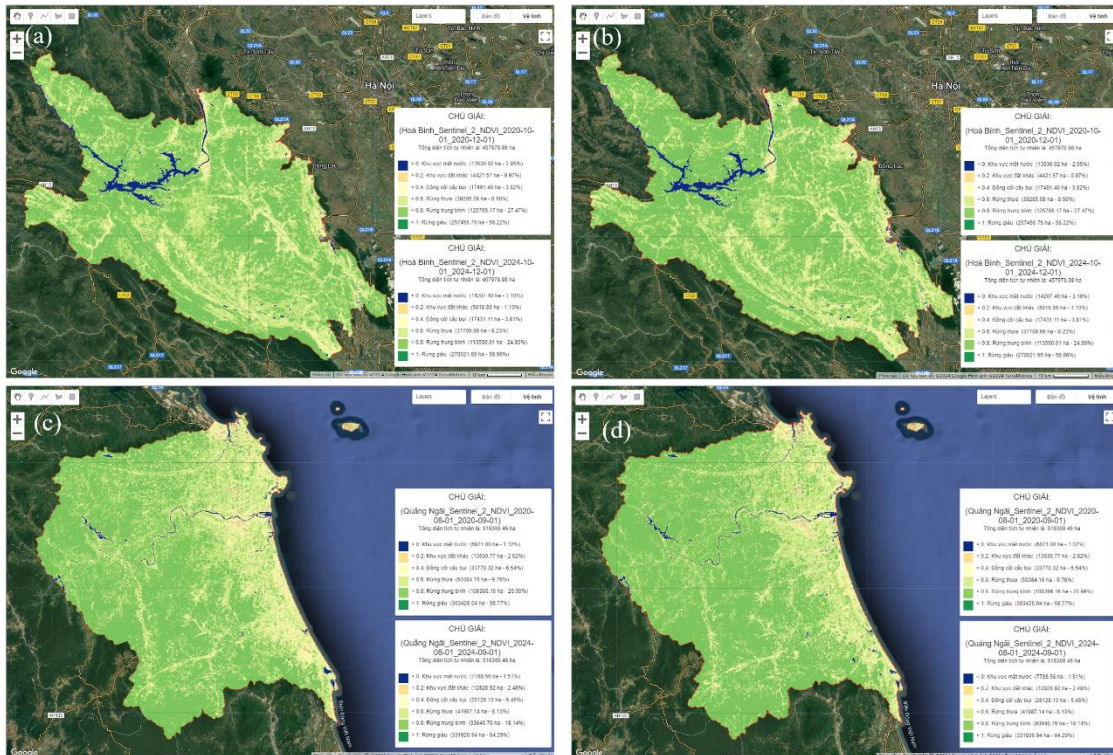
STT	Chỉ số thực vật	Loại hình lớp phủ	Ngưỡng giá trị	Nguồn tài liệu trích dẫn
1	NDVI	Rừng giàu	0,6 – 0,9	[70, 71]
		Rừng thưa	0,3 – 0,6	
		Đất nông nghiệp	0,2 – 0,4	
		Đất trống hoặc đô thị	-0,1 – 0,2	
2	EVI	Rừng giàu	0,5 – 1,0	[72]
		Rừng thưa	0,2 – 0,5	
		Đất trống hoặc nông nghiệp	0,0 – 0,2	
3	SAVI	Rừng giàu	0,4 – 0,7	[73]
		Rừng thưa	0,2 – 0,4	
		Đất trống hoặc nông nghiệp	0,0 – 0,2	
4	NDWI	Vùng nước	0,5 – 1,0	[74, 75]
		Rừng giàu	0,2 – 0,5	
		Đất trống hoặc đô thị	-0,5 – 0,0	
5	NBRI	Rừng bị cháy	-0,1 – -0,5	[76, 77]
		Rừng sau phục hồi	0,1 – 0,5	
		Đất trống sau cháy	-0,5 – 0,0	
6	GCI	Rừng khỏe	0,3 – 0,8	[78, 79]
		Rừng suy thoái	0,0 – 0,3	
7	BSI	Đất trống hoặc suy thoái	0,1 – 0,5	[64, 80]
		Rừng	-0,2 – 0,1	

3.6. Phân tích và thống kê diện tích

Quá trình tính toán và tổng hợp diện tích cho từng loại hình hiện trạng rừng được thực hiện tự động trên nền tảng Google Earth Engine (GEE), dựa trên các chỉ số thực vật được tính toán từ dữ liệu vệ tinh Landsat 8, 9 và Sentinel-2 do người dùng lựa chọn. Các chỉ số thực vật cho phép phân biệt các trạng thái rừng và các khu vực không có rừng thông qua các ngưỡng chỉ số thực vật đặc trưng. Dựa vào dữ liệu địa giới hành chính từ GADM, diện tích của từng loại hình hiện trạng rừng được xác định chính xác theo từng khu vực hành chính. Phương pháp này giúp phát hiện và đo lường nhanh chóng, chính xác các biến động về diện tích rừng theo thời gian, từ đó hỗ trợ hiệu quả cho công tác quản lý và bảo tồn tài nguyên rừng.

3.7. Xuất kết quả và hiển thị ảnh sau phân loại

Sau khi hoàn tất quá trình phân loại và tính toán diện tích, kết quả sẽ được hiển thị dưới dạng bản đồ số với các lớp màu khác nhau biểu thị cho từng loại địa hình hoặc lớp phủ thực vật. Người dùng có thể xem trực tiếp kết quả này trên giao diện ứng dụng và tùy chọn tải xuống ảnh phân loại hoặc dữ liệu thống kê dưới dạng bảng tính để phục vụ cho các nhu cầu phân tích hoặc báo cáo chi tiết. Ứng dụng cung cấp tính năng linh hoạt trong việc xuất dữ liệu, giúp người dùng dễ dàng chia sẻ hoặc tiếp tục nghiên cứu trên các nền tảng khác nhau.



Hình 3. Hiển thị kết quả sau phân loại theo chỉ số thực vật: (a) Ảnh sau phân loại theo chỉ số NDVI khu vực tỉnh Hòa Bình tháng 10 năm 2020, (b) Ảnh sau phân loại theo chỉ số NDVI khu vực tỉnh Hòa Bình tháng 10 năm 2024, (c) Ảnh sau phân loại theo chỉ số NDVI khu vực tỉnh Quảng Ngãi tháng 8 năm 2020, (d) Ảnh sau phân loại theo chỉ số NDVI khu vực tỉnh Quảng Ngãi tháng 8 năm 2024.

Hình 3 trình bày kết quả phân loại lớp phủ dựa trên chỉ số NDVI tại khu vực tỉnh Hòa Bình và Quảng Ngãi trong hai mốc thời gian khác nhau: năm 2020 và năm 2024. Cụ thể, hình 3a, 3b thể hiện phân bố giá trị NDVI tại tỉnh Hòa Bình vào tháng 10 năm 2020 và tháng 10 năm 2024, trong khi hình 3c, 3d mô tả tình hình tương tự tại tỉnh Quảng Ngãi vào tháng 8 năm 2020 và tháng 8 năm 2024. Kết quả phân loại dựa trên các ngưỡng NDVI, phản ánh sự khác biệt về mức độ che phủ thực vật. Sự so sánh giữa các mốc thời gian cho thấy những biến động đáng kể trong lớp phủ rừng tại cả hai tỉnh, qua đó thể hiện rõ kết quả của nghiên cứu.

cứu trong xây dựng hệ thống giám sát biến động lớp phủ rừng dựa trên nền tảng GEE trong hỗ trợ xử lý dữ liệu vệ tinh và phân tích chuỗi thời gian, cung cấp thông tin chi tiết và trực quan phục vụ công tác quản lý tài nguyên rừng bền vững.

3.8. Đánh giá độ chính xác

Trong các nghiên cứu gần đây, nhiều thực nghiệm đã được thực hiện nhằm đánh giá độ chính xác của các chỉ số thực vật như NDVI, EVI, SAVI, NDWI, NBRI, GCI và BSI trong việc giám sát và phân loại lớp phủ rừng. Chỉ số NDVI đã được chứng minh là có khả năng phân loại chính xác lớp phủ rừng trong nhiều điều kiện môi trường khác nhau, đạt độ chính xác phân loại lớp phủ rừng khoảng 85% trong các khu vực rừng giàu, nhưng giảm xuống còn 70% trong các khu vực có lớp phủ thực vật thưa [70]. Trong khi đó, EVI cho thấy ưu thế trong việc phân biệt giữa các loại thảm thực vật dày đặc và ít che phủ, đặc biệt là ở những khu vực bị che phủ bởi mây hoặc có bụi bản, nhờ vào khả năng điều chỉnh ảnh hưởng của các yếu tố ngoại cảnh. Độ chính xác đạt khoảng 88% trong các khu vực có mây hoặc bụi bản, so với 75% của NDVI trong cùng điều kiện [72]. Chỉ số SAVI, với việc bổ sung hệ số L, đã cho kết quả khả quan trong các khu vực có lớp phủ thực vật thưa, giúp giảm thiểu tác động của đất lên phép đo đã cho độ chính xác khoảng 82% trong việc phân loại rừng thưa, cao hơn so với 68% của NDVI [73]. NDWI được công nhận có hiệu quả trong việc theo dõi độ ẩm của thực vật, đã được chứng minh có độ chính xác lên tới 90% trong việc theo dõi độ ẩm của thực vật, đặc biệt hiệu quả trong phát hiện các hiện tượng khô hạn và cháy rừng [74]. Chỉ số NBRI đã cho thấy khả năng cao trong việc đánh giá thiệt hại sau các sự kiện cháy rừng, đạt độ chính xác khoảng 92% giúp xác định nhanh chóng các khu vực cần phục hồi [14, 43, 76]. GCI, chỉ số phản ánh hàm lượng chlorophyll, đã được chứng minh có khả năng phát hiện sự thay đổi về sức khỏe của thực vật với chính xác đạt 85% trong việc phát hiện sự thay đổi sức khỏe thực vật, được ứng dụng trong việc theo dõi tình trạng stress của rừng [79]. Cuối cùng, BSI đã chứng tỏ tính hiệu quả với độ chính xác lên tới 87% trong việc phát hiện các vùng đất trống và suy thoái, hỗ trợ hiệu quả cho quản lý tài nguyên rừng bền vững [64].

Những con số này không chỉ chứng minh tính hiệu quả của các chỉ số thực vật trong việc giám sát và quản lý tài nguyên rừng mà còn mở ra cơ hội cho các phương pháp giám sát hiện đại trong bối cảnh biến đổi khí hậu và suy thoái môi trường. Từ đó, các chỉ số này đóng vai trò quan trọng trong việc cung cấp thông tin kịp thời và chính xác cho các nhà quản lý rừng, góp phần bảo tồn và phát triển bền vững các hệ sinh thái rừng toàn cầu.

4. Kết luận

Ứng dụng phát triển trên nền tảng Google Earth Engine (GEE) để theo dõi và đánh giá hiện trạng rừng mang lại nhiều ưu điểm vượt trội trong quản lý tài nguyên thiên nhiên. Một trong những ưu điểm lớn nhất là khả năng xử lý dữ liệu vệ tinh lớn theo thời gian thực với tốc độ nhanh chóng, cho phép người dùng có thể cập nhật thông tin về hiện trạng rừng một cách liên tục và hiệu quả. Ứng dụng cũng có tính linh hoạt cao khi cho phép người dùng tùy chọn các loại dữ liệu vệ tinh (Landsat 8, 9 và Sentinel-2), thời gian và mức độ lọc mây, giúp việc giám sát rừng trở nên phù hợp với các điều kiện cụ thể của Việt Nam và từng khu vực địa lý khác nhau. Điều này giúp người dùng có thể theo dõi các biến động rừng kịp thời, đặc biệt hỗ trợ rất lớn trong việc đưa ra các quyết định quản lý và bảo tồn rừng của các cơ quan quản lý trực tiếp. Bên cạnh đó, việc sử dụng ứng dụng trên GEE không đòi hỏi người dùng có kỹ năng và hiểu biết nhiều về viễn thám và quá trình xử lý dữ liệu, điều này cho thấy vai trò của ứng dụng trong thực tế là rất cần thiết đặc biệt cho những người sử dụng quan tâm có kiến thức chuyên môn về các lĩnh vực khác nhau có thể tham gia vào quá trình theo dõi và gia quyết định trong tương lai.

Tiềm năng phát triển của ứng dụng này là rất lớn, đặc biệt khi xu hướng quản lý tài nguyên thiên nhiên theo thời gian thực ngày càng được chú trọng. Với việc tiếp tục phát triển và cải tiến, ứng dụng có thể tích hợp thêm các thuật toán học máy (machine learning) và trí

tuệ nhân tạo (AI) để tăng cường khả năng phân loại và dự đoán biến động rừng một cách chính xác hơn. Ngoài ra, việc cải thiện giao diện người dùng, tăng cường khả năng tiếp cận và đào tạo cho người dùng không chuyên sẽ mở rộng phạm vi ứng dụng, giúp các tổ chức chính phủ, nhà nghiên cứu và doanh nghiệp tư nhân có thể sử dụng công cụ này một cách dễ dàng hơn trong việc ra quyết định liên quan đến quản lý và bảo vệ rừng.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: V.X.Đ.; Xử lý số liệu: V.X.Đ.; Viết bản thảo bài báo: V.X.Đ.; Chỉnh sửa bài báo: V.X.Đ.

Lời cam đoan: Tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của 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 với tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Sodhi, N.S.; Brook, B.W.; Bradshaw, C.J.A. Southeast Asian biodiversity conservation. *Trends Ecol. Evol.* **2004**, *19*(12), 654–660.
2. General Department of Forestry, M.o.A. and R. Development, Vietnam forestry statistics. Hanoi: General Department of Forestry, 2020.
3. Nguyen, T.V.; McElwee, P.D. Forest cover change in Vietnam: A historical review and implications for future policies. *Land Use Policy* **2020**, *97*, 104693.
4. Food and A. Organization. Global forest resources assessment. Rome: FAO, 2020.
5. Hansen, M.C.; et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science* **2013**, *342*(6160), 850-853.
6. Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens. Environ.* **2017**, *202*, 18–27.
7. Nguyen, Q.; Hoang, T.L.; Vu, N.C. Applications of remote sensing for forest monitoring in Vietnam using Google Earth Engine. *Forests* **2020**, *11*(8), 822.
8. Asner, G.P.; et al. The importance of remote sensing for forest conservation. *Nat. Commun.* **2021**, *12*(1), 6956.
9. Huete, A.R.; Liu, H.Q.; Batchily, K.; van Leeuwen, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sens. Environ.* **1997**, *59*(3), 440–451.
10. Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, in Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. NASA SP-351, 1974, pp. 309–317.
11. Geography, G.I.S. What is NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), 2015.
12. Vélez, S.; Martínez-Peña, R.; Castrillo, D. Beyond vegetation: A review unveiling additional insights into agriculture and forestry through the application of vegetation indices. *J. Agric. For. Res.* **2023**, *6*(3), 421–436.
13. Huete, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.* **1988**, *25*(3), 295–309.
14. Key, C.H.; Benson, N.C. Landscape assessment: Remote sensing of severity, the normalized burn ratio. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2006.
15. McFeeters, S.K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.* **1996**, *17*(7), 1425–1432.
16. Gitelson, A.A.; Gritz, U.; Merzlyak, M.N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant Physiol.* **2003**, *160*(3), 271–282.
17. Rikimaru, A.; Roy, P.S.; Miyatake, S. Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology* **2002**, *43*(1), 39–47.

18. Pettorelli, N.; Laurance, W.F.; O'Brien, T.G.; Wegmann, M.; Nagendra, H.; Turner, W. Satellite remote sensing for applied ecologists: opportunities and challenges. *J. Appl. Ecol.* **2016**, *53*(4), 859–864.
19. Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* **2019**, *12*(1), 1001–1006.
20. Xu, C.; et al. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change in the northern forests of China. *Forests* **2017**, *8*(6), 200.
21. Zhu, Z.; Wang, S.; Woodcock, C.E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sens. Environ.* **2019**, *159*, 269–277.
22. Huang, X.; Liu, Y.; Zhang, M. Spatiotemporal dynamics of forest disturbance and recovery derived from Landsat time series in subtropical China. *Remote Sens. Environ.* **2020**, *12*(2), 233.
23. Fensholt, R.; Proud, S.R.; Mbow, C. Evaluation of earth observation based global long-term vegetation trends—Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *159*, 104–123.
24. Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T. Overview of the Enhanced Vegetation Index (EVI): Contributions and improvements to vegetation monitoring. *Remote Sens. Environ.* **2016**, *182*, 231–245.
25. Sims, D.A.; Rahman, A.F. Tropical forest monitoring with enhanced vegetation indices. *Ecol. Appl.* **2017**, *27*(6), 1833–1847.
26. Didan, K.; Huete, A.R. MODIS vegetation index products: Updates and lessons learned. *Remote Sens. Environ.* **2018**, *221*, 3–22.
27. Morton, D.C.; Defries, R.S.; Randerson, J.T. Agricultural intensification increases deforestation fire activity in Amazon forests. *Global Environ. Change* **2019**, *55*, 1–12.
28. Zhang, Y.; Xu, B.; Wang, W. Monitoring forest health using remote sensing data with enhanced vegetation index. *Environ. Monit. Assess.* **2020**, *192*(9), 606.
29. Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T. A revised soil-adjusted vegetation index (SAVI) and its application to vegetation monitoring. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *174*, 143–153.
30. Xu, D.; Chen, Q.; Du, J. Impact of soil reflectance on the performance of vegetation indices: A comparison study in arid regions. *Ecol. Indic.* **2016**, *63*, 1–9.
31. Zhang, C.; Liu, X.; He, H. Assessing deforestation and forest degradation using soil-adjusted vegetation indices in dry forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* **2017**, *404*, 13–22.
32. Chen, X.; Zhao, Y.; Sun, J. Application of SAVI in forest degradation and regeneration assessment in semi-arid areas. *J. Arid. Environ.* **2018**, *152*, 98–110.
33. Jiang, Z.; Xiao, X.; Wang, Y. Soil-adjusted vegetation indices for improving forest health assessments under high soil visibility. *Remote Sens.* **2019**, *11*(5), 582.
34. Wang, L.; Zhou, L.; Liu, Z. Monitoring post-fire forest recovery using SAVI and other vegetation indices: A case study in boreal forest regions. *Forests* **2020**, *11*(6), 629.
35. Huang, Y.; Wang, Y.; Chen, J. Utilizing SAVI for forest management in sensitive regions. *Enviro. Res.* **2020**, *188*, 109.
36. Gao, B.C. NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* **2015**, *101*, 375–382.
37. Gu, Y.; et al. A five-year analysis of the NDWI for drought monitoring in the central United States. *Remote Sens.* **2017**, *9*(4), 303.
38. Makamura, Y.; Xu, H. Application of NDWI for forest water stress monitoring. *Ecol. Indic.* **2018**, *85*, 1–9.

39. Chen, J.; Huang, Y.; Wu, J. Using NDWI and other indices to assess forest drought stress. *J. Hydrol.* **2016**, 535, 222–233.
40. Zhou, Y.; Liu, X.; Zhang, Z. Monitoring forest health using NDWI: A case study in subtropical forests. *Remote Sens. Environ.* **2019**, 226, 216–224.
41. Li, W.; Zhang, H.; Li, Y. NDWI application in wetland and forest water stress assessment: A comparative study. *For. Ecol. Manage.* **2020**, 456, 117666.
42. Wang, L.; Zhou, L.; Liu, Z. NDWI in forest management: A global perspective on forest water stress monitoring. *Forests* **2021**, 12(5), 501.
43. Key, C.H.; Benson, N.C. Landscape assessment: Ground measure of severity, the composite burn index; and remote sensing of severity, the normalized burn ratio. *Fire Effects Monit. Inventory Syst.* **2006**, LA1–LA51.
44. Holden, Z.A.; Morgan, P.; Crimmins, M.A.; Steinhurst, R.K.; Smith, A.M.S. Fire season precipitation variability influences fire extent and severity in a large southwestern wilderness area, USA. *Geophys. Res. Lett.* **2015**, 42(14), 5213–5221.
45. García-Lázaro, J.R.; et al. Burn severity patterns of large fires in response to pre-fire fuel and weather in Mediterranean pine ecosystems. *Sci. Total Environ.* **2018**, 624, 424–437.
46. Pham, T.D.; Nguyen, H.V. Forest fire monitoring and management in Vietnam using remote sensing and GIS. *For. Ecol. Manage.* **2020**, 477, 118481.
47. Doan, H.Q.; Tran, Q.D. The effects of forest fire on tropical forest ecosystems in Vietnam. *Int. J. Wildland Fire* **2019**, 28(5), 340–349.
48. Roberts, D.A.; Quayle, B.; Borchert, J. Use of remote sensing to assess the impacts of large fires on forest restoration. *Ecological Restoration* **2019**, 37(3), 183–195.
49. Chuvieco, E.; Pettinari, M.L.; Ramo, C.C. Generation and analysis of burn severity maps for a southern European country using Landsat and Sentinel-2 data. *Remote Sens.* **2016**, 8(5), 340.
50. Rodríguez-Galiano, V.F.; Pascual, J.; Martín, M.P. Burned area mapping and post-fire severity assessment using satellite imagery and machine learning in fire-prone ecosystems. *Remote Sens. Environ.* **2021**, 264, 112571.
51. Sims, D.A.; Gamon, J.A. Relationship between chlorophyll content and vegetation indices: implications for photosynthetic efficiency across vegetation types. *Remote Sens. Environ.* **2016**, 187, 120–134.
52. Daughtry, C.S.T.; Walthall, C.L.; Kim, M.S.; de Colstoun, E.B.; McMurtrey, J.E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sens. Environ.* **2000**, 74(6), 229–239.
53. Tucker, C.J.; Sellers, P.J. Satellite remote sensing of primary production. *Int. J. Remote Sens.* **2015**, 36(5), 1540–1560.
54. Smith, M.O.; Black, A. Reflectance of dense vegetation at near-infrared wavelengths. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **2018**, 56(2), 233–243.
55. Jones, M.O.; Kimball, J.S.; Reichle, R.H. Satellite monitoring of vegetation response to drought. *Agric. For. Meteorol.* **2019**, 265, 146–159.
56. Chen, B.; Xiao, X.; Zhang, Y. Using Landsat images to monitor post-fire forest recovery dynamics. *Ecol. Appl.* **2020**, 30(2), e02052.
57. Wang, Y.; Ma, L.; Li, X. Effects of climate change on forest ecosystems and vegetation index trends. *J. Environ. Manage.* **2021**, 278, 111591.
58. Kross, A.; Murdie, T.; Gomez, C. Evaluating GCI for sustainable forest management. *Can. J. Remote Sens.* **2018**, 44(3), 266–278.
59. Rahman, M.M.; Shi, Z.; Chongfa, C. Soil degradation monitoring with remote sensing. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* **2017**, 54, 38–48.
60. DeFries, R.; Hansen, A.; Turner, B.L. Land use change: Impacts on soil and biodiversity. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2015**, 40, 235–258.

61. Phan, L.D.; Vu, T.A.; Bui, Q.T. Forest cover loss and agricultural expansion in Vietnam: Impacts of economic activities on land degradation. *For. Policy Econ.* **2020**, *115*, 102138.
62. Sun, Q.; Cheng, W.; Liu, X. Desertification monitoring using BSI and other remote sensing indices. *Environ. Monit. Assess.* **2019**, *191*(4), 220.
63. Tran, H.T.; Nguyen, Q.D. Assessing BSI for forest management in tropical regions. *J. For. Res.* **2021**, *32*(2), 353–367.
64. Li, F.; Lu, C.; Yang, X. Application of BSI in forest cover and land degradation monitoring. *Land Degrad. Dev.* **2018**, *29*(5), 1337–1349.
65. Zhu, Z.; Woodcock, C.E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sens. Environ.* **2012**, *118*, 83–94.
66. Cohen, W.B.; Goward, S.N. Landsat's role in ecological applications of remote sensing. *Bioscience* **2004**, *54*(6), 535–545.
67. Woodcock, C.E.; Strahler, A.H. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sens. Environ.* **1987**, *21*(3), 311–332.
68. Kennedy, R.E.; Yang, Z.; Cohen, W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms. *Remote Sens. Environ.* **2010**, *114*(12), 2897–2910.
69. Roy, D.P.; et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *145*, 154–172.
70. Nguyen, H.T.; Tran, M.T.; Le, Q.P. Application of NDVI in monitoring forest cover changes in the Central Highlands of Vietnam. *J. Sci. Technol.* **2018**, *56*(2), 12–19.
71. Phan, T.H.; Vo, N.A. The use of remote sensing and NDVI to monitor forest ecosystems in Vietnam. *VN J. For. Res.* **2015**, *24*(3), 22–30.
72. Hoang, L.V.; Le, V.T.; Nguyen, A.H. Enhanced vegetation index (EVI) application in forest monitoring in tropical areas of Vietnam. *J. Environ. Sci.* **2017**, *61*(4), 55–67.
73. Le, M.T.; Pham, V.C.; Tran, Q.H. Soil-adjusted vegetation index (SAVI) in vegetation classification and monitoring in Northern Vietnam. *VN Acad. Agric. Sci.* **2016**, *49*(1), 10–18.
74. Tran, Q.T.; Le, T.V.; Hoang, P.D. NDWI and MNDWI in monitoring water bodies and forested wetland areas in the Mekong Delta, Vietnam. *VN J. Hydrometeorol.* **2019**, *75*(2), 43–52.
75. Xu, H. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens.* **2006**, *27*(14), 3025–3033.
76. Key, C.H.; Benson, N.C. Landscape Assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio; and ground measure of severity, the Composite Burn Index.
77. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service, 2006.
78. López García, M.J.; Caselles, V. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto Int.* **1991**, *6*(1), 31–37.
79. Gitelson, A.A.; Viñ, A.; Ciganda, V.; Rundquist, D.C.; Arkebauer, T.J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys. Res. Lett.* **2005**, *32*(8), L08403.
80. Wu, Y.; et al. Evaluation of GCI index in monitoring forest health status using remote sensing data. *Remote Sens.* **2020**, *12*(14).
81. Jamalabad, V.P.; Abkar, A.A. Forest canopy density monitoring using satellite images. *Geocarto Int.* **2004**, *19*(2), 21–24.

Application of Google Earth Engine in developing a forest cover change monitoring system in Vietnam

Vu Xuan Dinh^{1*}

¹ Department of Geodesy, Mapping and GIS, College of Land Management and Rural Development, Vietnam National University of Forestry; dinh.vuxuan@gmail.com

Abstract: This study focuses on developing an automated system to monitor forest cover changes in Vietnam through the Google Earth Engine (GEE) platform, using widely recognized vegetation indices. Amid increasing deforestation and climate change, this system provides a rapid, accurate, and cost-effective solution for tracking forest dynamics without the need for substantial infrastructure investment. The indices NDVI, EVI, SAVI, NDWI, NBRI, GCI, and BSI are applied to assess forest health and coverage levels. This research underscores the critical role of remote sensing technology in forest monitoring, leveraging satellite data to analyze changes in forest area and ecosystem health. With its large-scale processing capabilities, GEE enables broad-area analysis and early detection of phenomena such as deforestation, wildfires, and forest degradation. This system serves as a crucial decision-support tool for sustainable forest management and conservation, while also automating monitoring processes, contributing to improved resource management efficiency and biodiversity protection.

Keywords: Google Earth Engine; Remote Sensing Technology; Vegetation Indices; Natural Resource Monitoring; Vegetation Classification; Vietnam.

Bài báo khoa học

Đánh giá tác động của mưa trái mùa đến nguồn nước trên các sông chính ở Tây Nguyên

Lê Văn Hưng¹, Trần Xuân Hiền¹, Vũ Anh Tuấn¹, Lê Thị Thanh Quỳnh^{1*}, Lê Phương Thúy¹, Vũ Thị Ngọc Mai¹, Nguyễn Thị Tuyết²

¹ Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Tây Nguyên; lehungkttvtn@gmail.com; xuanhien67@yahoo.com.vn; tuankttvtn@gmail.com; thanhquynh105@gmail.com; phuongthuykttvtn@gmail.com; ngocmaivt1209@gmail.com

² Đại học Tài nguyên và Môi trường Thành phố Hồ Chí Minh; nttuyet@hcmunre.edu.vn

*Tác giả liên hệ: thanhquynh105@gmail.com; Tel.: +84-945020690

Ban Biên tập nhận bài: 11/10/2024; Ngày phản biện xong: 28/11/2024; Ngày đăng bài: 25/4/2025

Tóm tắt: Bài báo sử dụng số liệu mưa trái mùa từ năm 1993-2022 của 18 trạm khí tượng và 22 trạm đo mưa nhân dân (nay là trạm đo mưa tự động) và số liệu đo lưu lượng tại 12 trạm thủy văn ở khu vực Tây Nguyên, thông qua các phương pháp tính toán thống kê, phương pháp tính xu thế, phương pháp tuyến tính, phương pháp sử dụng công thức tính. Kết quả cho thấy: Mùa khô ở Tây Nguyên kéo dài từ tháng 11 đến tháng 4 năm sau, tổng lượng mưa trung bình trong các tháng mùa khô phổ biến từ 160-500 mm, tổng lượng mưa trung bình tháng khoảng 40-90 mm/tháng. Mưa trái mùa đã có những tác động tích cực đến dòng chảy mặt trong mùa khô, cải thiện tình hình nguồn nước sinh hoạt, tưới tiêu của người dân, đặc biệt là các khu vực xa hồ chứa, các công trình thủy lợi; làm giảm nền nhiệt và giảm nguy cơ cháy rừng. Bên cạnh đó, mưa trái mùa cũng có những tác động tiêu cực đến nguồn nước trên các lưu vực sông. Đối với các lưu vực có diện tích nhỏ, độ dốc lớn, các khu đô thị, đông dân cư và các khu vực dễ sạt lở thì mưa trái mùa sẽ có thể gây lũ, ngập và sạt lở đất... ảnh hưởng đến đời sống của người dân.

Từ khóa: Mưa trái mùa; Nguồn nước; Tây Nguyên.

1. Giới thiệu

Những năm gần đây, lượng mưa ở Việt Nam nói chung và khu vực Tây Nguyên nói riêng đã có những biến động tương đối rõ rệt. Nhiều trận mưa với tổng lượng mưa đạt mốc lịch sử đã xảy ra không chỉ trong mùa mưa mà còn trong mùa khô, thời gian mưa cũng kéo dài, có những năm xảy ra mưa liên tục, không ngớt trong từ 01 đến 02 tháng (như đợt mưa tháng 7-8/2018). Sự biến động này đã và đang gây những ảnh hưởng lớn đến đời sống kinh tế-xã hội trong khu vực. Thời gian qua, có rất nhiều những đề tài, dự án, nhiệm vụ đã tập trung nghiên cứu về biến động tình hình mưa cũng như tác động của mưa đến nguồn nước trên lãnh thổ Việt Nam nói chung và khu vực Tây Nguyên nói riêng, tuy nhiên, lại có rất ít nghiên cứu về mưa trái mùa và những tác động của nó đến nguồn nước trên các sông chính khu vực Tây Nguyên. Hiện nay, có nhiều các nghiên cứu ngoài nước về các sự kiện cực đoan liên quan đến mưa [1-4]. Tuy nhiên, các nghiên cứu tập trung về xu thế biến đổi mưa cực trị ở khu vực phía Nam Việt Nam không nhiều, chủ yếu sử dụng các phương pháp: chỉ số thống kê; tương quan với hoàn lưu quy mô lớn; mô hình chi tiết hóa thống kê và đều có kết quả chung là xu hướng tăng mưa cực trị ở phía nam Việt Nam trong đó có khu vực Tây Nguyên.

Tại Việt Nam, cho đến nay cũng đã có các nghiên cứu về mưa trái mùa như trong bài báo [5] đã phân loại các hình thái thời tiết gây mưa lớn, kết hợp với các số liệu đo mưa mặt

Tạp chí Khí tượng Thủy văn **2025**, 772, 67-76; doi:10.36335/VNJHM.2025(772).67-76 <http://tapchikttv.vn/>

đất thời kỳ 1987-2006. Bài báo trình bày các kết quả thống kê, phân tích nguyên nhân biến của thời tiết mưa lớn vùng Bắc Trung Bộ, trong đó nguyên nhân chính của các đợt “mưa lớn trái mùa” ở phía Bắc khu vực Bắc Trung Bộ chủ yếu là do 3 loại hình thể thời tiết: (i) Bão hoặc ATNĐ (37,5%); (ii) Hình thể thời tiết tổ hợp xoáy thuận, rãnh thấp và gió đông nam, hội tụ kinh hướng... (37,5%) và (iii) Hình thể nhiễu động (18,7%). Còn ở phía Nam khu vực Bắc Trung Bộ nguyên nhân chủ yếu chỉ là hai loại hình thể thời tiết: (i) bão hoặc ATNĐ (50%); (ii) Hình thể thời tiết tổ hợp rãnh thấp, xoáy thuận và gió đông nam, hội tụ kinh hướng (40%) và bài báo này trình bày các kết quả thống kê, phân tích nguyên nhân biến của thời tiết mưa lớn vùng Bắc Trung Bộ. Trong nghiên cứu [6] đã xây dựng một công nghệ phân tích, giám sát, dự báo dòng chảy hạn vừa, hạn dài trong mùa cạn đáp ứng yêu cầu dự báo thủy văn phục vụ quy trình vận hành liên hồ chứa, đáp ứng yêu cầu hiệu quả trong dự báo tác nghiệp có vai trò quan trọng trong công tác phòng tránh và giảm nhẹ thiên tai trên lưu vực sông. Tuy nhiên, chưa có một nghiên cứu cụ thể nào về việc đánh giá mưa trái mùa cũng như tác động của mưa trái mùa tới nguồn nước trên các sông chính của khu vực Tây Nguyên.

Để làm sáng rõ thông tin trên, mục đích nghiên cứu trình bày về các đợt mưa trái mùa cũng như tác động của các đợt mưa trái mùa đến nguồn nước trên các sông, suối khu vực Tây Nguyên.

2. Phương pháp nghiên cứu và số liệu sử dụng

2.1. Số liệu sử dụng

Số liệu mưa: Số liệu quan trắc lượng mưa ngày được tính từ 19 giờ hôm trước đến 19 giờ ngày hôm sau của 18 trạm khí tượng trên khu vực Tây Nguyên và 22 trạm đo mưa nhân dân (nay là đo mưa tự động) từ năm 1993 đến 2022.

Số liệu dòng chảy: Số liệu quan trắc lưu lượng tại 12 trạm thủy văn trên các hệ thống sông Sê San, sông Ba, sông SRêPók và sông Đồng Nai thuộc khu vực Tây Nguyên.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp tính toán thống kê

Với phương pháp này, nghiên cứu lựa chọn theo các đặc trưng cơ bản như sau: Mùa khô và độ dài mùa khô: Trong khí hậu, mùa mưa/khô được tính căn cứ vào lượng mưa tháng. Mùa mưa là mùa các tháng liên tục có lượng mưa trung bình ≥ 100 mm, còn mùa khô là thời kỳ các tháng liên tục có lượng mưa trung bình tháng < 100 mm [7–9]. Với quan niệm đó, ngưỡng chỉ tiêu lượng mưa tháng nhỏ hơn 100 mm/tháng sẽ được sử dụng trong bài báo để xác định mùa khô và độ dài mùa khô; Số ngày mưa (SNM): là số ngày có lượng mưa ngày $> 0,1$ mm/ngày trong chuỗi số liệu lượng mưa ngày (Bỏ những ngày có lượng mưa đo được bằng 0 mm); Mưa vừa và lớn: Mưa là một trong hai biến khí hậu quan trọng nhất. Đặc trưng về mưa rất đa dạng như địa điểm mưa, thời điểm xuất hiện, thời gian kéo dài, cường độ mưa, tổng lượng mưa,... Mặc dù vậy, khi đề cập đến tính cực đoan người ta thường quan tâm đến cường độ mưa, được đặc trưng bởi hiện tượng mưa lớn. Khái niệm mưa lớn cũng là một khái niệm tương đối.

2.2.2. Phương pháp tính xu thế

Trong phân tích thống kê, mục đích của phân tích xu thế biến đổi của chuỗi số liệu theo thời gian là xác định các biến đổi của một biến ngẫu nhiên là tăng hay giảm theo thời gian hay xác suất phân bố thay đổi theo thời gian. Có nhiều cách kiểm tra định tính hoặc định lượng của xu thế như: Đồ thị, hồi quy tuyến tính, Mann-Kendal và xu thế Sen. Nghiên cứu



Hình 1. Sơ đồ các trạm Khí tượng Thủy văn và Đo mưa nhân dân Tây Nguyên.

này áp dụng phương pháp tuyến tính để kiểm tra xu thế biến đổi của các đặc trưng mưa [10, 11].

Lập phương trình xu thế biến đổi theo phương pháp bình phương tối thiểu:

$$x_t = b_0 + a_1 \times t; \quad a_1 = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(t - \bar{t})}{\sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2}; \quad b_0 = \bar{x} - a_1 \bar{t} \quad (1)$$

Các đặc trưng thu được từ phương trình xu thế bao gồm: Tốc độ xu thế: a_1 ; Góc xu thế: b_0 ; Mức tăng hay giảm trong thời kỳ nghiên cứu: $D = a_1 n$; Hệ số tương quan theo thời gian (r_{xt}).

$$r_{xt} = \frac{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(t - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \sum_{t=1}^n (t - \bar{t})^2}} \quad (2)$$

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc điểm của các đợt mưa trái mùa

Mưa trái mùa là những trận mưa mang tính bất thường về cả thời gian lẫn cường độ. Mưa trái mùa nhưng ở cấp mưa nhỏ không có nhiều ý nghĩa với nguồn nước cũng như ảnh hưởng tới nông nghiệp hay đời sống sản xuất. Vì vậy, trong khuôn khổ nghiên cứu này lựa chọn những đợt mưa trái mùa điển hình với 2 tiêu chí lượng mưa ở cấp vừa trở lên và xảy ra trên 50% số trạm trong thời kỳ mùa khô [12–15]. Dưới đây là kết quả đánh giá về các đợt mưa trái mùa trên khu vực Tây Nguyên:

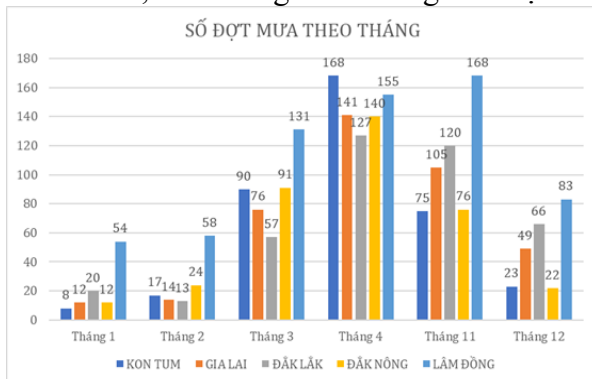
a) Thời gian kéo dài các đợt mưa

Theo số liệu thống kê trong 30 năm (từ năm 1993 đến năm 2022), thời kỳ mùa khô tại các tỉnh Tây Nguyên có khoảng từ 350 đến 400 đợt mưa, riêng tỉnh Lâm Đồng có khoảng gần 650 đợt mưa.

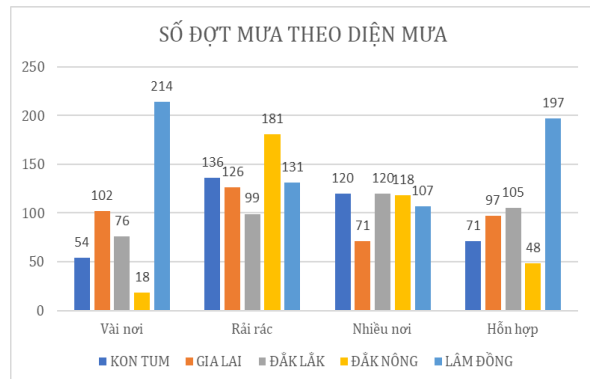
Phần lớn các đợt mưa này kéo dài phổ biến từ 01 đến 02 ngày với tần suất từ 18 đến 70%, số đợt mưa kéo dài 03 ngày chỉ có tần suất từ 8 đến 13%, các đợt mưa kéo dài trên 5 ngày ít khi xảy ra. Tuy nhiên trong 30 năm thống kê, tại tỉnh Đắk Nông (năm 1999) và tỉnh Lâm Đồng (năm 2014) đều có 01 đợt mưa kéo dài khoảng 19 ngày.

b) Số đợt mưa trái mùa theo năm

Trung bình mỗi năm có khoảng từ 12 đến 13 đợt mưa, riêng tỉnh Lâm Đồng có khoảng 22 đợt mưa. Năm nhiều nhất có khoảng từ 20 đến 23 đợt mưa (Lâm Đồng khoảng từ 27 đến 29 đợt mưa), năm ít nhất có khoảng từ 6 đến 8 đợt mưa (Lâm Đồng khoảng từ 13 đến 14 đợt mưa). Có thể thấy rằng trên khu vực Tây Nguyên các đợt mưa đang có xu thế tăng/giảm khác nhau theo từng tỉnh. Trong khi các tỉnh Kon Tum, Gia Lai, Lâm Đồng có xu thế tăng thì tỉnh Đắk Lắk, Đắk Nông có xu thế giảm chậm.



Hình 2. Số đợt mưa theo tháng Tây Nguyên.



Hình 3. Số đợt mưa theo diện mưa Tây Nguyên.

c) Số đợt mưa trái mùa theo tháng

Nếu xét các đợt mưa theo tháng cũng tương tự lượng mưa và số ngày mưa, tập trung vào tháng 4 và tháng 11 hàng năm. Tháng 01 là tháng có số đợt mưa ít nhất khoảng từ 08 đến 12 đợt (tỉnh Lâm Đồng nhiều hơn khoảng 54 đợt). Tháng 4 là tháng có số đợt mưa nhiều nhất khoảng từ 127 đến 168 đợt, riêng tỉnh Lâm Đồng tháng 11 nhiều hơn các tháng khác.

Ở đây, cần lưu ý rằng các đợt mưa này đều có nơi có mưa vừa [16] trở lên chứ không phải mưa vừa mưa to diện rộng như trong tính toán mưa lớn diện rộng [17], thậm chí có khi chỉ có một vài điểm có mưa hoặc có mưa diện rộng nhưng chỉ một vài nơi có mưa lớn và cũng có nơi không mưa. Số đợt mưa theo diện mưa được thể hiện trên Hình 3.

Số đợt mưa trái mùa trên khu vực Tây Nguyên, số đợt mưa diện vài nơi dao động từ 18 đến 102 đợt, riêng tỉnh Lâm Đồng có 214 đợt; số đợt mưa diện rải rác từ 99 đến 181 đợt; số đợt mưa diện nhiều nơi từ 71 đến 120 đợt; số đợt mưa diện hỗn hợp từ 48 đến 105 đợt, riêng tỉnh Lâm Đồng là 197 đợt.

Đáng lưu ý ở đây là trong các đợt mưa trái mùa này vẫn có xuất hiện những ngày có mưa vừa mưa to diện rộng, thậm chí mưa rất to [18] (mặc dù chiếm số ít) và nhưng đợt mưa đặc biệt này thường xảy ra vào tháng 11 sang tháng 12.

d) Tổng lượng mưa trái mùa theo tháng

Theo số liệu thống kê, mùa khô trên khu vực Tây Nguyên bắt đầu từ tháng 11 năm trước đến tháng 4 năm sau, tổng lượng mưa phổ biến từ 150-350 mm, riêng khu vực phía Đông Gia Lai - Đắk Lắk, Tây Nam tỉnh Lâm Đồng lượng mưa cao hơn các khu vực khác, phổ biến từ 350-650 mm, cá biệt tại huyện Mdrak lượng mưa đạt 1140 mm.

Tổng lượng mưa mùa khô nhỏ hơn nhiều so với lượng mưa mùa mưa, chiếm khoảng 10 đến 20% tổng lượng mưa năm, riêng khu vực phía Đông các tỉnh Gia Lai - Đắk Lắk và Tây Nam tỉnh Lâm Đồng chiếm từ 22 đến 49%.

Lượng mưa thấp nhất thường xảy ra từ tháng 01 đến tháng 02 (thời kỳ giữa mùa khô) lượng mưa phổ biến dưới 15 mm, phía Đông Gia Lai - Đắk Lắk, Tây Nam tỉnh Lâm Đồng lượng mưa cao hơn các khu vực khác.

Tháng 3 lượng mưa bắt đầu tăng cao hơn phổ biến từ 10-70 mm, riêng khu vực Tây Nam các tỉnh Đắk Nông - Lâm Đồng từ 90-140 mm.

Tháng 4 lượng mưa tăng nhanh phổ biến từ 40-120 mm, riêng khu vực phía Tây Nam tỉnh Đắk Nông và tỉnh Lâm Đồng từ 120-180 mm, một số nơi cao hơn.

Tháng 11 mưa thường tập trung ở khu vực phía đông Tây Nguyên, lượng mưa từ 300-500 mm, trong khi các khu vực khác chỉ từ 40-120 mm.

Tháng 12 lượng mưa bắt đầu giảm nhanh, phổ biến dưới 50mm, tuy nhiên khu vực phía Đông vẫn còn mưa với lượng từ 200-350 mm.

3.2. Đặc trưng các đợt mưa trái mùa ở Tây Nguyên

Mưa với lượng nhỏ không có ý nghĩa gì nhiều đối với nguồn nước, trong bài báo này chỉ thống kê các đợt mưa có lượng mưa vừa trở lên. Trong đó diện mưa nhiều nơi là số trạm có mưa trên 2/3 tổng số trạm đo, rải rác là số trạm có mưa từ 1/3 đến dưới 2/3 tổng số trạm đo, diện mưa vài nơi là số trạm có mưa dưới 1/3 tổng số trạm đo, diện mưa hỗn hợp [19] là mưa có các ngày mưa kết hợp các kiểu mưa trên. Trong 30 năm thống kê số đợt mưa trái mùa trên khu vực Tây Nguyên, số đợt mưa diện vài nơi dao động từ 18 đến 102 đợt chiếm 5% đến 26% trong tổng số đợt mưa, riêng tỉnh Lâm Đồng có 214 đợt chiếm 33%; số đợt mưa diện rải rác từ 99 đến 181 đợt chiếm từ 20 đến 50%; số đợt mưa diện nhiều nơi từ 71 đến 120 đợt chiếm 16% đến 32%; số đợt mưa diện hỗn hợp từ 48 đến 105 đợt chiếm 13% đến 26%, riêng tỉnh Lâm Đồng là 197 đợt chiếm 30%.

Thời gian kéo dài các đợt mưa: Thời kỳ mùa khô tại các tỉnh Tây Nguyên có khoảng 365 đến 403 đợt mưa, riêng tỉnh Lâm Đồng có khoảng 649 đợt mưa. Phần lớn các đợt mưa này kéo dài phổ biến từ 01 đến 02 ngày với tần suất từ 18 đến 70%, số đợt mưa kéo dài 03 ngày chỉ có tần suất từ 8 đến 13%, các đợt mưa kéo dài trên 05 ngày ít khi xảy ra. Tuy nhiên trong

30 năm thống kê, tại tỉnh Đắk Nông (năm 1999) và tỉnh Lâm Đồng (năm 2014) đều có 01 đợt mưa kéo dài khoảng 19 ngày.

Số đợt mưa theo năm: Trung bình mỗi năm có khoảng 12 đến 13 đợt mưa, riêng tỉnh Lâm Đồng có khoảng 22 đợt mưa. Năm nhiều nhất có khoảng 20 đến 23 đợt mưa (Lâm Đồng khoảng 27 đến 29 đợt mưa), năm ít nhất có khoảng 6 đến 8 đợt mưa (Lâm Đồng khoảng 13 đến 14 đợt mưa).

Số đợt mưa theo tháng: Nếu xét các đợt mưa theo tháng cũng tương tự lượng mưa và số ngày mưa, số đợt mưa tập trung vào tháng 4 và tháng 11 hàng năm. Tháng 01 là tháng có số đợt mưa ít nhất khoảng 08 đến 20 đợt chiếm khoảng 2% đến 5%, tỉnh Lâm Đồng nhiều hơn khoảng 54 đợt chiếm khoảng 8%. Tháng 4 là tháng có số đợt mưa nhiều nhất khoảng 127 đến 168 đợt chiếm khoảng 32% đến 44%, riêng tỉnh Lâm Đồng tháng 11 nhiều hơn các tháng khác chiếm khoảng 26%.

3.3. Đánh giá nguồn nước mùa cạn trên các sông chính ở Tây Nguyên

Dòng chảy mùa cạn trên các sông chính ở Tây Nguyên nhìn chung có thời gian dài hơn mùa lũ thường được bắt đầu từ tháng 12 đến tháng 6 năm sau [20]. Trên các lưu vực sông ở Tây Nguyên, phổ biến mùa lũ đến muộn và kết thúc cũng muộn hơn mùa mưa khoảng từ 2 đến 3 tháng, do thời gian đầu mùa mưa, lượng mưa chủ yếu tham gia vào quá trình thấm nên chưa tạo thành dòng chảy để bổ sung vào nguồn nước của sông, suối. Các tháng đầu mùa mưa, lượng dòng chảy mặt và dòng chảy ngầm nhỏ, chưa đủ gây ra những trận lũ lớn [21, 22]. Sự phân phối dòng chảy giữa mùa lũ và mùa cạn hàng năm rất mất cân đối trên các sông, suối tại khu vực này.

Ở lưu vực sông Sê San, lưu lượng dòng chảy phân bố rõ rệt giữa mùa lũ và mùa cạn. Cụ thể trên sông Pô Kô mùa lũ chiếm 77,1% trong khi đó mùa cạn chỉ chiếm 22,9% so với lưu lượng trung bình cả năm. Tương tự trên sông Đắk Bla tại trạm Kon Plong và Kon Tum lưu lượng mùa lũ và mùa cạn cũng chiếm tỉ lệ lần lượt là 68,2% và 31,8%; 76,1% và 23,9% so với lưu lượng trung bình cả năm. Mức độ giảm dòng chảy năm so với thời kỳ có sự khác nhau giữa các trạm và giữa các thời kỳ. Dòng chảy trên các trạm biến đổi ít trong thời kỳ từ 1980-2019. Sau năm 2015 dòng chảy biến đổi mạnh và hụt chuẩn rõ rệt [23, 24] (Hình 4a).

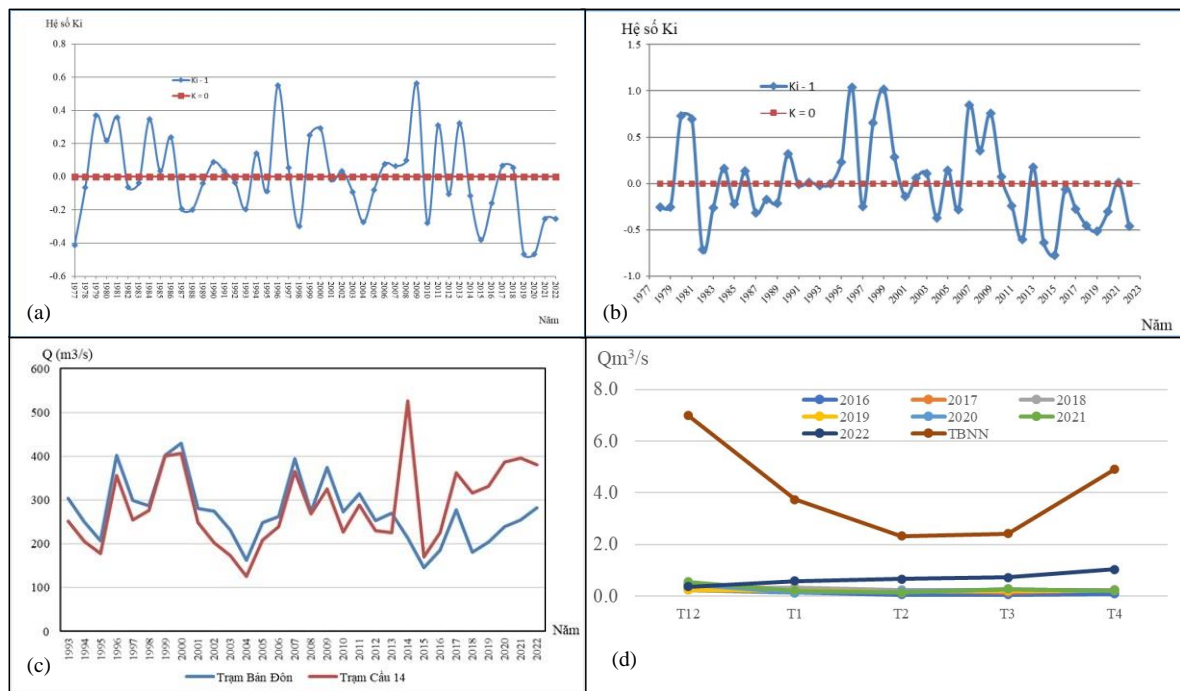
Ở lưu vực sông Ba, mùa mưa bắt đầu từ tháng 5 nhưng tới tháng 7, tháng 8 mùa lũ mới bắt đầu, có thể nhận định tổng quát như sau: Mùa lũ trên các sông Ayun bắt đầu từ tháng 7 kết thúc vào tháng 11; Mùa lũ trên sông Ba và Krông Năng, sông Hinh bắt đầu từ tháng 9 kết thúc vào tháng 11, có những năm kết thúc vào nửa đầu tháng 12. Tổng lượng dòng chảy mùa lũ trên các sông suối chiếm tới 68,0 đến 78,6% tổng lượng dòng chảy năm. Lượng dòng trên các sông suối ở lưu vực sông Ba chủ yếu sản sinh ra trong các tháng mùa lũ. Trên các sông Ba và Krông Năng, sông Hinh bắt đầu từ tháng 9 kết thúc vào tháng 11, có những năm kết thúc vào nửa đầu tháng 12, sông Ayun từ tháng 7 đến tháng 11. Như vậy thời gian mùa lũ kéo dài 4 đến 5 tháng, tổng lượng dòng chảy chiếm 63,8% đến 76,5% tổng lượng dòng chảy cả năm.

Ở lưu vực sông SRêPôk, tổng lượng dòng chảy mùa lũ trên các sông suối chiếm từ 60-75% tổng lượng dòng chảy năm. Sự biến động của nguồn nước giữa các tháng trong năm và qua các năm cũng tương đối lớn. Qua phân tích đường tích lũy sai chuẩn của các trạm Bản Đôn, Cầu 42, Giang Sơn, Cầu 14, Đức Xuyên cho thấy những năm nước lớn có lượng dòng chảy lớn gấp 2 đến 5 lần năm có lượng dòng chảy nhỏ nhất, năm có lượng dòng chảy lớn nhất có thể lớn gấp 1,5 đến 2,0 trị số bình quân nhiều năm, trong khi đó sự biến động của mưa không nhiều. Lượng nước trong mùa cạn rất nhỏ, chỉ chiếm 30 đến 40% lượng nước của cả năm.

Ở lưu vực sông Đồng Nai, mùa mưa bắt đầu từ tháng 5 nhưng tới tháng 7, tháng 8 mùa lũ mới bắt đầu, có thể nhận định tổng quát như sau: Mùa lũ trên các sông Cam Ly bắt đầu từ tháng 7 kết thúc vào tháng 11; Mùa lũ trên các sông La Ngà và Đắk Nông bắt đầu từ tháng 7 kết thúc vào tháng 10. Tổng lượng dòng chảy mùa lũ trên các sông suối chiếm tới 58-75,4%

tổng lượng dòng chảy năm. Lượng dòng trên các sông suối ở lưu vực sông Đồng Nai chủ yếu sản sinh ra trong các tháng mùa lũ. Trên các sông Đăk Nông, La Ngà mùa lũ kéo dài từ tháng 7 đến tháng 10, sông Cam Ly từ tháng 7 đến tháng 11. Như vậy thời gian mùa lũ kéo dài 4 đến 5 tháng, tổng lượng dòng chảy chiếm 58% đến 75,4% tổng lượng dòng chảy cả năm. Qua phân tích đường lũy tích sai chuẩn của 3 trạm Thanh Bình, Đại Nga, Đăk Nông có thể đánh giá dòng chảy năm trên toàn lưu vực có xu hướng giảm trong các thời kỳ đầu và xen kẽ năm nước nhiều nước ít ở các thời kỳ sau. Mức độ giảm dòng chảy năm so với thời kỳ có sự khác nhau giữa các trạm và giữa các thời kỳ. Dòng chảy trên các trạm biến đổi ít trong thời kỳ từ 1980-2010, sau năm 2010 dòng chảy biến đổi mạnh và lệch chuẩn rõ rệt.

Hiện nay, khi các nhà máy thủy điện trên khu vực Tây Nguyên đi vào hoạt động đã có những tác động rõ rệt đến dòng chảy trong các sông, suối. Bên cạnh mặt tích cực, giúp điều hòa dòng chảy, giảm đỉnh lũ, tăng lượng nước mùa cạn thì cũng có những mặt tiêu cực như: dòng chảy bị chia cắt làm nhiều đoạn làm chế độ thủy văn trong sông thay đổi rõ rệt, gây ra hiện tượng lũ nhân tạo, một số hồ chứa thủy điện chưa đảm bảo dòng chảy tối thiểu sau hạ lưu, tạo ra những đoạn sông bị khô hạn trong mùa cạn. Trong những năm gần đây, dòng chảy tại các trạm thủy văn hụt chuẩn đáng kể [23, 24] (Hình 4a, 4b, 4d). Trên sông SRêPôk, trước khi các thủy điện được xây dựng (1977-2002) dòng chảy tại trạm Bản Đôn, nằm phía dưới hạ lưu, luôn luôn cao hơn dòng chảy thượng lưu là trạm thủy văn Cầu 14. Trong giai đoạn từ năm 2014 đến 2022, chế độ dòng chảy đã bị đảo ngược và dòng chảy trung bình năm tại trạm Cầu 14, trạm thượng nguồn lại cao hơn dòng chảy tại trạm Bản Đôn (Hình 4c).



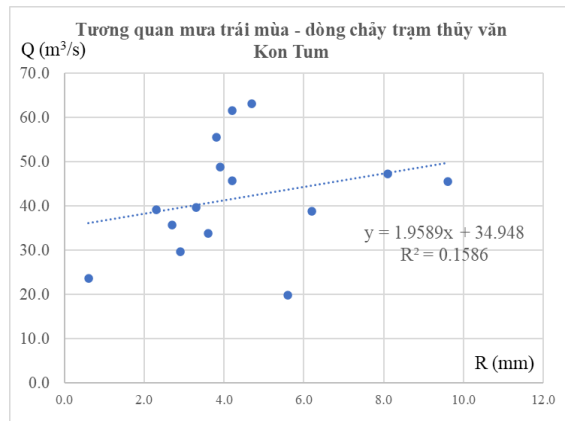
Hình 4. (a) Đường lũy tích sai chuẩn trạm Kon Tum (sông Sê San); (b) Đường lũy tích sai chuẩn trạm An Khê (sông Ba); (c) Đường quá trình lưu lượng trung bình năm trạm Bản Đôn và trạm Cầu 14 (sông SRêPôk); (d) Đường quá trình lưu lượng các tháng mùa cạn trạm Đại Nga (sông Đồng Nai).

3.4. Đánh giá tác động của các đợt mưa trái mùa đến nguồn nước trên các sông chính ở Tây Nguyên

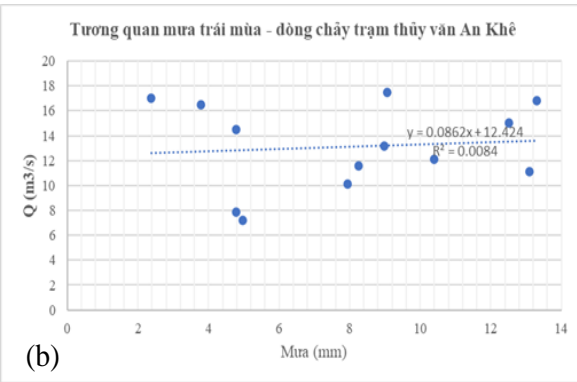
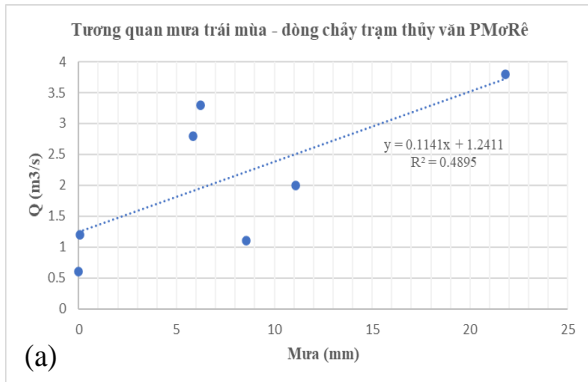
Ở lưu vực sông Sê San, khi tổng lượng mưa trái mùa (trung bình) động từ 0,1-2,5 mm thì nguồn nước có biến động tăng từ 10-29,5%. Tương tự, dao động từ 2,8-3,2 mm, 4,2-5,4 mm, 5,5-6,7 mm, 7,6-8,6 mm thì nguồn nước có biến động tăng lần lượt từ 44,8-70,9%, 21-8,9%, 21,3-49,1% và 35,9-152,3%. Riêng đối với sông Sê San, các thủy điện phía thượng lưu các trạm thủy văn chủ yếu mới đi vào vận hành từ năm 2021 đến nay, nên chuỗi số liệu

để đánh giá tương quan mưa trái mùa - dòng chảy [25] sau khi có thủy điện quá ngắn, nên bài báo không phân chia làm hai thời kỳ để so sánh, đánh giá (Hình 5).

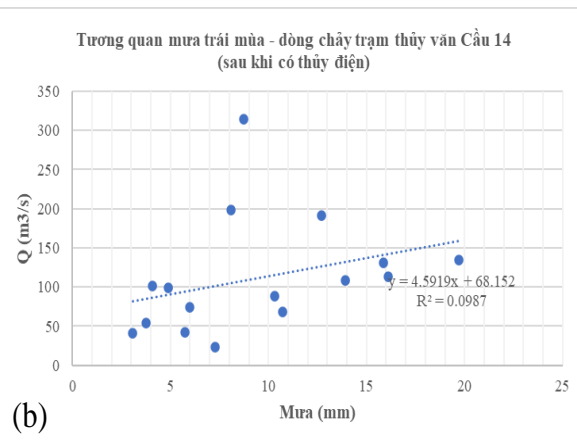
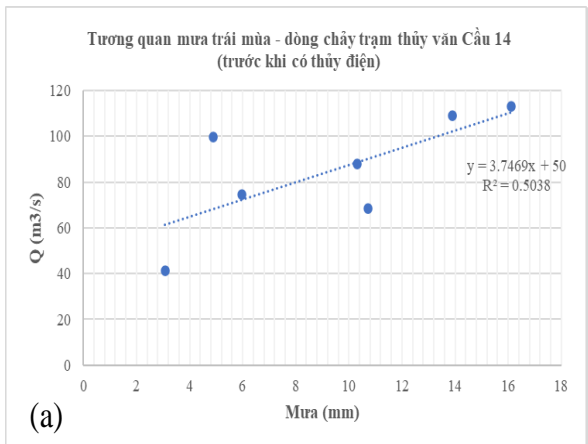
Ở lưu vực sông Ba, với lượng mưa trái mùa phổ biến từ 30-70 mm, dòng chảy tại các trạm đều có sự biến đổi đáng kể, lượng dòng chảy gấp đôi, gấp ba so với dòng chảy nền trước khi có mưa, đặc biệt đối với các trạm ít chịu ảnh hưởng của vận hành hồ chứa thủy điện, thủy lợi. Cá biệt có những trận mưa lớn, như tại lưu vực Ayun lượng mưa tại trạm Đắc Đoạ vượt 150 mm thì lượng dòng chảy cao gấp 8 lần so với dòng chảy nền. Tuy nhiên, cũng có những trận mưa chỉ diễn ra trong một ngày nhưng lượng phổ biến từ 30-40 mm, thì lượng dòng chảy phía hạ nguồn các công trình thủy điện dao động không đáng kể. Trên lưu vực sông Ba, tại trạm thủy văn PMoRê không chịu ảnh hưởng của vận hành hồ chứa thủy điện thì có tương quan khá chặt chẽ với R đạt 70% (Hình 6a); tại trạm thủy văn An Khê thì tương quan này được đánh giá thấp. Như vậy, đối với các trạm thủy văn ít chịu ảnh hưởng của hồ chứa thủy điện và thủy lợi thì dòng chảy có mối quan hệ chặt chẽ với mưa trái mùa (Hình 6b).



Hình 5. Tương quan mưa trái mùa - dòng chảy trên lưu vực sông Sê San.



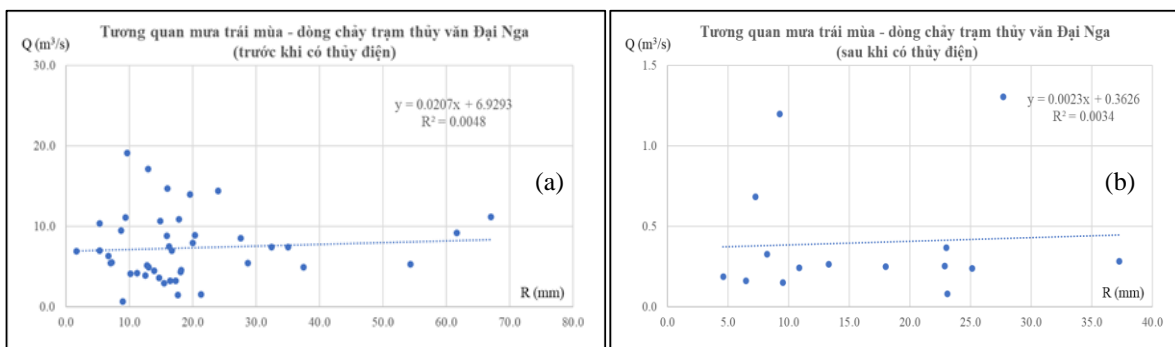
Hình 6. (a) Tương quan mưa trái mùa - dòng chảy trên lưu vực sông Ba khi không có ảnh hưởng của thủy điện (trạm PMoRê); (b) Tương quan mưa trái mùa - dòng chảy trên lưu vực sông Ba khi có ảnh hưởng của thủy điện (trạm An Khê).



Hình 7. (a) Tương quan mưa trái mùa - dòng chảy trên lưu vực sông SRÊPôk trước khi có ảnh hưởng của thủy điện (trạm Cầu 14); (b) Tương quan mưa trái mùa - dòng chảy trên lưu vực sông SRÊPôk sau khi có ảnh hưởng của thủy điện (trạm Cầu 14).

Ở lưu vực sông SRÊPôk, với lượng mưa phổ biến từ 30-40 mm, nhưng lượng mưa tập trung vào 1 hoặc 2 ngày, dòng chảy tại các trạm đều có sự biến đổi đáng kể, lượng dòng chảy gấp đôi, gấp ba so với dòng chảy nền trước khi có mưa. Cá biệt có những đợt mưa, tổng lượng từ 70-100 mm, nhưng kéo dài trong nhiều ngày, thì lượng dòng chảy lại không có sự thay đổi đáng kể. Đánh giá hệ số tương quan giữa mưa trái mùa và dòng chảy tại trạm thủy văn Cầu 14 cho kết quả cho thấy: Trước khi có thủy điện $R = 71\%$ và sau khi có thủy điện $R = 31\%$ (Hình 7). Như vậy, đối với các trạm thủy văn trước khi chịu ảnh hưởng của hồ chứa thủy điện và thủy lợi thì dòng chảy có mối quan hệ chặt chẽ với mưa trái mùa.

Ở lưu vực sông Đồng Nai, với lượng mưa phổ biến từ 30-70 mm, dòng chảy tại các trạm đều có sự biến đổi đáng kể, lượng dòng chảy có thể gấp đôi hoặc hơn so với dòng chảy nền trước khi có mưa, xảy ra rõ nhất ở các trạm ít chịu ảnh hưởng của vận hành hồ chứa thủy điện, thủy lợi. Cá biệt có những trận mưa lớn như tổng lượng mưa hai ngày 04 và 05 tháng 04 năm 1996 tại trạm Thanh Bình đạt 133 mm thì lượng dòng chảy có sự gia tăng đáng kể, lượng dòng chảy cao gần gấp 3 lần so với dòng chảy ngày 07/4/1996 khi có mưa nhỏ, tại trạm Đại Nga đạt 104,7 mm thì lượng dòng chảy cao gần gấp 5 lần so với dòng chảy ngày 07/4/1996. Tuy nhiên, cũng có những trận mưa chỉ diễn ra trong một ngày nhưng lượng phổ biến từ 30-40 mm, thì lượng dòng chảy phía hạ nguồn các công trình thủy điện dao động không đáng kể. Sau khi thủy điện vận hành, dòng chảy mùa cạn tại trạm thủy văn Đại Nga rất thấp (nhỏ hơn $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$), do vậy tương quan này được đánh giá là thấp (Hình 8a, 8b).



Hình 8. (a) Tương quan mưa trái mùa - dòng chảy trên lưu vực sông Đồng Nai trước khi có ảnh hưởng của thủy điện (trạm Đại Nga); (b) Tương quan mưa trái mùa - dòng chảy trên lưu vực sông Đồng Nai sau khi có ảnh hưởng của thủy điện (trạm Đại Nga).

4. Kết luận

Mưa trái mùa là những trận mưa mang tính chất bất thường về cả thời gian lẫn cường độ; với 2 tiêu chí lượng mưa ở cấp vừa trở lên và xảy ra trên 50% số trạm trong thời kỳ mùa khô (thời gian tính toán từ năm 1993-2022) thì đưa ra kết luận về mưa trái mùa ở khu vực Tây Nguyên như sau: Có khoảng 350 đến 400 đợt mưa, mỗi đợt kéo dài khoảng 01-02 ngày; Hàng năm có khoảng 12-13 đợt mưa, tập trung vào tháng 4 và tháng 11 hàng năm. Tháng 01 là tháng có số đợt mưa ít nhất.

Sự phân phối dòng chảy giữa mùa lũ và mùa cạn hàng năm trên khu vực Tây Nguyên rất mất cân đối. Lưu lượng dòng chảy phân bố rõ rệt giữa mùa lũ và mùa cạn, tổng lượng dòng chảy mùa lũ trên các sông suối chiếm từ 65-78% tổng lượng dòng chảy năm, tổng lượng dòng chảy mùa cạn chiếm từ 12-35% tổng lượng dòng chảy năm. Thời gian đầu mùa mưa, lượng mưa chủ yếu tham gia vào quá trình thấm và điền trũng nên chưa tạo thành dòng chảy mặt để bổ sung vào nguồn nước sông suối. Các tháng đầu mùa mưa, lượng dòng chảy mặt và dòng chảy ngầm nhỏ chưa đủ gây ra những trận lũ lớn.

Mưa trái mùa trên khu vực Tây Nguyên có những ảnh hưởng đáng kể đến nguồn nước trên các hệ thống sông, suối. Trong phạm vi nghiên cứu, tác giả chia làm hai thời kỳ để đánh giá dòng chảy trên các sông suối gồm trước và sau khi có hoạt động của các nhà máy thủy điện. Trước khi các nhà máy thủy điện đi vào hoạt động, vận hành thì dòng chảy thường có

sự biến đổi rõ rệt khi có mưa trái mùa. Các nhà máy thủy điện đi vào hoạt động đều đã có những tác động sẽ ảnh hưởng rất lớn đến lượng dòng chảy qua các trạm thủy văn. Bởi lượng dòng chảy đã bị các công trình thủy điện giữ lại, nên khi trên lưu vực có những trận mưa trong một ngày với lượng mưa phổ biến từ 30-40 mm, thì lượng dòng chảy phía hạ nguồn các công trình thủy điện dao động không đáng kể, điều này chứng tỏ rằng lượng nước đã được các công trình giữ lại gần hết.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: L.V.H., V.A.T., N.T.T.; Xử lý số liệu: V.T.N.M., L.P.T.; Viết bản thảo bài báo: T.X.H., L.T.T.Q.; Chính sửa bài báo: L.T.T.Q.

Lời cảm ơn: Bài báo hoàn thành nhờ vào kết quả của nhiệm vụ: “Nghiên cứu dự báo các đợt mưa trái mùa tích hợp mô hình thủy văn dự báo nguồn nước khu vực Tây Nguyên thời hạn 3 tháng”.

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. Endo, N.; Matsumoto, J.; Lwin, T. Trends in precipitation extremes over Southeast Asia. *SOLA* **2009**, 5, 168–171. Doi:10.2151/sola.2009-043.
2. Jin, H.; Jinch, Z.; Zengxin, Z.; Shanlei, S.; Jian Y. Simulation of extrem precipitation indices in the Yangtze river basin using statistical downscaling method (SDSM). *Theor. Appl. Climatol.* **2012**, 108, 325–343. Doi: 10.1007/s00704-011-0536-3.
3. Mito, Y.; Ismail, M.A.M.; Yamamoto, T. Multidimensional scaling and inverse distance weighting transform for image processing of hydrogeological structure in rock mass. *J. Hydrol.* **2011**, 411(1), 25–36.
4. Wang, B. The Asian monsoon. Springer-praxis Books in Environmental Science, 2006, pp. 683.
5. Khanh, N.V.; Thủy, Đ.L. Nguyên nhân và quy luật của thời tiết mưa lớn, “mưa trái mùa” vùng Bắc Trung Bộ (giai đoạn 1987-2006). *Tạp chí các khoa học về trái đất* **2009**, 31(3), 279–286.
6. Dũng, P.T. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ “Nghiên cứu xây dựng công nghệ dự báo thủy văn hạn vừa hạn dài mùa cạn phục vụ Quy trình vận hành liên hồ chứa cho các sông chính ở khu vực Tây Nguyên”, 2019.
7. Ngử, N.Đ. Khí hậu và biến đổi khí hậu Tây Nguyên. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2017.
8. Ngử, N.Đ. Khí hậu Tây Nguyên. Viện Khí tượng Thủy văn, Hà Nội, 1985.
9. Ngử, N.Đ. Tác động của ENSO đến hạn hán ở Miền Trung và Tây Nguyên Việt Nam. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2005**, 530, 1–15.
10. Tân, P.V. Phương pháp thống kê trong khí hậu. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội, Hà Nội, 2008.
11. Tân, P.V. và cs. Sự biến đổi của ngày bắt đầu mùa mưa ở Tây Nguyên và khả năng dự báo. *Tạp chí khoa học ĐHQG Hà Nội: Các khoa học trái đất và môi trường* **2016**, 32(3S), 1–18.
12. Châm, P.T. Nghiên cứu ngày bắt đầu gió mùa hè và mùa mưa ở Tây Nguyên. Luận văn thạc sĩ khoa học, 2017.
13. Tăng, B.M. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ “Nghiên cứu xây dựng công nghệ dự báo mưa lớn thời hạn 2-3 ngày phục vụ công tác cảnh báo sớm lũ lụt tại khu vực miền Trung Việt Nam”, 2014.
14. Cường, H.Đ. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Bộ “Nghiên cứu xây dựng phương pháp dự báo thời điểm bắt đầu và kết thúc mùa mưa gió mùa hè khu vực Trung Bộ, Tây Nguyên và Nam Bộ”, 2018.

15. Vân, N.K.; Thủy, Đ.L. Nguyên nhân và quy luật của thời tiết mưa lớn, mưa lớn trái mùa vùng Bắc Trung Bộ (giai đoạn 1987-2006). *VN J. Earth Sci.* **2009**, *31*(3), 279–286.
16. Trực tuyến: <https://qrt.vn/khi-tuong-thuy-van/tuyen-truyen-kien-thuc-ve-mua-lon-va-ky-nang-phong-chong-truoc-trong-va-sau-mua-lon/>
17. Trực tuyến: <http://kttv.angiang.gov.vn/kien-thuc-kttv?a=I6#:~:text=Thu%E1%BA%ADt%20ng%E1%BB%AF%20trong%20d%E1%BB%B1%20b%C3%A1o%20C6%B0%E1%BB%A3ng%20m%C6%B0a%3A&text=%2D%20M%C6%B0a%20v%E1%BB%ABa%3A%20I%C6%B0%E1%BB%A3ng%20m%C6%B0a%20t%E1%BB%AB,tr%C3%AA%20100.0mm%2F24%20gi%E1%BB%9D>.
18. Thủ tướng Chính phủ. Quyết định Quy định về dự báo, cảnh báo, truyền tin thiên tai và cấp độ rủi ro, 2021.
19. Trực tuyến: <http://vnmha.gov.vn/pho-bien-kien-thuc-125/cau-44--the%3F-na%3Fola%3F-mua-ra%3Fi-ra%3Fc-the%3F-na%3Fo-la%3F-mua-nhie%3Fu-noi-795.html>.
20. Đài Khí tượng Thủy văn khu vực Tây Nguyên. Đặc điểm Khí tượng Thủy văn năm 2023. 2023.
21. Thắng, N.V. và cs. Nghiên cứu xây dựng hệ thống dự báo, cảnh báo hạn hán cho Việt Nam với thời hạn đến 3 tháng. Báo cáo tổng kết đề tài cấp Nhà nước thuộc Chương trình KC.08.17/11-15. Bộ Khoa học và Công nghệ, 2015.
22. Huy, N.S. và cs. Thủy văn sông ngòi Tây Nguyên. 1980.
23. Sơn, N.T. Tính toán thủy văn. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội, 2003.
24. Khải, N.H. Phân tích thống kê trong thủy văn. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội, 2006.
25. Tiêu chuẩn Việt Nam. Tính toán đặc trưng thủy văn thiết kế, 2022.

Impact of unseasonal rain on water resources on major rivers in the Central Highlands

Le Van Hung¹, Tran Xuan Hien¹, Vu Anh Tuan¹, Le Thi Thanh Quynh^{1*}, Le Phuong Thuy¹, Vu Thi Ngoc Mai¹, Nguyen Thi Tuyet²

¹ Central Highlands Regional Hydro-Meteorological Center; lehungkttvtn@gmail.com; xuanhien67@yahoo.com.vn; tuankttvtn@gmail.com; thanhquynh105@gmail.com; phuongthuykttvtn@gmail.com; ngocmaivt1209@gmail.com

² Ho Chi Minh City University of Natural Resources and Environment; nttuyet@hcmunre.edu.vn

Abstract: The article presents the results of assessing the impact of unseasonal rain on water on major rivers in the Central Highlands. Using unseasonal rain data from 1993 - 2022 of 18 Meteorological Station and 22 rain gauges and discharge data at 12 hydrological stations in the Central Highlands, through statistical calculation methods, trend calculation methods, linear methods, and formula methods. The results show that: The dry season in the Central Highlands lasts from November to April of the following year, the average total rainfall in the dry season months is commonly from 160 to 500 mm and the average monthly rainfall is about 40 to 90mm/month. Unseasonal rains have had positive impacts on surface flows in the dry season, improving the water situation for people's daily life and irrigation, especially in areas far from irrigation works; reducing the temperature and the risk of forest fires in the basins. In addition, unseasonal rains also have negative impacts on water resources in river basins. For basins with small areas, large slopes, urban areas, densely populated areas, and areas prone to landslides, unseasonal rains can cause floods, inundation, and landslides... affecting people's lives.

Keywords: Unseasonal rains; Water source; Central Highlands.

Bài báo khoa học

Đánh giá ảnh hưởng của gió tới thời gian tiếp cận khu vực cần tìm kiếm, cứu nạn trên biển, áp dụng thí điểm ở vịnh Bắc Bộ

Nguyễn Quang Minh^{1,2}, Nguyễn Văn Trung^{2,3*}

¹ Cục Bản đồ - Bộ Tổng tham mưu; nguyenguangminh.sar@gmail.com

² Trường Đại học Mở - Địa chất; nguyenvantrung@humg.edu.vn

³ 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: 9/10/2024; Ngày phản biện xong: 28/11/2024; Ngày đăng bài: 25/4/2025

Tóm tắt: Tai nạn hàng hải là sự cố trên biển xảy ra thường xuyên ở Việt Nam - một quốc gia có vùng biển rộng và đường bờ biển dài, nhất là trong điều kiện chịu ảnh hưởng của biến đổi khí hậu. Để hỗ trợ xây dựng các phương án tìm kiếm, cứu nạn (search and rescue - SAR) trên biển, việc xác định thời gian tiếp cận các khu vực xảy ra sự cố là rất quan trọng. Trong nghiên cứu, 07 lớp dữ liệu bao gồm: (1) dữ liệu tàu tìm kiếm, cứu nạn; (2) tốc độ gió điều chỉnh (3) hướng gió; (4) gia tốc trọng trường, (5) độ sâu đáy biển, (6) dữ liệu ảnh đất liền-mặt nước và (7) vị trí các trạm tìm kiếm, cứu nạn được sử dụng để xác định thời gian tiếp cận vị trí xảy ra sự cố trên biển. Để đánh giá ảnh hưởng của gió tới thời gian tiếp cận vị trí xảy ra sự cố ở khu vực vịnh Bắc Bộ, trong nghiên cứu này đã thử nghiệm với các hướng gió (0° , 45° , 135° , 180°) và tốc độ gió khác nhau (5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 25 m/s). Kết quả nhận được cho thấy, hướng gió và tốc độ gió có ảnh hưởng quan trọng đến kết quả xác định thời gian phản hồi trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Kết quả của nghiên cứu này cũng cung cấp cơ sở khoa học và thông tin hữu ích giúp các nhà quản lý xây dựng phương án tìm kiếm, cứu nạn phù hợp với điều kiện khí hậu trên biển.

Từ khóa: SAR; Thời gian phản hồi; Hướng gió; Tốc độ gió; Vịnh Bắc Bộ.

1. Mở đầu

Những năm qua, thiên tai trên thế giới cũng như ở Việt Nam diễn ra ngày càng phức tạp, bất thường, đặc biệt trong bối cảnh của biến đổi khí hậu (BĐKH). Theo Báo cáo đánh giá khí hậu quốc gia năm 2021 của Bộ Tài nguyên Môi trường cho thấy, Việt Nam là một trong những nước bị ảnh hưởng nghiêm trọng nhất của BĐKH, trong đó có các thiên tai như bão, lũ, hạn hán, nước biển dâng...[1]. Nước ta có đường bờ biển dài và diện tích vùng biển rộng với nhiều tuyến vận tải biển do đó các tai nạn, sự cố trên biển xảy ra với tần suất cao gây thiệt hại lớn về người và tài sản. Do đặc điểm riêng của khu vực biển, việc tiếp cận các khu vực xảy ra sự cố gặp rất nhiều khó khăn, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả công tác tìm kiếm, cứu nạn trên biển.

Công tác chuẩn bị, ứng phó với các tình huống tìm kiếm, cứu nạn trên biển cần thiết phải khẩn trương về thời gian cũng như sự hiệu quả trong công tác tổ chức triển khai. Để nâng cao hiệu quả công tác tìm kiếm, cứu nạn trên biển, nhiều nghiên cứu trên thế giới đã phát triển các mô hình phát hiện vị trí xảy ra sự cố và ước lượng thời gian tối ưu để tiếp cận dựa trên các dữ liệu về phương tiện di chuyển, hướng và tốc độ dòng chảy, tốc độ gió và độ cao sóng biển,...[2-6]. Nghiên cứu [7] đã xác định thời gian phản hồi sử dụng công nghệ GIS

trong công tác tìm kiếm, cứu nạn với các sự cố do hoạt động trên biển ở vịnh Phần Lan với các thông tin đầu vào gồm dữ liệu sự cố, các thông số kỹ thuật của tàu tìm kiếm, cứu nạn (SAR - Search and Rescue), chiều cao sóng biển, tốc độ và hướng gió biển. Nghiên cứu [8] phát triển một mô hình tính toán quãng đường di chuyển và chi phí dựa trên nền tảng GIS để phục vụ cứu nạn trên biển sử dụng các dữ liệu đầu vào gồm hướng gió, hướng sóng (swell direction) và chiều cao sóng biển cũng như các thông tin tàu phục vụ cứu nạn. Tại 03 khu vực thử nghiệm thuộc vùng biển Hoa Kỳ, Burns đã xây dựng được các bản đồ thể hiện thời gian phản hồi khi có sự cố xảy ra trên biển. Nghiên cứu của [9] đã đề xuất một mô hình kết hợp nhằm tối ưu hóa mô phỏng phân bổ máy bay trực thăng phục vụ tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Đầu tiên, trong nghiên cứu đã xây dựng mô hình lập trình tuyến tính số nguyên (ILP - Integer Linear Programming) để cung cấp kế hoạch triển khai hiệu quả và sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho mô hình để mô phỏng bao gồm các ràng buộc mà mô hình ILP không thể giải quyết. Tiếp theo, bằng cách sử dụng thuật toán dựa trên quy tắc kết hợp, trong nghiên cứu đã tạo ra các giải pháp thay thế và tìm kiếm các kế hoạch tốt hơn tồn tại trong vùng lân cận của giải pháp mô hình ILP. Sử dụng dữ liệu sự cố lịch sử ở khu vực Biển Aegean và các lớp thông tin như loại sự cố, nguồn lực sẵn có, điều kiện môi trường, khả năng của trạm SAR..., trong nghiên cứu đã chứng minh được phương pháp kết hợp giúp sử dụng tài nguyên hiệu quả hơn so với chỉ sử dụng mô hình tối ưu hóa. Phương pháp xây dựng mô hình được sử dụng trong nghiên cứu [10] nhằm xác định đường đi đến khu vực xảy ra sự cố với điều kiện giảm thiểu thời gian bằng máy bay trên cơ sở các lớp thông tin về phương tiện sử dụng để cứu nạn gồm mức tiêu thụ nhiên liệu, tải trọng và năng lực sân bay. Trong nghiên cứu [11] có đề xuất một thuật toán xác định vị trí tối ưu cho các trạm tìm kiếm, cứu nạn trên biển, bao gồm 4 bước: (1) lựa chọn các đảo trên biển có thể xây dựng trạm SAR; (2) ước tính nhu cầu SAR tiềm năng; (3) tính thời gian phản hồi từ các trạm dự kiến đến bất kỳ vị trí nào trên biển và (4) lựa chọn vị trí đặt trạm SAR. Kết quả nhận được trong nghiên cứu cho thấy, phương pháp đề xuất cho phép giảm thời gian tiếp cận trung bình đối 1,09 giờ với khu vực Biển Đông với 6 trạm SAR được thiết lập trên các đảo. Phạm vi bao phủ hoạt động SAR cũng tăng từ 62,63% lên 80,02% diện tích Biển Đông với ngưỡng thời gian tìm kiếm, cứu nạn là 6 giờ. Một nghiên cứu đánh giá hiệu suất của các hoạt động tìm kiếm, cứu nạn sử dụng mô hình dựa trên tác nhân (ABM - agent based modelling) hướng đến giải quyết các vấn đề liên quan đến điều kiện thời tiết đặc thù ở Bắc Cực. Phương pháp sử dụng dữ liệu lịch sử về sự bất thường của điều kiện thời tiết trên biển để mô hình hóa động lực. Sau đó, quy trình đánh giá được sử dụng để định lượng tác động của các yếu tố thời tiết phục vụ cho các hoạt động của lực lượng cứu hộ cũng như tổng thời gian cứu hộ. Tại khu vực thử nghiệm ở Biển Barents (Na Uy) cho thấy, tổng thời gian giải cứu dài nhất là từ tháng 12 đến tháng 2 và thời gian giải cứu ngắn nhất là từ tháng 5 đến tháng 8 [12].

Có thể nhận thấy, cho đến nay trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu sử dụng phương pháp mô hình hóa dựa trên nền tảng GIS nhằm xác định khoảng cách, thời gian tối ưu trong tiếp cận tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Ngoài ra, các nghiên cứu ở Việt nam đã ứng dụng công nghệ GIS phục vụ tìm kiếm, cứu nạn trên biển [19–21], các nghiên cứu về ảnh hưởng của mưa, bão trên biển ở vịnh Bắc Bộ [22, 23]. Các nghiên cứu đều cho thấy vai trò quan trọng của điều kiện khí tượng, hải văn ảnh hưởng đến thời gian tiếp cận khu vực xảy ra sự cố trên biển. Trong các mô hình hỗ trợ hoạt động tìm kiếm, cứu nạn trên biển, thông tin về gió (tốc độ gió, hướng gió) có vai trò chủ yếu [24, 25]. Hướng gió ảnh hưởng đến sự di chuyển của các tàu tìm kiếm, cứu nạn, trong đó có thể tạo ra lực đẩy hoặc lực cản đối với tàu thuyền [7]. Trong khi đó, tốc độ gió ảnh hưởng đến chiều cao sóng và biến động bề mặt biển, cũng như việc duy trì định vị và điều khiển tàu thuyền trên biển. Ngoài ra, gió mạnh cũng tạo ra lực đẩy lớn, có thể làm tăng tốc độ di chuyển của tàu hoặc ngược lại, tùy thuộc vào hướng gió tương đối với hướng di chuyển [13].

Bài báo này trình bày kết quả đánh giá ảnh hưởng của gió (hướng gió, tốc độ gió) đến thời gian tiếp cận khu vực xảy ra sự cố trên biển của các tàu tìm kiếm, cứu nạn. Phương pháp

mô hình hóa được sử dụng để xác định thời gian phản hồi từ các trạm tìm kiếm, cứu nạn tới các vị trí xảy ra sự cố trên cơ sở dữ liệu đầu vào gồm các lớp thông tin về địa hình [26–28], khí tượng, hải văn, tàu SAR, các trạm SAR. Sau đó, trong nghiên cứu thử nghiệm với các kịch bản hướng gió và tốc độ gió khác nhau để đánh giá ảnh hưởng của gió đến thời gian tiếp cận các vị trí xảy ra sự cố trên khu vực biển vịnh Bắc Bộ.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Đặc điểm khu vực nghiên cứu

Vịnh Bắc Bộ nằm ở phía Tây Bắc của Biển Đông có diện tích khoảng 126.250 km² là một trong những vịnh nước mặn lớn trên thế giới với chiều ngang rộng nhất khoảng 310 km và hẹp nhất khoảng 207 km. Bờ Vịnh Bắc Bộ kéo dài thuộc hai quốc gia trong đó có 10 tỉnh, thành phố của Việt Nam với tổng chiều dài khoảng 763 km và hai tỉnh của Trung Quốc với tổng chiều dài khoảng 695 km.

Vịnh Bắc Bộ có cửa chính được xác định là đường thẳng từ đảo Cồn Cỏ, tỉnh Quảng Trị, Việt Nam và mũi Oanh Ca, Hải Nam, Trung Quốc, rộng khoảng 200 km. Dải bờ Tây Vịnh Bắc Bộ có các vũng vịnh, châu thổ, cửa sông hình phễu, đầm phá và các đảo tập trung ở vùng ven bờ với trên 2.378 hòn đảo [14]. Bên cạnh đó, vùng bờ biển Móng Cái - Đồ Sơn có chiều dài khoảng 180 km; lục địa ven biển khu vực này có dạng vùng núi thấp bị chia cắt mạnh và phân chia thành các dải vòng cung thấp dần về hướng biển. Ngoài ra, vùng bờ Đồ Sơn - Lạch Trường với độ dài khoảng 150 km có địa hình thấp, bằng phẳng và trung bình 20 km có một cửa sông lớn. Đáy biển khu vực này thoải và nông, với bán kính 15-20 km có độ sâu nhỏ hơn 10 m [14, 15].

Bão là hiện tượng thiên tai phổ biến tại Vịnh Bắc Bộ. Theo số liệu thống kê, giai đoạn 1961-2018 có 418 cơn bão và áp thấp nhiệt đới đổ bộ vào vùng biển Việt Nam, trong đó khu vực Bắc Trung Bộ thuộc vịnh Bắc Bộ chịu ảnh hưởng nhiều nhất [1]. Biến đổi khí hậu đã khiến các cơn bão thay đổi về cường độ và tần suất xuất hiện. Từ 2016 đã xuất hiện những cơn siêu bão với sức gió từ cấp 16 trở lên [1]. Đặc điểm này dẫn đến tình trạng tại nạn, sự cố trên biển khu vực vịnh Bắc Bộ diễn ra thường xuyên, phức tạp [16], đòi hỏi công tác tìm kiếm, cứu nạn phải tiến hành khẩn trương, kịp thời.

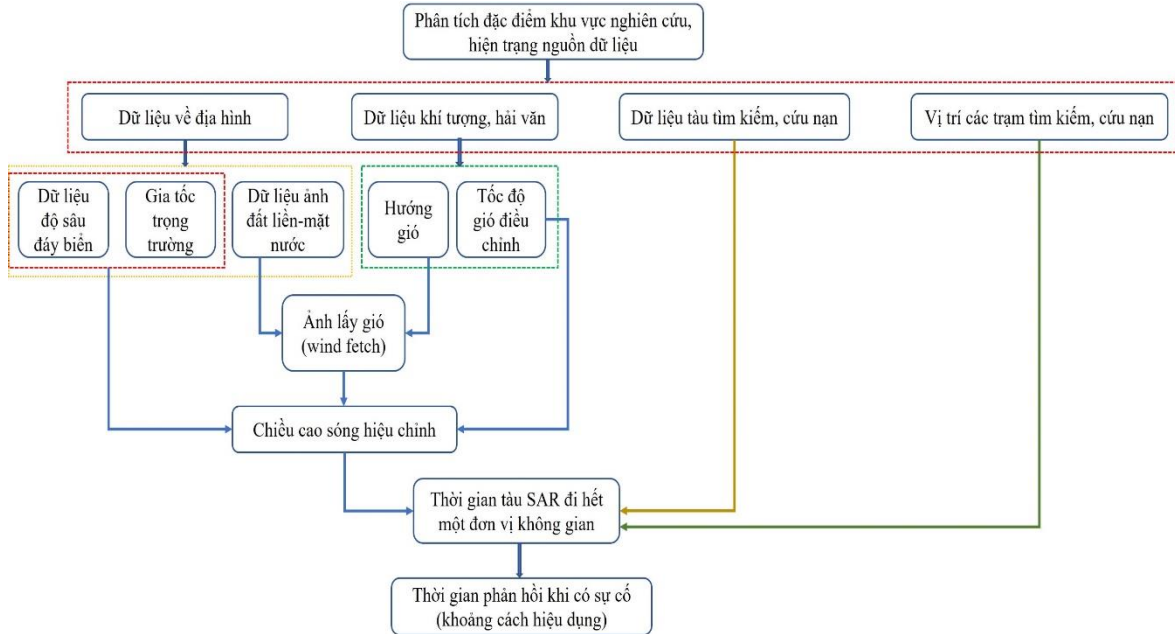
2.2. Dữ liệu sử dụng

Trong nghiên cứu này, 07 lớp dữ liệu bao gồm: (1) Dữ liệu tàu tìm kiếm, cứu nạn; (2) tốc độ gió điều chỉnh (3) hướng gió; (4) gia tốc trọng trường, (5) độ sâu đáy biển, (6) dữ liệu ảnh đất liền-mặt nước và (7) vị trí các trạm tìm kiếm, cứu nạn được sử dụng để xác định thời gian phản hồi (thời gian tiếp cận khu vực xảy ra sự cố trên biển từ các trạm SAR). 05 trạm SAR trên khu vực vịnh Bắc Bộ được sử dụng để xác định thời gian tiếp cận đến các vị trí xảy ra sự cố (07 vị trí giả định). Các trạm SAR bao gồm: Bạch Long Vỹ (Hải Phòng), Cồn Cỏ (Quảng Bình), Cửa Sốt (Hà Tĩnh), Hải Phòng (Hải Phòng), Sầm Sơn (Thanh Hóa), trong đó có 02 trạm đặt tại các đảo trên biển khu vực vịnh Bắc Bộ và 03 trạm ở khu vực ven biển. Tàu SAR được sử dụng trong nghiên cứu này là tàu KN-579 của Cục Kiểm ngư (Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn) có vận tốc tối đa 25 hải lý/giờ. Các lớp dữ liệu này được thu thập tại Cục Cứu hộ cứu nạn (Bộ Quốc phòng). Phương pháp xây dựng các lớp dữ liệu đầu vào và xác định thời gian phản hồi từ các trạm SAR đến các vị trí xảy ra sự cố trên biển được trình bày trong nghiên cứu [18].

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Hình 1 trình bày sơ đồ quy trình xác định thời gian phản hồi từ các trạm SAR đến các vị trí xảy ra sự cố trên biển (hay thời gian di chuyển từ các trạm SAR đến khu vực xảy ra sự cố) bằng phương pháp mô hình hóa dựa trên 07 lớp dữ liệu đầu vào. Trong sơ đồ quy trình này, dữ liệu ảnh đất liền - mặt nước và hướng gió được sử dụng để xác định ảnh lầy gió (*wind*

fetch) theo phương pháp SPM [17]. Trong khi đó, dữ liệu về độ sâu đáy biển, gia tốc trọng trường và tốc độ gió điều chỉnh được sử dụng để tính chiều cao sóng hiệu chỉnh theo phương pháp được tham khảo từ Sổ tay Kỹ thuật bờ biển [17]. Kết hợp với dữ liệu tàu SAR và vị trí các trạm SAR, trong nghiên cứu xác định được thời gian tàu tìm kiếm, cứu nạn đi hết 01 đơn vị không gian (01 pixel, kích thước 100 m × 100 m) và tính được thời gian phản hồi từ các trạm SAR tới các vị trí xảy ra sự cố trên biển. Sau đó, để đánh giá ảnh hưởng của gió tới thời gian tiếp cận các vị trí xảy ra sự cố trên biển, các hướng gió và tốc độ gió khác nhau sẽ được thử nghiệm để xác định thời gian phản hồi từ các trạm SAR.



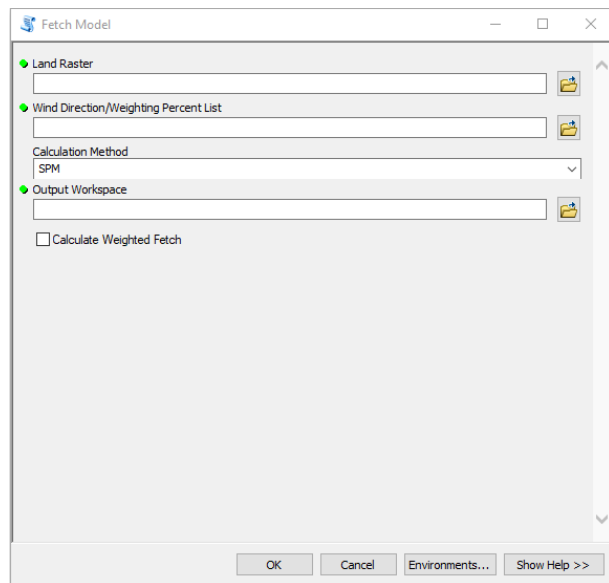
Hình 1. Quy trình xử lý dữ liệu phục vụ tính toán khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Xây dựng công cụ xác định thời gian phản hồi

Trong nghiên cứu đã xây dựng công cụ để tính toán ảnh lấy gió (*wind fetch*), chiều cao sóng biển, và thời gian phản hồi từ các trạm SAR tới các vị trí xảy ra sự cố trên biển. Ngôn ngữ lập trình được lựa chọn sử dụng là Python. Đây là một ngôn ngữ hiện đại, được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng web, phát triển phần mềm, khoa học dữ liệu. Python có ưu điểm đơn giản và hiệu quả trong xử lý dữ liệu không gian. Ngoài ra, các ngôn ngữ lập trình phổ biến khác như Java, C, C++ có thể cũng được lựa chọn sử dụng.

Giao diện module tính toán lấy gió được thể hiện trên Hình 2, trong đó bộ dữ liệu đầu vào bao gồm: Land raster (lớp dữ liệu đất liền - mặt nước), Wind direction (Hướng gió) và Phương pháp tính toán. Phương pháp tính toán này được cài đặt bao gồm thuật toán đơn (Single), SPM hạn chế (*SPM-Restricted*) và SPM. Không gian tính toán (*Output Workspace*) được lựa

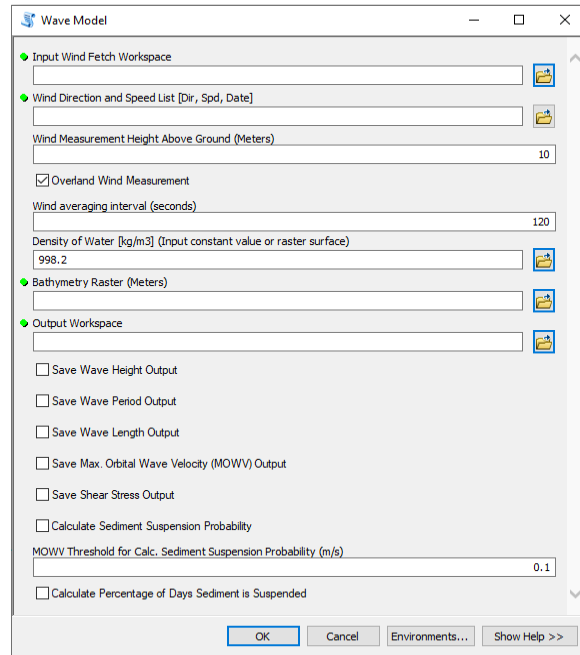


Hình 2. Giao diện module tính toán lấy gió.

chọn là thư mục không chứa các bộ dữ liệu có sẵn, thường lựa chọn là thư mục rỗng vì thư mục này sẽ được làm sạch trước khi tính toán lấy gió.

Hình 3 mô tả giao diện module tính toán chiều cao sóng, trong đó dữ liệu đầu vào bao gồm: ảnh lấy gió (được xác định ở bước trên), hướng gió và tốc độ gió (dữ liệu được mô tả dạng file .txt).

Để tính toán thời gian tiếp cận các vị trí cần tìm kiếm, cứu nạn trên biển, trong nghiên cứu sử dụng công cụ *Cost Distance* trong bộ phần mềm ArcMap. Công cụ *Cost Distance* cần xác định hai tham số đầu vào bao gồm: vị trí các trạm SAR và thời gian đi hết một đơn vị không gian (kích thước 100×100 m).



Hình 3. Giao diện module tính toán chiều cao sóng.

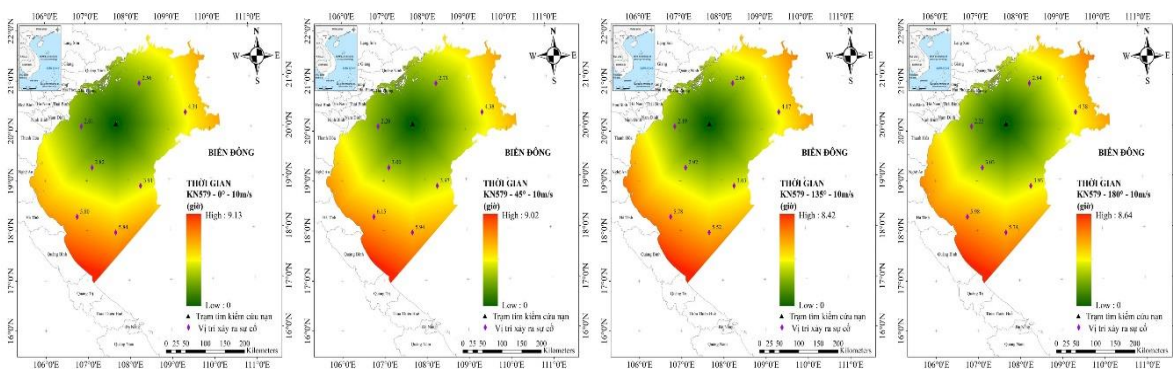
3.2. Đánh giá ảnh hưởng của hướng gió đến thời gian phản hồi

Để đánh giá ảnh hưởng của hướng gió đến thời gian tiếp cận các vị trí xảy ra sự cố, trong nghiên cứu lựa chọn thử nghiệm với tàu KN-579 của Cục Kiểm ngư (Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn) có tốc độ cao nhất đạt 25 hải lý/giờ. Tốc độ gió được lấy cố định là 10 m/s với các hướng gió khác nhau, bao gồm: 0°, 45°, 180°. Đây là các hướng gió biển có tần suất phổ biến ở khu vực vịnh Bắc Bộ (Bảng 1, nguồn Cục cứu nạn, cứu hộ, Bộ Quốc phòng).

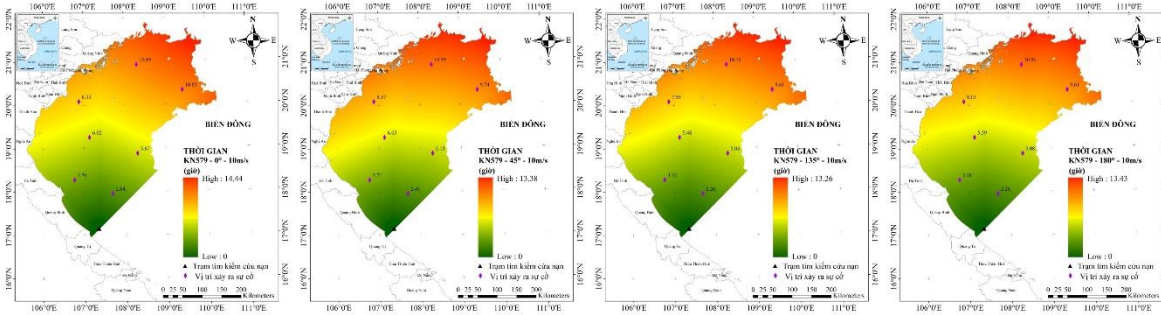
Bảng 1. Tần suất hướng gió thu thập tại Vịnh Bắc Bộ.

Hướng gió	Góc	Tần suất	Tỉ lệ %
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%

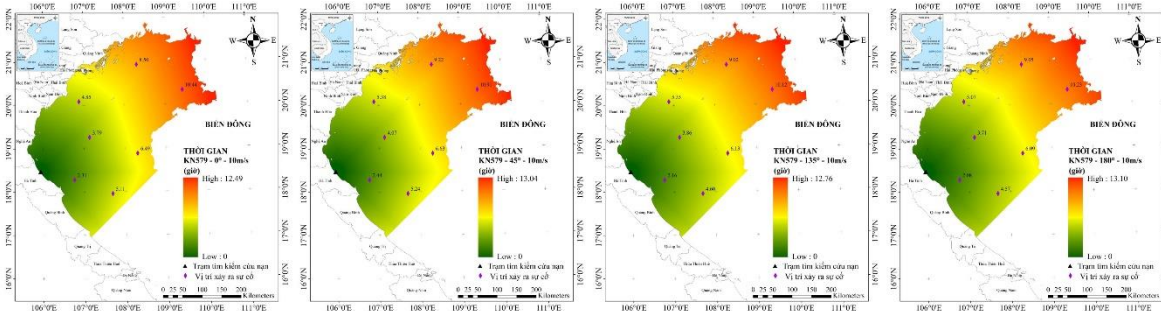
Hình 4-8 trình bày kết quả xác định thời gian tiếp cận 07 vị trí giả định xảy ra sự cố trên biển khu vực vịnh Bắc Bộ từ 05 trạm tìm kiếm, cứu nạn (Bạch Long Vỹ, Cồn Cỏ, Cửa Sốt, Hải Phòng, Sầm Sơn) với các hướng gió khác nhau: 0°, 45°, 135° và 180°. Bảng 2 thể hiện thời gian tiếp cận từ 05 trạm tìm kiếm, cứu nạn tới 07 vị trí xảy ra sự cố trên biển khu vực nghiên cứu với các hướng gió khác nhau (tốc độ gió mặc định là 10 m/s).



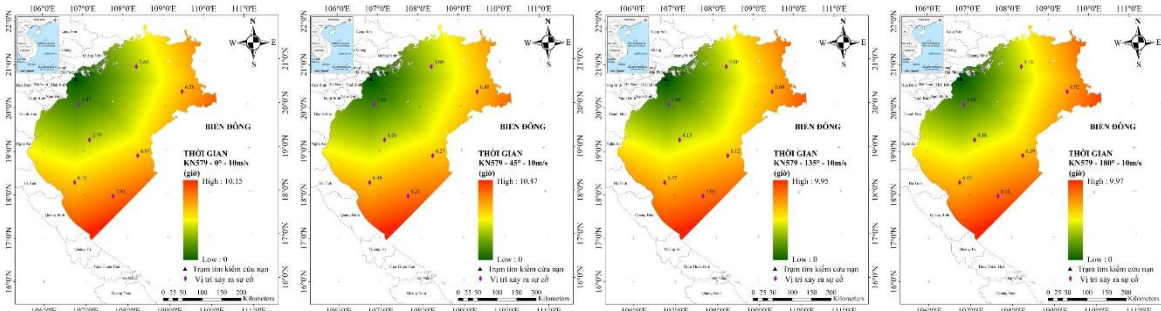
Hình 4. So sánh thời gian phản hồi của tàu KN-579 xuất phát từ trạm Bạch Long Vỹ với các hướng gió 0°, 45°, 135° và 180°, tốc độ gió 10 m/s.



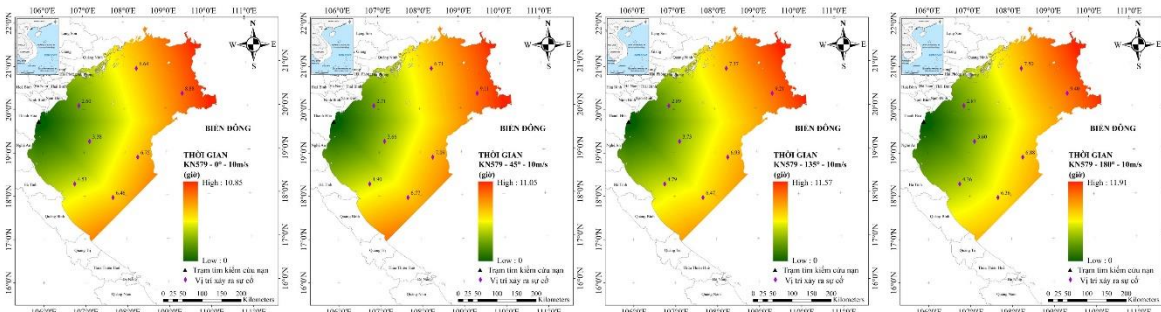
Hình 5. So sánh thời gian phản hồi của tàu KN-579 xuất phát từ trạm Cồn Cỏ với các hướng gió 0°, 45°, 135° và 180°, tốc độ gió 10 m/s.



Hình 6. So sánh thời gian phản hồi của tàu KN-579 xuất phát từ trạm Cửa Sốt với các hướng gió 0°, 45°, 135° và 180°, tốc độ gió 10 m/s.



Hình 7. So sánh thời gian phản hồi của tàu KN-579 xuất phát từ trạm Hải Phòng với các hướng gió 0°, 45°, 135° và 180°, tốc độ gió 10m/s.



Hình 8. So sánh thời gian phản hồi của tàu KN-579 xuất phát từ trạm Sầm Sơn với các hướng gió 0°, 45°, 135° và 180°, tốc độ gió 10 m/s.

Phân tích kết quả đạt được cho thấy, hướng gió có ảnh hưởng đáng kể tới thời gian tiếp cận khu vực xảy ra sự cố từ các trạm tìm kiếm, cứu nạn. Ví dụ, từ trạm Bạch Long Vỹ, với hướng gió 0°, thời gian tiếp cận các vị trí xảy ra sự cố (1, 2, 3, 4, 5, 6) là ngắn nhất. Với vị trí 7, thời gian tiếp cận ngắn nhất khi hướng gió là 180° (Bảng 2). Ngược lại, với trạm Cồn Cỏ, thời gian tiếp cận khu vực xảy ra sự cố với hướng gió 0° là cao nhất với các vị trí 1, 2, 6, 7, trong khi hướng gió 45° có thời gian tiếp cận ngắn nhất tới vị trí 1 còn hướng gió 180° cho phép tiếp cận vị trí 2, 3, 4, 5, 6 và 7 với thời gian ngắn nhất khi sử dụng tàu KN-579.

Bảng 2. Thời gian phản hồi từ các trạm tìm kiếm, cứu nạn tới 07 vị trí giả định xảy ra sự cố với các hướng gió khác nhau.

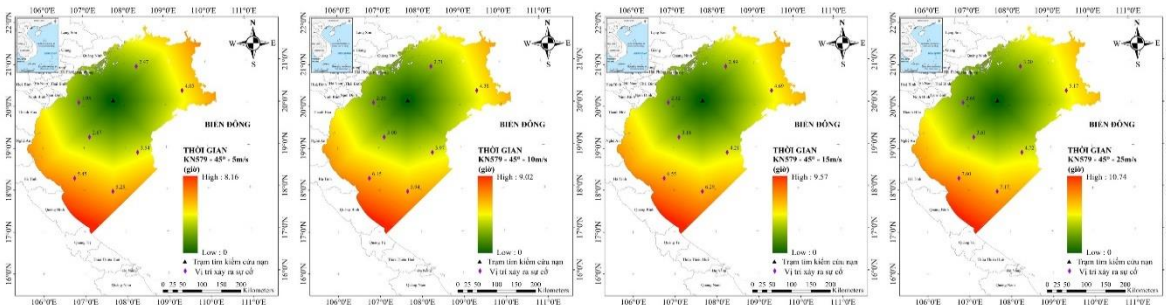
Vị trí sự cố	Thời gian phản hồi (khoảng cách hiệu dụng)																			
	Bạch Long Vỹ				Cồn Cỏ				Cửa Sốt				Hải Phòng				Sầm Sơn			
	0°	45°	135°	180°	0°	45°	135°	180°	0°	45°	135°	180°	0°	45°	135°	180°	0°	45°	135°	180°
1	2,56	2,71	2,68	2,84	10,95	10,55	10,12	10,56	8,50	9,22	9,02	9,05	3,64	3,69	4,00	4,16	6,64	6,71	7,37	7,50
2	4,34	4,38	4,17	4,38	10,83	9,74	9,61	9,61	10,44	10,91	10,12	10,23	6,36	6,48	6,60	6,92	8,88	9,11	9,21	9,40
3	2,01	2,20	2,19	2,25	8,33	8,57	7,95	8,03	4,85	5,38	5,35	5,07	1,47	1,52	1,68	1,66	2,60	2,71	2,89	2,87
4	2,82	3,00	2,92	3,03	6,02	6,03	5,48	5,59	3,79	4,07	3,86	3,71	3,79	4,06	4,15	4,18	3,38	3,66	3,73	3,60
5	3,91	3,97	3,63	3,93	5,87	5,13	5,06	5,08	4,69	6,63	6,13	6,09	6,07	6,27	6,12	6,39	6,75	7,09	6,93	6,88
6	5,80	6,15	5,78	5,98	3,76	3,71	3,32	3,28	2,31	2,44	2,16	2,08	6,10	6,48	6,47	6,43	4,53	4,90	4,79	4,36
7	5,84	5,94	5,52	5,74	2,64	2,41	2,26	2,26	5,11	5,24	4,60	4,57	7,93	8,21	7,93	8,13	6,46	6,77	6,47	6,36

Bảng 3. Thời gian phản hồi từ các trạm tìm kiếm, cứu nạn tới 07 vị trí giả định xảy ra sự cố với các tốc độ gió khác nhau.

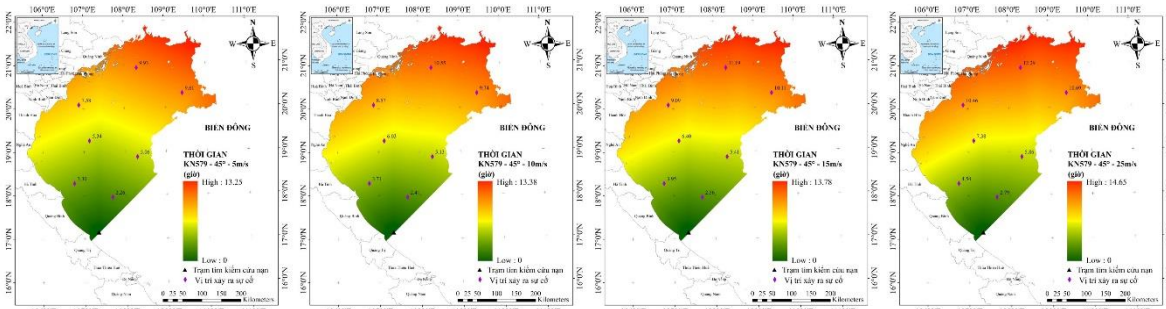
Vị trí sự cố	Thời gian phản hồi (khoảng cách hiệu dụng)																			
	Bạch Long Vỹ				Cồn Cỏ				Cửa Sốt				Hải Phòng				Sầm Sơn			
	5 m/s	10 m/s	15 m/s	25 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s	25 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s	25 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s	25 m/s	5 m/s	10 m/s	15 m/s	25 m/s
1	2,47	2,71	2,89	3,20	9,93	10,55	11,19	12,29	8,22	9,22	9,82	11,20	3,63	3,69	3,82	4,00	6,63	6,71	6,98	7,41
2	4,05	4,38	4,69	5,17	9,61	9,74	10,11	10,69	9,84	10,91	11,65	13,27	6,18	6,48	6,90	7,51	6,60	9,11	9,67	10,56
3	1,95	2,20	2,32	2,61	7,58	8,57	9,09	10,46	4,80	5,38	5,72	6,52	1,46	1,52	1,61	1,76	2,59	2,71	2,85	3,11
4	2,67	3,00	3,18	3,61	5,34	6,03	6,40	7,38	3,61	4,07	4,36	5,16	3,70	4,06	4,30	4,85	3,29	3,66	3,90	4,41
5	3,54	3,97	4,21	4,72	5,06	5,13	5,41	5,86	5,95	6,63	7,12	8,28	5,66	6,27	6,62	7,43	6,33	7,09	7,54	8,52
6	5,45	6,15	6,55	7,60	3,30	3,71	3,95	4,54	2,17	2,44	2,63	3,17	5,86	6,48	6,90	7,96	4,38	4,90	5,24	6,10
7	5,25	5,94	6,29	7,17	2,26	2,41	2,56	2,79	4,65	5,24	5,61	6,63	7,36	8,21	8,68	9,83	6,02	6,77	7,22	8,36

3.3. Đánh giá ảnh hưởng của tốc độ gió đến thời gian phản hồi

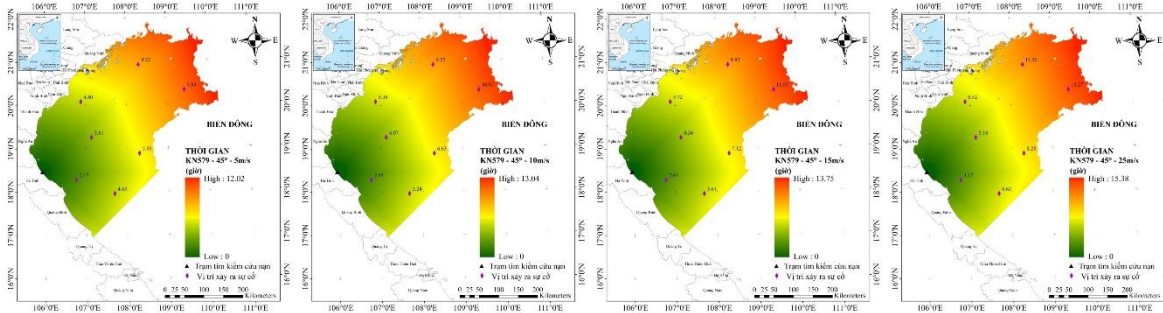
Tương tự như đánh giá ảnh hưởng của hướng gió, để đánh giá ảnh hưởng của tốc độ gió đến thời gian phản hồi trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển, trong nghiên cứu cũng sử dụng tàu KN-579, hướng gió 45° (cố định) với tốc độ gió khác nhau, bao gồm 5 m/s, 15 m/s và 25 m/s, trong đó tốc độ gió 25 m/s tương ứng với sức gió khi bão ở cấp 9, 10. Kết quả xác định thời gian phản hồi khi sử dụng tàu KN-579 của Cục Kiểm ngư với các tốc độ gió khác nhau được thể hiện trên các Hình 9-13. Bảng 3 thể hiện thời gian tiếp cận từ 05 trạm tìm kiếm, cứu nạn tới 07 vị trí giả định xảy ra sự cố trên biển khu vực vịnh Bắc Bộ với các tốc độ gió 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s và 25 m/s (hướng gió 45°).



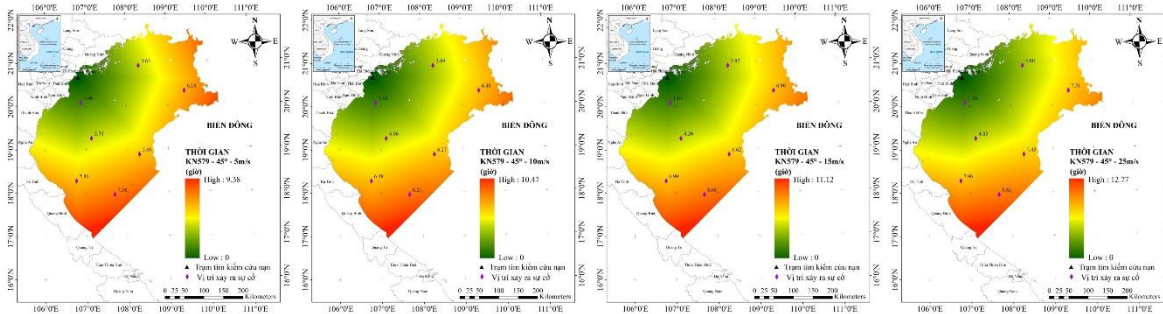
Hình 9. Thời gian phản hồi của tàu KN-579 từ trạm Bạch Long Vỹ, hướng gió 45°, tốc độ gió 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s và 25 m/s.



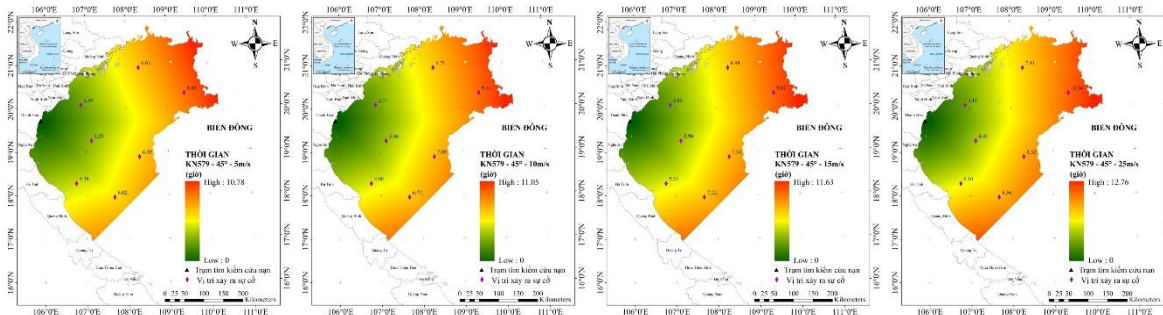
Hình 10. Thời gian phản hồi của tàu KN-579 từ trạm Cồn Cỏ, hướng gió 45°, tốc độ gió 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s và 25 m/s.



Hình 11. Thời gian phản hồi của tàu KN-579 từ trạm Cửa Sốt, hướng gió 45°, tốc độ gió 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s và 25 m/s.



Hình 12. Thời gian phản hồi của tàu KN-579 từ trạm Hải Phòng, hướng gió 45°, tốc độ gió 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s và 25 m/s.



Hình 13. Thời gian phản hồi của tàu KN-579 từ trạm Sầm Sơn, hướng gió 45°, tốc độ gió 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s và 25 m/s.

Phân tích kết quả đạt được trong Bảng 3 cho thấy, tốc độ gió có ảnh hưởng lớn đến thời gian tiếp cận các vị trí xảy ra sự cố trên biên khu vực vịnh Bắc Bộ từ 05 trạm tìm kiếm, cứu nạn và ảnh hưởng này được thể hiện rõ rệt hơn rất nhiều so với hướng gió. Trong đó, tốc độ gió càng lớn, thời gian tiếp cận khu vực gặp nạn càng dài (với hướng gió mặc định là 45°). Ví dụ, thời gian tiếp cận vị trí xảy ra sự cố 1 từ trạm Bạch Long Vỹ bằng tàu KN-579 với tốc độ gió 5 m/s là 2,47 giờ. Với tốc độ gió là 10 m/s, thời gian tiếp cận vị trí sự cố tăng lên thành 2,71 giờ và tiếp tục tăng lên khi tốc độ gió đạt 15 m/s (2,89 giờ). Với trường hợp tàu KN-579 xuất phát từ trạm Cồn Cỏ hoặc Cửa Sốt tới vị trí 1, chênh lệch giữa thời gian tiếp cận khi tốc độ gió là 5 m/s và 15 m/s đạt tới hơn 1 giờ. Ảnh hưởng của tốc độ gió cũng được thể hiện rõ nét khi phân tích thời gian tiếp cận của tàu KN-579 từ 05 trạm tìm kiếm tới các vị trí xảy ra sự cố khác. Trong trường hợp xảy ra bão ở cấp 9, 10 (sức gió khoảng 25 m/s), thời gian tiếp cận từ các trạm SAR đến các vị trí xảy ra sự cố là dài nhất, trung bình gấp gần 1,5 lần so với thời gian tiếp cận khi tốc độ gió 5 m/s.

4. Kết luận

Hướng gió và tốc độ gió có ảnh hưởng quan trọng đến thời gian tiếp cận của các tàu tìm kiếm, cứu nạn tới các vị trí xảy ra sự cố trên biển. Trong nghiên cứu này, bộ dữ liệu đầu vào đại diện cho các yếu tố về địa hình, khí tượng, hải văn, phương tiện SAR được sử dụng để

xác định thời gian phản hồi trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển. 05 trạm tìm kiếm, cứu nạn, trong đó có 02 trạm tại các đảo trên biển (Bạch Long Vỹ, Cồn Cỏ) và 03 trạm ở ven bờ (Hải Phòng, Sầm Sơn, Cửa Sốt) được thử nghiệm để tính thời gian tiếp cận của tàu KN-579 (Cục Kiểm ngư, Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn) tới 07 vị trí giả định xảy ra sự cố trên khu vực vịnh Bắc Bộ. Để đánh giá ảnh hưởng của gió tới thời gian tiếp cận vị trí xảy ra sự cố ở khu vực vịnh Bắc Bộ, trong nghiên cứu đã thử nghiệm với các hướng gió (0° , 45° , 135° và 180°) và tốc độ gió (5 m/s, 10 m/s, 15 m/s và 25 m/s) khác nhau. Kết quả nhận được cho thấy, hướng gió và tốc độ gió có ảnh hưởng quan trọng đến kết quả xác định thời gian phản hồi trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển. Các thông tin hữu ích này giúp các lực lượng tìm kiếm, cứu nạn lên kế hoạch và triển khai hoạt động phù hợp tùy theo điều kiện thời tiết, trang thiết bị cụ thể đối với khu vực biển cần cứu nạn.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: N.Q.M., N.V.T.; 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. Bộ Tài nguyên và Môi trường. Báo cáo đánh giá khí hậu quốc gia. 2021, tr. 267.
2. Guoxing, L.; Maofeng, L. SARGIS: A GIS-Based Decision-making Support System for Maritime Search and Rescue. Proceeding of the 2010 International Conference on E-Business and E-Government, Guangzhou, China, 2010, pp. 1571–1574. Doi: 10.1109/ICEE.2010.398.
3. Aronica, S.; Benvegna, F.; Cossentino, M.; Gaglio, S.; Langiu, A.; Lodato, C.; Lopes, S.; Mascalco, U.; Sangiorgi, P. An agent-based system for maritime search and rescue operations. *CEUR-WS* 2010, 621(21), 10.
4. Breivik, O.; Allen, A.; Maisondieu, C.; Olagnon, M. Advances in search and rescue at sea. *Ocean Dyn.* 2013, 63(1), 83–88.
5. Serra, M.; Sathe, P.; Rypina, I.; Kirincich, A.; Ross, S.; Lermusiaux, P.; Allen, A.; Peacock, T.; Haller, G. Search and rescue at sea aided by hidden flow structures. *Nat. Commun.* 2020, 11, 2525.
6. 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>.
7. Venalainen, E. Evaluating voluntary emergency response in the Gulf of Finland. Master's thesis of Geography and Geoinformatics, 2014, pp. 118.
8. Burns, D. Application of GIS for coastal rescue response. Esri User Conference Paper Sessions, 2014. <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc14/>.
9. 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. <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0154-7>.
10. Ferrari, 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.
11. Zhou, X.; Cheng, L.; Zhang, F.; Yan, Z.; Ruan, X.; Min, K.; Li, M. Integrating Island spatial information and integer optimization for locating maritime search and rescue bases: A case study in the South China Sea. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, 8(2), 88. <https://doi.org/10.3390/ijgi8020088>
12. 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**, 6, 183–200. <https://doi.org/10.1007/s42797-024-00101-2>.
13. 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.
 14. 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.
 15. Thanh, T.Đ.; An, L.Đ. Tài nguyên vị thế tự nhiên đảo Bạch Long Vỹ. *Tap chí các khoa học về Trái đất* **2012**, 34(4), 447–485.
 16. 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. *Tap chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên* **2021**, 226(02), 42–50.
 17. USACE. Coastal Engineering Manual 10-2-1100. Parts 1-6, Washington, D.C, 2002.
 18. Minh, N.Q.; Diêu, B.T.; Trung, N.V. Xác định khoảng cách hiệu dụng trong tìm kiếm, cứu nạn trên biển bằng công nghệ GIS và phương pháp mô hình hóa. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2025**, 770, 29–42.
 19. 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. *Tap chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ* **2011**, 9, 54–58.
 20. 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. *Tap chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường* **2022**, 41, 22–33.
 21. 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. *Tap chí Khoa học công nghệ Hàng hải* **2019**, 59, 90–95.
 22. 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. *Tap chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường* **2016**, 32(3S), 310–316.
 23. 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. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* **2019**, 755(1), 19–28.
 24. Lončar, G.; Šreng, Ž.; Miličević, H.; & Ostojčić, S. Increase of wave height due to transition in wind direction—example: Rijeka Bay. *Adv. Civil Archit. Eng.* **2019**, 10(18), 57–70.
 25. 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.
 26. 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>.
 27. Herterich, J.G.; Dias, F. Extreme long waves over a varying bathymetry. *J. Fluid Mechanics* **2019**, 878, 481–501.
 28. Salameh, E.; Frappart, F.; Almar, R.; Baptista, P.; Heygster, G.; Lubac, B.; Raucoules, D.; Almeida, L.P.; Bergsma, E.W.J.; Capo, S.; et al. Monitoring beach topography and nearshore bathymetry using spaceborne remote sensing: A review. *Remote Sens.* **2019**, 11(19), 2212.

Assessing the impact of wind on the response time to reach the search and rescue area at sea: A case study in the Gulf of Tonkin

Nguyen Quang Minh^{1,2}, Nguyen Van Trung^{2,3*}

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

² Hanoi University of Mining and Geology; nguyenvantrung@humg.edu.vn

³ Geomatics in Earth Sciences Research Group, Hanoi University of Mining and Geology; nguyenvantrung@humg.edu.vn

Abstract: Maritime accidents occur frequently in Vietnam - a country with a large sea area and long coastline, especially under the influence of climate change. To support the development of search and rescue plans at sea, determining the time to approach the incident areas (response time) is very important. In the study, 07 data layers including: (1) search and rescue vessel data; (2) adjusted wind speed (3) wind direction; (4) gravitational acceleration, (5) seabed depth, (6) land-water image data and (7) locations of search and rescue stations were used to determine the time to approach the incident location at sea. To assess the influence of wind on the time to approach the incident location in the Gulf of Tonkin, the study tested different wind directions (0°, 45°, 135°, 180°) and speeds (5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 25 m/s). The results obtained show that wind direction and wind speed have an important influence on the results of determining response time in search and rescue at sea. The study results also provide useful information to help managers develop search and rescue plans suitable for climatic conditions at sea.

Keywords: Search and Rescue; Response Time; Wind Speed; Wind Direction; Modelling; Gulf of Tonkin.

Bài báo khoa học

Ảnh hưởng của sóng nước nông tới hiệu quả giảm sóng của rạn ngầm nhân tạo trên thềm đảo nổi xa bờ

Phạm Thị Thúy^{1*}, Lê Hải Trung²

¹ Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn; thuy39vtl@gmail.com; thuy39vtl@lqdtu.edu.vn

² Khoa Công trình thủy, Trường Đại học Thủy Lợi; trung.l.h@tlu.edu.vn

*Tác giả liên hệ: thuy39vtl@gmail.com; Tel.: +84-982943689

Ban Biên tập nhận bài: 25/10/2024; Ngày phản biện xong: 4/12/2024; Ngày đăng bài: 25/4/2025

Tóm tắt: Bài báo sử dụng kết quả từ thí nghiệm trên mô hình vật lý máng sóng để nghiên cứu đặc tính của sóng nước nông trên thềm đảo nổi xa bờ và đánh giá ảnh hưởng của sóng nước nông tới hiệu quả giảm sóng qua rạn ngầm nhân tạo đặt trên thềm đảo nổi xa bờ. Kết quả cho thấy sóng nước nông trên thềm đảo có hai đặc tính quan trọng là: năng lượng và chiều cao sóng giảm mạnh, có sự xuất hiện sóng ngoại trọng lực với chu kỳ sóng dài lên tới 29 giây. Thông qua việc phân tích tương quan giữa tham số độ dốc sóng biểu kiến S_{om} và hệ số truyền sóng K_t , cho thấy độ dốc sóng biểu kiến là tham số có ảnh hưởng đáng kể tới hiệu quả giảm sóng của rạn ngầm với xu thế nghịch biến. Khi độ dốc sóng biểu kiến $S_{om} < 0,08$ và bề rộng tương đối của rạn ngầm $B/d > 7,5$ (với B là bề rộng rạn ngầm, d là độ sâu mực nước trên thềm) thì hệ số truyền sóng K_t phụ thuộc vào cả B/d và S_{om} ; Khi $0,008 \leq S_{om} \leq 0,02$ và $4,0 \leq B/d \leq 7,5$ thì hệ số truyền sóng K_t chỉ phụ thuộc vào bề rộng tương đối của rạn và khi $S_{om} > 0,02$; $B/d < 4,0$ thì hệ số truyền sóng K_t luôn là hằng số.

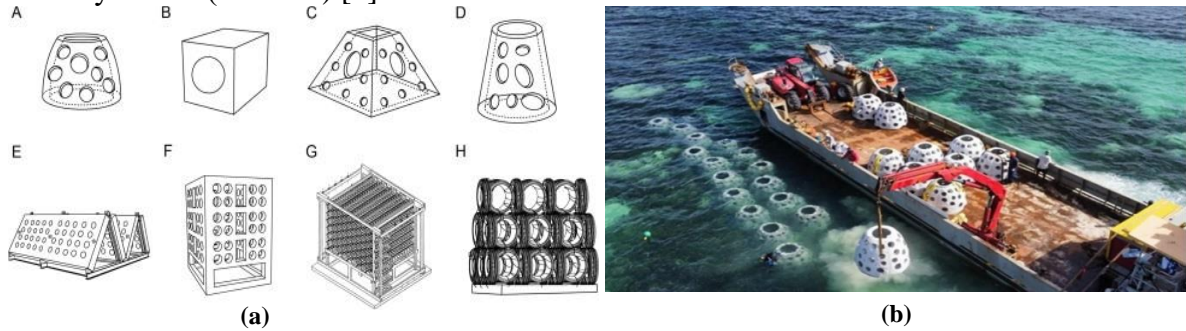
Từ khóa: Rạn ngầm nhân tạo; Sóng nước nông; Độ dốc sóng biểu kiến; Sóng ngoại trọng lực; Hiệu quả giảm sóng.

1. Giới thiệu

Các hoạt động của con người và sự biến đổi khí hậu là mối đe dọa lớn nhất đối với các rạn san hô trên các đại dương. Theo the Nature Conservancy, với tốc độ phá hủy như hiện nay thì khoảng 70% các rạn san hô trên thế giới sẽ biến mất trong vòng 50 năm tới. Tốc độ phục hồi tự nhiên của các rạn san hô chậm đã thúc đẩy sự nghiên cứu các cấu trúc rạn ngầm nhân tạo (kết cấu nhân tạo được đặt ở đáy biển để mô phỏng một số chức năng của một rạn san hô tự nhiên, giúp tái sinh, tập trung hoặc tăng cường các quần thể tài nguyên sinh vật biển mà không gây hại tới môi trường sống trên khu vực, thúc đẩy sự sinh trưởng và phát triển của sinh vật biển, tạo nguồn lợi thủy sản theo quy luật tự nhiên) [1].

Các dự án sử dụng rạn ngầm nhân tạo với mục đích cải thiện môi trường sinh thái, giảm sóng, chống xói lở ngày càng được ứng dụng nhiều hơn, dạng kết cấu sử dụng cũng đa dạng hơn và khu vực áp dụng cũng mở rộng hơn. Các dự án rạn ngầm nhân tạo trước đây chủ yếu tập trung vào các khía cạnh sinh học - môi trường như tập hợp cá trong vùng lân cận của rạn san hô, năng suất rạn san hô hoặc so sánh hiệu quả khôi phục sinh thái giữa rạn ngầm nhân tạo và rạn san hô tự nhiên [2]. Bên cạnh mục đích về môi trường, một số nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, các rạn ngầm nhân tạo còn có chức năng như một đê ngầm giảm sóng, giúp ổn định đường bờ [3]. Kết cấu rạn ngầm nhân tạo có thể sử dụng các nhóm vật liệu tự nhiên hoặc nhóm vật liệu nhân tạo. Hiện nay các khối bê tông rỗng đúc sẵn được sử dụng phổ biến

[3] (Hình 1a) và một trong số các kết cấu điển hình là cấu kiện bê tông rỗng Reef Ball™ (RB). Hơn 1/2 triệu khối RB được ứng dụng trong hơn 6.500 dự án tại hơn 62 quốc gia nhưng chủ yếu sử dụng trên các bãi biển thông thường [4]. Một số dự án được triển khai trên các quần đảo và đảo nổi như tại Maldives và đảo nổi Desroches, Remires và Plattes thuộc quần đảo Seychelles (Hình 1b) [5].



Hình 1. (a) Một số cấu kiện hình thành rạn ngầm nhân tạo; (b) Rạn ngầm RB lắp đặt trên quần đảo Seychelles.

Trên các đảo nổi do những khác biệt về điều kiện địa hình cũng như chế độ thủy hải văn dẫn tới những khác biệt về chế độ thủy động lực sóng. Đảo nổi xa bờ, về bản chất là rạn san hô xa bờ mà có một phần diện tích luôn nổi cao trên mặt nước kể cả khi thủy triều cao nhất [6]. Địa hình đảo nổi xa bờ rất khác biệt so với các bãi biển thông thường. Địa hình của một đảo nổi đặc trưng bao gồm: phần lõi đảo (*reef core*) đây là phần có diện tích nhỏ, khoảng vài chục héc-ta trở xuống, phần thềm đảo (*reef flat*) tương đối bằng phẳng, rộng gấp nhiều lần so với lõi đảo, tiếp với phần thềm đảo là vách ngầm có độ sâu thay đổi đột ngột trong khoảng 5-20 m và phần sườn ngầm ở khoảng độ sâu trên 50 m tiếp giáp với đáy biển sâu, độ sâu trên 1500 m (Hình 2).



Hình 2. Địa hình đặc trưng của đảo nổi (nguồn google earth).

Các nghiên cứu về chế độ thủy động lực sóng khi truyền qua dạng địa hình có vách dốc đứng như trên đảo nổi trước đây đa số đều dựa trên quan sát, một số nghiên cứu sử dụng mô hình số và một số nghiên cứu sử dụng mô hình vật lý. Các đặc tính thủy động lực học sóng được nghiên cứu như sự tổn thất năng lượng, các đặc tính sóng nước nông, sự phân bố chiều cao và chu kỳ sóng trên khu vực nước nông [7].

Theo cách tiếp cận về sự tổn thất năng lượng, sóng khi truyền qua địa hình có vách dốc đứng đã cho thấy năng lượng sóng bị suy giảm đáng kể và tỷ lệ suy giảm tương đối phù hợp với các lý thuyết hiện có về ma sát đáy và sự tiêu tán sóng vỡ. Tỷ lệ tiêu tán năng lượng sóng lớn nhất có thể lên tới 75%÷86% [8]. Nghiên cứu [9] chỉ ra rằng tỉ số giữa chiều cao sóng lớn nhất và độ sâu mực nước (H_{max}/d) tại vị trí phía sau vùng sóng vỡ trên thềm nước nông không vượt quá 0,55 nhỏ hơn nhiều so với giá trị trên các bãi biển thông thường là 0,78 [9]. Nghiên cứu [6] cũng chỉ ra các yếu tố chi phối chế độ thủy động lực sóng trên vùng sóng vỡ

và sự lan truyền của sóng là độ ngập trên thềm nước nông, độ dốc phía trước của rạn (*fore-reef slope*) và độ sâu trên thềm san hô.

Các nghiên cứu về các đặc tính sóng nước nông trên thềm có thể kể đến [10, 11]. Hai đặc trưng thủy động lực quan trọng trên thềm nước nông là hiện tượng sóng tràn và sự hình thành sóng ngoại trọng lực (*infragravity wave* - sóng có chu kỳ từ 20-200s) [12]. Sóng tràn bị ảnh hưởng bởi độ sâu mực nước trên thềm và đặc trưng mặt cắt của rạn. Sóng tràn tăng khi độ ngập tương đối trên thềm giảm và độ nhám đáy thềm tăng. Hiện tượng sóng tràn làm mực nước trung bình trên thềm đảo dâng cao [13]. Sóng ngoại trọng lực (IG), là sóng có tần số thấp, chu kỳ dài trong khoảng từ 20-200s, được hình thành trên những bờ biển có độ dốc khác nhau. Những con sóng dài được hình thành theo 2 cơ chế: (1) do những tương tác trong nhóm sóng tới, sau khi hình thành chúng lan truyền từ khu vực nước sâu vào khu vực độ sâu mực nước nhỏ như những con sóng tự do và (2) sóng được sinh ra từ vùng sóng vỡ, vùng giáp ranh với mái dốc nhờ cơ chế điềm vỡ [14]. Đối với các đảo nổi, sóng ngoại trọng lực được hình thành theo cơ chế điềm vỡ [6]. Khi sóng chu kỳ ngắn bị tiêu tán do sóng vỡ, sóng ngoại trọng lực hình thành và càng vào bên trong thềm càng chiếm ưu thế [11, 15]. Ảnh hưởng của sóng ngoại trọng lực đối với sự phân bố chiều cao sóng lên thềm đảo là khá phức tạp [10].

Chiều cao sóng nước sâu về mặt lý thuyết tuân theo phân bố Rayleigh, Longuet-Higgins [14], ứng dụng cho các bãi biển thông thường với độ dốc nhỏ hơn 1/20 và độ sâu nước thay đổi từ từ. Ngược lại, các nghiên cứu về sự truyền sóng đối với kiểu bờ có vách dốc đứng với độ dốc lớn và độ sâu biến đổi đột ngột như dạng đảo san hô cho đến nay chưa có nhiều. Các nghiên cứu có thể kể đến như [16, 17]. Nhóm thứ hai, sử dụng các phân bố thực nghiệm như Weibull, theo đó các tham số mô hình được xây dựng trực tiếp từ bộ tham số đo đạc thực nghiệm [18, 19]. Nghiên cứu [20] đã thiết lập công thức phân bố Rayleigh - Weibull tổng hợp (BG2000) và nghiên cứu [6] đã xây dựng công thức phân bố chiều cao sóng 3WB (3 Weibull) ứng dụng cho thềm đảo chìm.

Như vậy, có thể thấy, các nghiên cứu hiện tại về rạn ngầm hầu hết dựa trên cách tiếp cận về sự tổn thất năng lượng khi sóng truyền qua. Ngược lại, các tác động xảy ra ở rạn như hiệu quả giảm sóng, sự hình thành các xoáy nước, các tương tác phi tuyến tính thì chưa được giải quyết rõ ràng. Hiện tượng này cần được xem xét khi thiết kế rạn ngầm nhân tạo làm đê ngầm chắn sóng [7]. Trong nghiên cứu này, dựa trên kết quả từ thí nghiệm trên mô hình vật lý máng sóng, tác giả nghiên cứu đặc tính sóng trên thềm nước nông trên đảo bao gồm sự suy giảm chiều cao sóng, sự thay đổi chu kỳ và phổ sóng nước nông so với sóng nước sâu. Đồng thời nghiên cứu cũng đánh giá sự tương tác giữa sóng nước nông với rạn ngầm nhân tạo, cụ thể là sự ảnh hưởng của tham số sóng nước nông tới hiệu quả giảm sóng của rạn ngầm nhân tạo RB thông qua việc phân tích tương quan giữa tham số độ dốc sóng biểu kiến S_{om} và hệ số truyền sóng K_t . Đây là một nội dung mang tính khoa học, góp phần làm rõ hơn bản chất của các tham số chỉ phối tới hiệu quả giảm sóng qua rạn ngầm Reef Ball™ trên thềm đảo nổi san hô xa bờ.

2. Thiết kế thí nghiệm mô hình vật lý

Mục tiêu của thí nghiệm mô hình vật lý thường là thu nhỏ đối tượng nghiên cứu (nguyên hình) theo tỉ lệ quy định, thành một đối tượng thay thế (mô hình). Mô hình được xác lập trên cơ sở lý thuyết tương tự, thông qua những thí nghiệm trong mô hình để suy đoán những hiện tượng sẽ xuất hiện trong nguyên hình. Trong nghiên cứu này một mô hình đảo nổi với các yếu tố địa hình và sóng được thiết lập cùng với đó là một mô hình rạn ngầm nhân tạo từ các khối Reef Ball™ được thực hiện. Bộ số liệu thu thập từ thí nghiệm bao gồm chiều cao và chu kỳ sóng tại khu vực nước sâu, chiều cao và chu kỳ sóng trên thềm trước và sau rạn ngầm. Bộ số liệu sóng nước sâu và nước nông sẽ dùng để đánh đặc tính của sóng. Bộ số liệu sóng đến trước và sau rạn ngầm để đánh giá hiệu quả giảm sóng qua rạn ngầm nhân tạo.

2.1. Các điều kiện tương tự

Theo lý thuyết mô hình, để mô hình tương tự với nguyên hình thì cần phải tương tự hình học, động học và động lực học [21]. Các điều kiện cụ thể là:

Mô hình phải được làm chính thái, tỉ lệ mô hình nhỏ $\lambda_l \leq 60$; và $\lambda_l = \lambda_h$, tỉ lệ giữa chiều dài và chiều cao phải như nhau.

Mô hình phải tuân theo luật Froude - diễn tả mức độ ảnh hưởng tương đối giữa lực quán tính và trọng lực ở dòng chảy có mặt thoáng, theo đó tỉ lệ thời gian theo công thức: $\lambda_T = \frac{\sqrt{\lambda_L}}{\sqrt{\lambda_g}}$

Với bài toán truyền sóng trên thềm đảo nổi, áp dụng luật Froude (gồm cả chu kỳ sóng) thì các đại lượng như ứng suất rối (Raynolds), sóng khúc xạ, nhiễu xạ cũng đều thỏa mãn điều kiện tương tự. Tuy nhiên, cần phải loại trừ ảnh hưởng của lực nhớt, mà ảnh hưởng của lực nhớt chỉ có thể được mô phỏng trong mô hình khi cả hai luật Froude và Raynold đồng thời được thỏa mãn [8]. Giải pháp là trong các mô hình vật lý kỹ thuật biển cần giảm thiểu các ảnh hưởng của lực nhớt bằng cách tăng số Raynolds đủ lớn. Theo kiến nghị [22], độ sâu mô hình không nhỏ hơn 5 cm và chiều cao sóng trên thềm đảo không nhỏ hơn 2 cm.

2.2. Các điều kiện nguyên hình

Qua những phân tích tổng quan về đảo nổi, địa hình nguyên hình được lựa chọn đưa vào thí nghiệm như sau: phần lõi đảo ở mức độ cao: +4 m; phần thềm san hô rộng $B = 300-600$ m; vách dốc đứng (Fore-reef slope) 1/5.

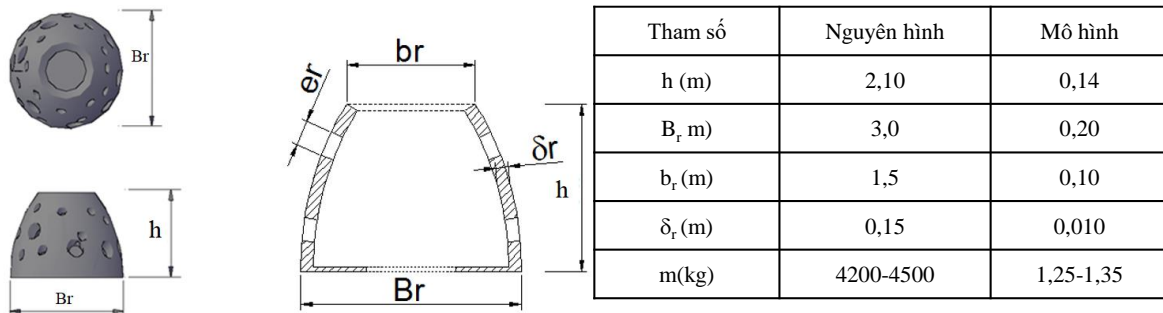
Độ sâu mực nước trên thềm đảo d trong khoảng từ 2-4 m. Sóng khí hậu với hướng sóng chủ đạo là Đông Bắc và Bắc có chiều cao và chu kỳ lần lượt bằng $H_s = 2,0-2,60$ m tương ứng với $T_p = 6-7$ s. Sóng nước sâu cho khu vực đảo nổi H_s trong khoảng từ 4,0-13,8 m; T_p trong khoảng từ 9,7-14,6 s.

2.3. Điều kiện thí nghiệm

Thí nghiệm mô hình được thực hiện tại Phòng Thí nghiệm Thủy lực Tổng hợp, Trường Đại học Thủy lợi trên máng sóng Hà Lan. Chiều dài máng sóng là 50 m, chiều cao 1,2 m và chiều rộng 1 m. Máng có thể tạo sóng đều hoặc sóng ngẫu nhiên theo một số dạng phổ sóng phổ biến như phổ JONSWAP hay Peirson-Moskowitz (PM). Chiều cao sóng ngẫu nhiên H_s tối đa lên tới 0,3 m và chu kỳ là 3,0 s.

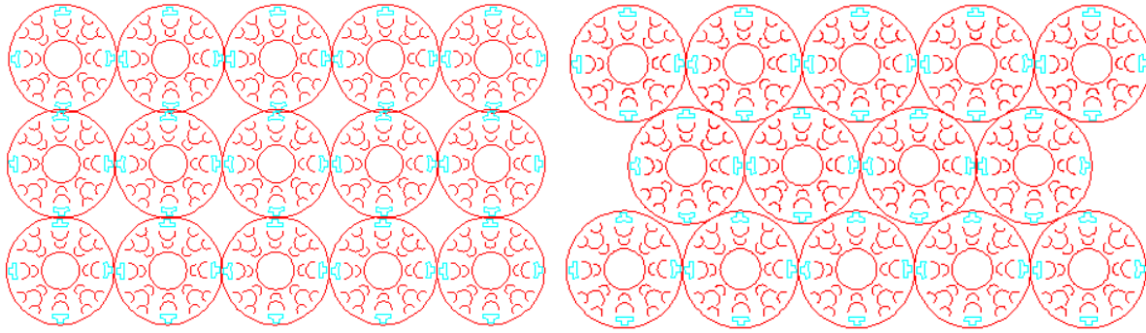
2.4. Tỉ lệ mô hình thí nghiệm và kích bản thí nghiệm

Tỉ lệ mô hình phải đảm bảo các điều kiện tương tự, cụ thể mô hình và nguyên hình phải tương tự về mặt hình học, các điều kiện độ sâu mực nước ở nước sâu và nước nông trên thềm, điều kiện sóng và kích thước rạn ngầm cũng phải được thỏa mãn. Tỉ lệ mô hình được lựa chọn là 1/15. Cấu kiện RB trong mô hình được thu phóng theo tỉ lệ 1/15, sử dụng vật liệu gốm nung có độ nhám tương đương 0,0097÷0,011. Kích thước một khối RB được mô tả tại Hình 3.



Hình 3. Các tham số của khối Reef Ball™ trên nguyên hình và mô hình.

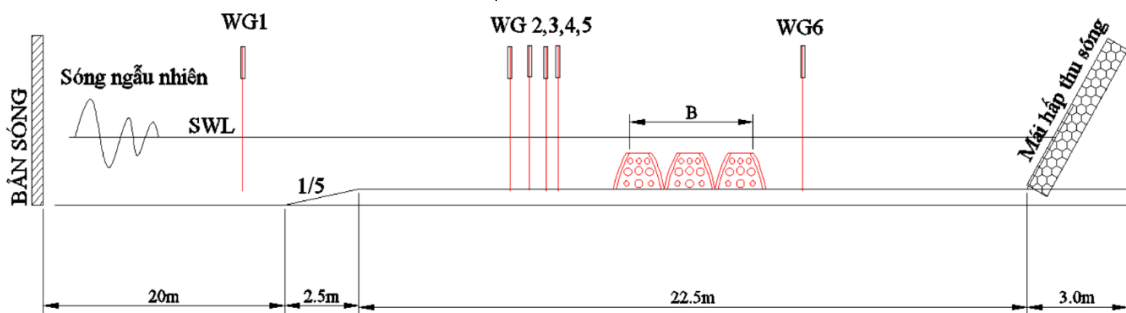
Các cấu kiện RB được sắp xếp với nhau theo phương án bố trí không gian để tạo thành rạn ngầm giảm sóng. Sơ đồ bố trí mặt bằng rạn ngầm Reef Ball™ như Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ bố trí mặt bằng kết cấu rạn ngầm Reef Ball™.

Sơ đồ thí nghiệm mô hình được sơ họa như Hình 5, trong đó: chiều dài máng sóng 50 m với phần nước sâu là 20 m; phần vách dốc 1/5 là 2,5 m; thêm san hô B là 22,5 m và mái sau là 3 m; Thiết bị đo sóng DHI Wave Amplifier 102E gồm các đầu đo Wave Gauge 202, bộ khuếch đại 102E, cáp nối các đầu đo với module thu thập số liệu và nguồn cấp. Tổng cộng có 06 đầu đo từ WG1 đến WG6 được sử dụng nhằm xác định chiều cao sóng ở trước và sau tuyến công trình. Trong đó, WG1 đo sóng nước sâu; WG2, WG3 và WG4 dùng tách sóng phản xạ trước công trình; WG5 đo sóng phía trước công trình; WG6 đo sóng phía sau tuyến công trình. Các đầu đo WG2, WG3, WG4 được bố trí để xác định sóng phản xạ tuân thủ theo lý thuyết của Mansard và Funke (1980). Các yêu cầu về khoảng cách đầu đo phải được thực hiện để loại bỏ giá trị bất thường trong phép đo [23]. Sóng đo tại vị trí trước công trình WG5 là sóng tổng H_t , chiều cao sóng tới trước công trình H_{moi} xác định theo công thức sau với K_r

$$H_{moi} = \frac{H_t}{\sqrt{1 + K_r^2}}$$



Hình 5. Sơ đồ bố trí thí nghiệm về hiệu quả giảm sóng của kết cấu ngầm RB.

Ma trận các kịch bản thí nghiệm như Bảng 1. Tổng số kịch bản là 100 ($4 \times 5 \times 5$). Trong đó 04 phương án bề rộng rạn ngầm B; 05 phương án sóng H_s , T_p và 05 phương án mực nước tương đương với 05 phương án độ ngập đỉnh rạn R_c (khoảng cách từ mực nước tới đỉnh rạn).

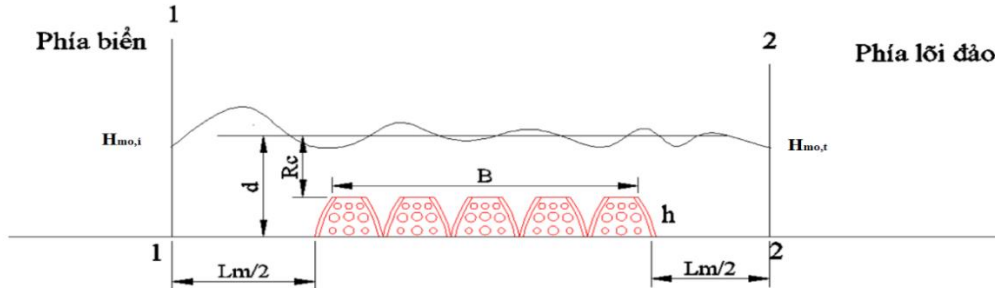
Bảng 1. Ma trận kịch bản thí nghiệm.

Mô hình				Nguyên hình			
B(m)	H_s (cm)	T_p (s)	R_c (cm)	B(m)	H_s (cm)	T_p (s)	R_c (m)
1,80	10	1,5	0	28,5	1,5	5,81	0,0
1,50	12	1,7	2,5	22,5	1,8	6,58	0,375
1,20	15	1,8	5,0	18,0	2,25	6,97	0,750
0,80	18	1,9	7,5	12,0	2,7	7,36	1,125
	20	2,1	10,0		3	8,13	1,500

2.5. Các tham số đo đạc và tính toán

Các tham số đo đạc sóng bao gồm chiều cao sóng và chu kỳ sóng. Đối với vùng nước sâu là chiều cao sóng ý nghĩa H_s và chu kỳ sóng T_p . Đối với vùng nước nông trên thêm phổ

sóng có xu thế bị thay đổi, lúc này thay vì sử dụng chiều cao sóng H_s và chu kỳ T_p , chiều cao sóng mô men H_{mo} và chu kỳ phổ sóng đặc trưng $T_{m-1,0}$ được sử dụng. Hệ số truyền sóng K_t là tỷ số giữa chiều cao sóng phía sau so với chiều cao sóng đến phía trước rạn ngầm nhân tạo tạo: $K_t = \frac{H_{mo,t}}{H_{mo,i}}$; Hiệu quả giảm sóng ε (%) = $100 \times (1 - K_t)$ [10] (Hình 6).

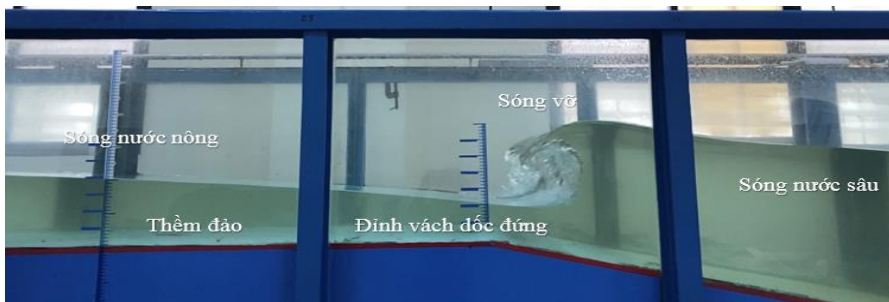


Hình 6. Sơ đồ tính hệ số truyền sóng của rạn ngầm nhân tạo.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc tính sóng trên thềm đảo

Do rạn ngầm nhân tạo đặt trên thềm đảo nổi, sóng tới trước công trình không phải là sóng nước sâu mà là sóng nước nông được tạo thành trên thềm đảo, do vậy đặc tính của sóng nước nông trên thềm cần được đánh giá. Sóng nước sâu là sóng tuyến tính với hai tham số được xét đến chiều cao sóng ý nghĩa (H_s) và chu kỳ đỉnh sóng nước sâu (T_p), khi sóng nước sâu truyền vào đảo gặp vách dốc đứng đa phần bị vỡ trên khu vực lân cận đỉnh vách dốc đứng do sự suy giảm đột ngột của độ sâu. Các quá trình vật lý như sóng phản xạ, sóng vỡ, sóng truyền và hiệu ứng ma sát đáy làm suy giảm năng lượng và chiều cao sóng. Sóng nước nông được hình thành trên thềm và tiếp tục truyền vào bờ, lõi đảo nổi [23], quá trình truyền sóng trên đảo nổi như Hình 7.

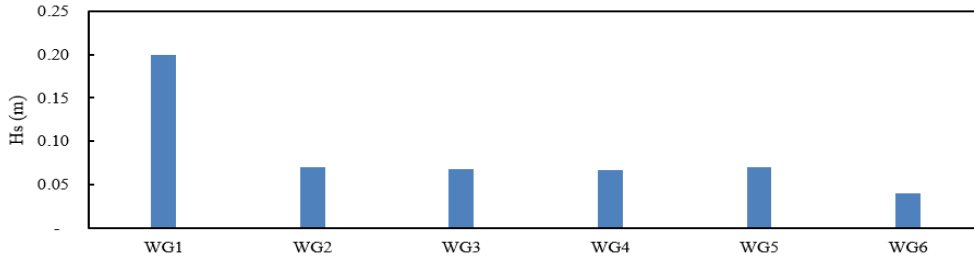


Hình 7. Quá trình truyền sóng trên đảo nổi kích bản d14H20T1.9.

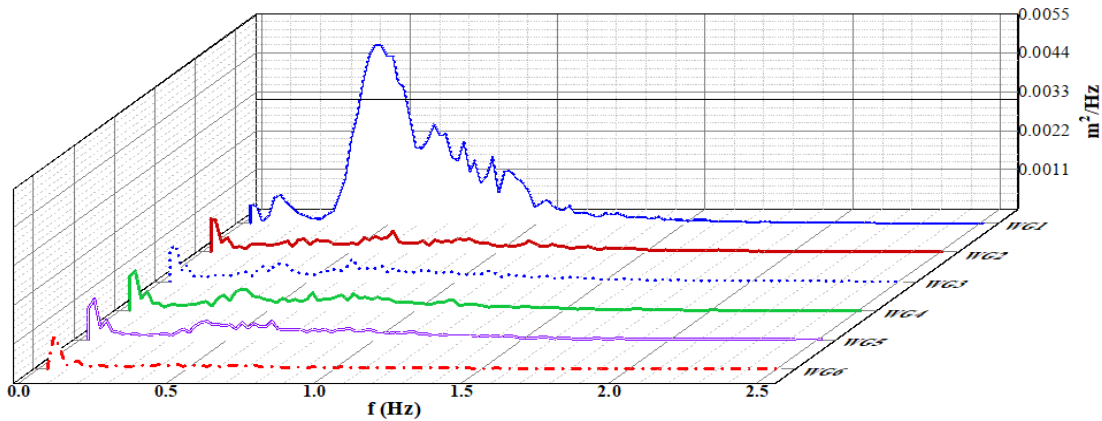
Về chiều cao sóng, từ kết quả của 100 kịch bản thí nghiệm cho thấy chiều cao sóng nước nông trên thềm đảo bị suy giảm rất mạnh. Tỷ lệ suy giảm lớn nhất lên tới 68,6% với kịch bản mực nước d14H20T1.9 tương ứng với mực nước nhỏ $d = 14$ cm, ngang với đỉnh rạn ngầm, độ ngập $R_c = 0$ cm; chiều cao sóng tới lớn ($H_s = 20$ cm) và chu kỳ sóng dài ($T_p = 1,9$ s). Hình 8 cho thấy biến trình độ cao sóng tại các đầu đo sóng với kịch bản có tỷ lệ suy giảm chiều cao sóng lớn nhất d14H20T1.9. Khi đó, chiều cao sóng tại vùng nước sâu WG1 có $H_s = 0,20$ m; chiều cao sóng tại các vị trí trên thềm đảo WG2 là 0,0695 m; tại WG3 là 0,0679 m; tại WG4 là 0,0668 m; tại WG5 là 0,0696 m (chiều cao sóng nước nông sau tại vị trí trước rạn ngầm nhân tạo); chiều cao sóng tại vị trí phía sau rạn ngầm tương ứng WG6 là 0,0397 m.

Về chu kỳ sóng, kết quả thí nghiệm từ 100 kịch bản cho thấy, sóng nước nông có chu kỳ dao động từ 1,7-7,5 s trong mô hình, tương ứng với chu kỳ từ 6,6-29 s trong nguyên hình. Như vậy có thể thấy, sóng nước nông trên thềm đảo bao gồm hai loại: sóng ngắn (chu kỳ nhỏ

hơn 20 s) và sóng dài (sóng ngoại trọng lực, chu kỳ đo đặc từ thí nghiệm lên tới 29 s). Sự xuất hiện sóng ngoại trọng lực trên thềm đảo cho thấy sự phù hợp với các nghiên cứu trước đó về chế độ thủy động lực sóng trên rạn ngầm có vách dốc đứng [11]. Bên cạnh đó, khi truyền vào vùng nước nông, sóng bị vỡ, hình dạng phổ năng lượng sóng bị biến đổi. Đỉnh phổ có xu thế dịch chuyển sang trái, đỉnh phổ tần số thấp tăng nhanh về gần bờ, phổ năng lượng sóng như Hình 9.



Hình 8. Biến trình độ cao sóng tại các đầu đo sóng với kích bản d14H20T1.9.



Hình 9. Phổ năng lượng sóng đo đặc ứng với kích bản d14H20T1.9.

3.2. Ảnh hưởng của sóng nước nông đến hiệu quả giảm sóng của rạn ngầm

Đánh giá ảnh hưởng của sóng nước nông trên thềm tới hệ số truyền sóng thông qua đánh giá tương quan giữa hệ số truyền sóng K_t và độ dốc sóng biểu kiến S_{om} , được xác định theo công thức: $S_{om} = \frac{2\pi H_{mo}}{gT_{m-1,0}^2}$. Trong công thức S_{om} , chiều cao sóng nước nông H_{mo} được lấy là chiều cao sóng tới trước công trình.

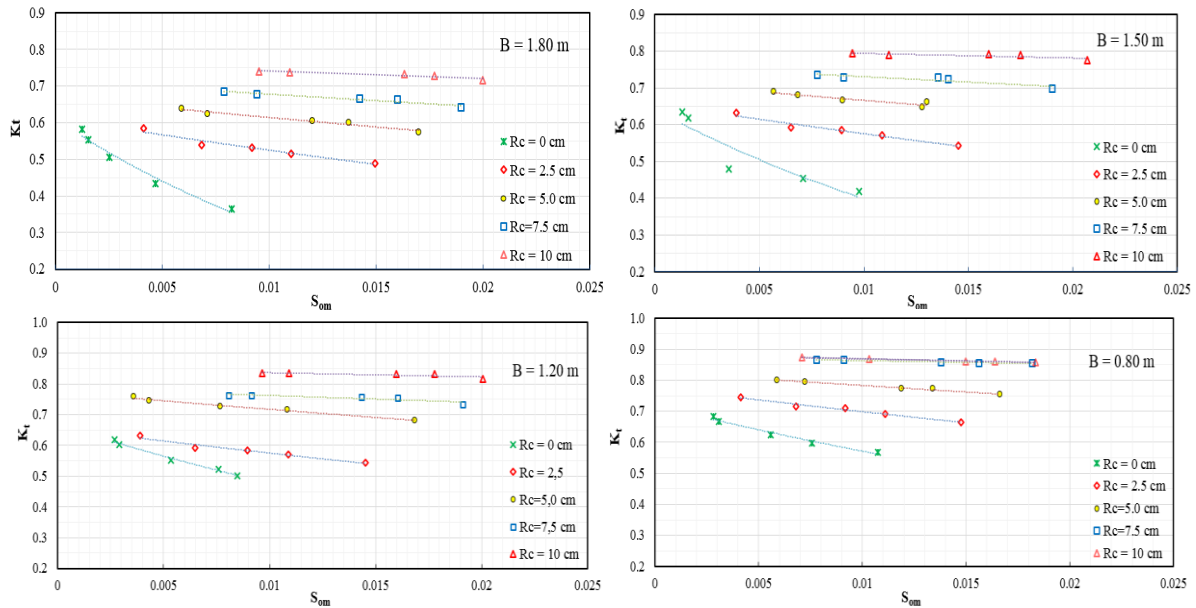
Sử dụng 100 kích bản thí nghiệm đánh giá ảnh hưởng của tham số sóng nước nông đến hệ số truyền sóng K_t . Đồ thị tương quan giữa S_{om} và K_t ứng với các bề rộng B và độ ngập đỉnh R_c như trình bày trong Hình 10.

Kết quả trên Hình 10 cho thấy: (1) Độ dốc sóng biểu kiến S_{om} trong khoảng từ 0,001 đến 0,022. Độ dốc này khá nhỏ, theo công thức tính $S_{om} = \frac{2\pi H_{mo}}{gT_{m-1,0}^2}$ cho thấy sóng nước nông trên

thềm có chiều cao nhỏ và chu kỳ sóng dài, đây là đặc tính quan trọng của sóng nước nông trên thềm đảo, chiều cao sóng giảm mạnh, và xuất hiện sóng ngoại trọng lực với chu kỳ dài; (2) Độ dốc sóng S_{om} tại vị trí trước công trình và hệ số truyền sóng K_t có tương quan nghịch biến, S_{om} tăng thì K_t giảm và ngược lại.

Độ dốc sóng S_{mo} là tham số có ảnh hưởng đáng kể đến hệ số truyền sóng K_t , tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng không đều: (1) Với các bề rộng rạn ngầm khác nhau thì khi bề rộng đỉnh rạn ngầm lớn thì đường tương quan có xu thế dốc. Ngược lại khi bề rộng đỉnh nhỏ thì đường tương quan có xu thế duỗi ngang. Điều này cho thấy độ dốc sóng S_{om} biểu kiến ảnh hưởng đáng kể tới K_t khi bề rộng lớn và ít ảnh hưởng khi bề rộng nhỏ; (2) Với cùng bề rộng đỉnh

thì khi độ ngập đỉnh rạn ngầm nhỏ, đồ thị đường tương quan có xu thế dốc hơn, sóng tới ảnh hưởng lớn hơn tới hệ số truyền sóng. Ngược lại, khi độ ngập tăng lên, độ dốc đường tương quan giảm đi, vai trò của độ dốc sóng biểu kiến S_{om} tới K_t cũng giảm đi.



Hình 10. Tương quan độ dốc sóng biểu kiến S_{om} và hệ số truyền sóng K_t .

Cũng từ kết quả trên Hình 10 cho thấy: (1) Khi độ dốc sóng $S_{om} < 0,08$ và bề rộng tương đối rạn ngầm $B/d > 7,5$, đồ thị với xu thế phi tuyến do đó hệ số truyền sóng K_t phụ thuộc vào cả bề rộng tương đối B/d và độ dốc sóng biểu kiến S_{om} ; (2) Khi độ dốc sóng S_{om} trong khoảng từ $0,008 \leq S_{om} \leq 0,020$ và bề rộng tương đối rạn ngầm B/d trong khoảng $4,0 \leq B/d \leq 7,5$, đồ thị với xu thế tuyến tính, do đó hệ số truyền sóng K_t chỉ phụ thuộc vào B/d ; (3) Khi $S_{om} > 0,02$; $B/d < 4,0$ đồ thị là đường thẳng nằm ngang, khi đó hệ số truyền sóng K_t luôn là hằng số.

4. Kết luận

Bài báo sử dụng kết quả từ thí nghiệm mô hình vật lý máng sóng với 100 kịch bản thí nghiệm để nghiên cứu đặc tính của sóng nước nông trên thềm đảo nổi san hô xa bờ và ảnh hưởng của tham số sóng nước nông tới hiệu quả giảm sóng của rạn ngầm. Kết quả cho thấy:

- Sóng nước nông trên thềm có chiều cao sóng nhỏ, tỉ lệ suy giảm chiều cao sóng trên thềm so với sóng nước sâu lớn nhất lên tới 68,6%.
- Trên thềm đảo xuất hiện hai loại sóng là sóng ngắn (chu kỳ sóng nhỏ hơn 20s) và sóng ngoại trọng lực (chu kỳ T_m lên tới 29s).
- Hình dạng phổ sóng nước nông có sự biến đổi mạnh, đỉnh phổ có xu thế dịch chuyển về phía có tần số thấp.
- Tham số độ dốc sóng biểu kiến S_{mo} có ảnh hưởng đáng kể tới hệ số truyền sóng K_t với xu thế nghịch biến.

Khi $S_{om} < 0,08$ và $B/d > 7,5$ thì hệ số truyền sóng K_t phụ thuộc vào cả B/d và S_{om} .

Khi $0,008 \leq S_{om} \leq 0,02$ và $4,0 \leq B/d \leq 7,5$ thì hệ số truyền sóng K_t chỉ phụ thuộc vào bề rộng tương đối của rạn.

Khi $S_{om} > 0,02$; $B/d < 4,0$ thì hệ số truyền sóng K_t luôn là hằng số.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: P.T.T., L.H.T.; Xử lý số liệu: P.T.T.; Viết bản thảo bài báo: P.T.T.; Chỉnh sửa bài báo: P.T.T., L.H.T.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây.

Tài liệu tham khảo

1. Armono, H.D.; Kurniawan, A.; Rudhy, A.; Sujantoko. Wave spectrum change in the vicinity of artificial reef. *J. Indonesia Coral Reefs* **2011**, *1(2)*, 75–84.
2. Brotto, D.S.; Krohling, W.; Zalmon, W.; I. R. Fish community modeling agents on an artificial reef on the northern coast of Rio de Janeiro-Brazil. *Braz. J. Oceanogr.* **2006**, 205–212.
3. Armono, H.D. Artificial reefs as shoreline protection structures. Seminar Teori dan Aplikasi Teknologi Kelautan IV, **2004**, pp. 1–14.
4. Online available: <https://reefballfoundation.org/>.
5. Agency, S.N. Reef balls: New ways to stop beach erosion tested on desroches island, 2022.
6. Tuấn, T.Q.; Cường, Đ.Q. Wave transmission across steep submerged reefs. International Conference on Asian and Pacific Coasts (APAC), Springer, 2019, pp. 687–694.
7. Bleck, M.; Hocine, O. Wave damping and spectral evolution at artificial reefs. Proceeding of the Ocean Wave Measurement and Analysis, 2002, pp. 1062–1072.
8. Lugo-Fernández, A.; Harry, H.R.; Joseph, N.S. Wave transformations across a Caribbean fringing-barrier coral reef. *Cont. Shelf Res.* **1998**, *18(10)*, 1099–1124.
9. Nelson, R.C. Depth limited design wave heights in very flat regions. *Coastal Eng.* **1994**, *23(1–2)*, 43–59.
10. Nakaza, E.; Mikio, H. Bore-like surf beat in a reef zone caused by wave groups of incident short period waves. *Fluid Dyn. Res.* **1991**, *7(2)*, 89–100.
11. Buckley, M.L.; Lowe, R.J.; Hansen, J.E.; Van Dongeren, A.R.; Storlazzi, C.D. Mechanisms of wave-driven water level variability on reef-fringed coastlines. *J. Geophys. Res. C: Oceans* **2018**, *123(5)*, 3811–3831.
12. Gourlay, M.R. Wave set-up on coral reefs. 2. Set-up on reefs with various profiles. *Coastal Eng.* **1996**, *28(1–4)*, 17–55.
13. Pomeroy, A.; Lowe, R.; Symonds, G.; Van Dongeren, A.; Moore, C. The dynamics of infragravity wave transformation over a fringing reef. *Geophys. Res. C: Oceans* **2012**, *117*, C11022.
14. Longuet-Higgins, M.S. On the statistical distribution of the height of sea waves. *JMR* **1952**, *11*, 245–266.
15. Demirbilek, Z.; Okey, G.N.; Donald, L.W. Laboratory study of wind effect on runup over fringing reefs, Report 1: data report, 2007.
16. Hajime, M.; Iwagaki, Y. Wave height distribution and wave grouping in surf zone. *Coastal Eng. Proc.* **1982**, *18*, 58–75.
17. Glukhovskiy, B.H. Issledovanie morskogo vetrovogo volnenia (Study of sea wind waves). Leningrad, Gidrometeoizdat, 1996.
18. Klopman, G. Extreme wave heights in shallow water. H2486, Delft Hydraulics, The Netherlands, 1996.
19. Tuấn, T.Q. Bài giảng mô hình vật lý Kỹ thuật biển, Hà Nội, 2021.
20. Rattanapitikon, W. Verification of conversion formulas for computing representative wave heights. *Ocean Eng.* **2000**, *37(17–18)*, 1554–1563.
21. Hậu, L.P.; Hoi, T.Đ. Lý thuyết thí nghiệm công trình thủy. Nhà xuất bản xây dựng, Hà Nội, 2003.
22. Lin, C.Y.; Ching-Jer, H. Decomposition of incident and reflected higher harmonic waves using four wave gauges. *Coastal Eng.* **2004**, *51(5–6)*, 395–406.
23. Thúy, P.T.; Trung, L.H.; Tùng, T.T. An Empirical Prediction of $T_{m-1,0}$ on the reef flat of atolls. Proceedings of the 4th International Conference on Sustainability in Civil Engineering: ICSCCE 2022, Springer Nature, 2023, pp. 344.

Influence of wave representative slope on artificial reef effectiveness in shallow water

Pham Thi Thuy^{1*}, Le Hai Trung²

¹ Faculty of Mechanical Engineering, Le Quy Don Technical University; thuy39vtl@gmail.com; thuy39vtl@lqdtu.edu.vn

² Faculty of Civil Engineering, Thuyloi University; trung.l.h@tlu.edu.vn

Abstract: This study investigates the characteristics of shallow water waves and their impact on the effectiveness of artificial reefs in wave reduction using physical model experiments in a wave flume. Results reveal two key characteristics of shallow water waves: a sharp decrease in both wave energy and wave height, and the emergence of infragravity waves with periods exceeding 29 seconds. Analysis of the correlation between the wave representative slope parameter (S_{om}) and the wave transmission coefficient (K_t) demonstrates the significant influence of S_{om} on wave reduction efficiency. A nonlinear, inverse relationship exists between S_{om} and K_t . Specifically, the study identifies three distinct regimes: When $S_{om} < 0.08$ and $B/d > 7.5$: K_t depends on both the relative reef width (B/d) and S_{om} ; When $0.008 < S_{om} < 0.02$ and $4.0 < B/d < 7.5$: K_t is primarily dependent on B/d ; $S_{om} > 0.02$ and $B/d < 4.0$: K_t remains constant. These findings provide valuable insights for optimizing the design and placement of artificial reefs for effective coastal protection in shallow water environments.

Keywords: Artificial reefs; Shallow water waves; Wave Representative Slope; Infragravity Waves; Wave reduction efficiency.

Table of content

- 1** Huong, N.V.; Khuong, N.V.; Minh, N.H.; Liem, P.V.; Hai, N.V.; Duong, P.T.T. Study on biological characteristics and distribution of diamond squid in Vietnamese sea water. *J. Hydro-Meteorol.* **2025**, *772*, 1–10.
- 11** An, N.D.; Hoan, D.N.; Bao, T.D. Applying a multi-criteria evaluation method to determine the level of occupational safety and health in the blasting process for limestone quarries in the Nam Trung Bo of Vietnam. *J. Hydro-Meteorol.* **2025**, *772*, 11–23.
- 24** Ha, D.T.; Nam, N.T. Assessment of flooding impact and investigation of adaptive measures for cities in Binh Duong Province, 2030-2050. *J. Hydro-Meteorol.* **2025**, *772*, 24–37.
- 38** Tuyen, D.B.; Hong, D.X.; Hien, L.T.D. Application of Sentinel-2 remote sensing imagery combined with multivariate regression to determine the dynamics of total suspended solids concentration in Thi Tinh River, Binh Duong Province. *J. Hydro-Meteorol.* **2025**, *772*, 38–50.
- 51** Dinh, V.X. Application of Google Earth Engine in developing a forest cover change monitoring system in Vietnam. *J. Hydro-Meteorol.* **2025**, *772*, 51–66.
- 67** Hung, L.V.; Hien, T.X.; Tuan, V.A.; Quynh, L.T.T.; Thuy, L.P.; Mai, V.T.N.; Tuyet, N.T. Impact of unseasonal rain on water resources on major rivers in the Central Highlands. *J. Hydro-Meteorol.* **2025**, *772*, 67–76.
- 77** Minh, N.Q.; Trung, N.V. Assessing the impact of wind on the response time to reach the search and rescue area at sea: A case study in the Gulf of Tonkin. *J. Hydro-Meteorol.* **2025**, *772*, 77–87.
- 88** Thuy, P.T.; Trung, L.H. Influence of wave representative slope on artificial reef effectiveness in shallow water. *J. Hydro-Meteorol.* **2025**, *772*, 88–97.