



Xu hướng nghiên cứu lựa chọn năng lượng tái tạo cho cảng biển sử dụng phương pháp lựa chọn đa tiêu chí

Multi-Criteria Decision Analysis for Renewable Energy Adoption in Seaports: Current Trends

Nguyễn Tất Quyền¹, Đinh Gia Huy^{1,*}, Phạm Nguyên Đăng Khoa¹, Phạm Thái Hoàng¹, Trần Thị Mỹ Trúc¹, Bùi Thị Thanh Thảo¹

¹ Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

Từ khóa:

TÓM TẮT

Cảng xanh
Lựa chọn đa tiêu chí
Năng lượng tái tạo
Phát triển bền vững

Ngành vận tải biển quốc tế phát thải 2.9% lượng CO₂ toàn cầu năm 2018, với mục tiêu phát thải ròng bằng 0 của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) đến năm 2050, các cảng biển - mắt xích quan trọng trong chuỗi logistics đang phải đối mặt với áp lực cấp thiết chuyển đổi sang năng lượng tái tạo. Bài báo tổng quan này sử dụng phương pháp thống kê và tổng hợp tài liệu để đánh giá các công bố về lựa chọn năng lượng tái tạo mới cho cảng biển, đặc biệt là các nghiên cứu sử dụng phương pháp lựa chọn đa tiêu chí. Các phương pháp lựa chọn đa tiêu chí thường được sử dụng trong các nghiên cứu là AHP, TOPSIS và các biến thể của chúng, các tiêu chí kinh tế và kỹ thuật, đặc biệt chi phí đầu tư và an toàn vận hành, luôn được ưu tiên hàng đầu, 4 xu hướng quan trọng trong các nghiên cứu cũng được xác định. Nghiên cứu cung cấp khung phân tích có giá trị cho các nhà hoạch định chính sách và quản lý cảng.

Keywords:

ABSTRACT

Green ports
Multi-criteria
decision-making
Renewable energy
Sustainable
development

International maritime shipping accounted for 2.9% of global CO₂ emissions in 2018. With the International Maritime Organization's (IMO) net-zero emission target by 2050, seaports—critical nodes in the logistics chain—face increasing pressure to transition toward renewable energy sources. This review paper employs statistical analysis and systematic literature synthesis to evaluate published research on renewable energy selection for seaports, with particular emphasis on studies utilizing multi-criteria decision-making (MCDM) methodologies. The analysis reveals that AHP (Analytic Hierarchy Process), TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), and their variants are the predominantly applied methods. Economic and technical criteria, particularly investment costs and operational safety, consistently emerge as top priorities across studies. Furthermore, four significant research trends are identified and discussed. This study provides a valuable analytical framework for policymakers and port authorities in their renewable energy transition decision-making processes.

* Đinh Gia Huy. Trường Đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh
Email: huy.dinh@ut.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST140612>

Ngày nhận bài: 08/10/2025; Ngày nộp bài sửa: 14/11/2025; Ngày chấp nhận đăng: 15/11/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/11/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Ngành vận tải biển đóng vai trò then chốt trong nền kinh tế toàn cầu, vận chuyển khoảng 80% khối lượng hàng hóa thương mại quốc tế [1], [2]. Tuy nhiên, hoạt động hàng hải cũng là nguồn phát thải khí nhà kính đáng kể, đóng góp khoảng 2.89% tổng lượng khí thải CO₂ toàn cầu. Với xu hướng tăng trưởng thương mại quốc tế, lượng phát thải từ ngành hàng hải dự kiến sẽ tăng khó kiểm soát nếu không có biện pháp can thiệp hiệu quả [3]. Trong bối cảnh đó, Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) đã thông qua Chiến lược IMO 2023 về giảm phát thải khí nhà kính từ tàu biển, với mục tiêu đạt mức phát thải ròng bằng không trước năm 2050 [2].

Cảng biển, với vai trò là mắt xích quan trọng trong chuỗi logistics hàng hải, tiêu thụ một lượng năng lượng khổng lồ cho các hoạt động vận hành, bao gồm xếp dỡ hàng hóa, chiếu sáng, làm lạnh, và cung cấp điện bờ cho tàu neo đậu [4], [5]. Nghiên cứu của AbuAlghanam cho thấy các hoạt động tại cảng biển là nguồn gây ô nhiễm môi trường biển nghiêm trọng do lượng khí thải quá mức từ các hoạt động của chúng [6]. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết về việc chuyển đổi từ nguồn năng lượng hóa thạch sang năng lượng tái tạo và nhiên liệu thay thế sạch hơn.

Khái niệm "cảng xanh" (green port) đã nổi lên như một giải pháp toàn diện nhằm cân bằng giữa phát triển kinh tế và bảo vệ môi trường [7], [4]. Cảng xanh không chỉ tập trung vào việc giảm phát thải mà còn hướng đến tối ưu hóa hiệu quả năng lượng, tích hợp công nghệ thông minh, và phát triển hạ tầng bền vững. Năm 2024 Parolin và cộng sự chỉ ra rằng cộng đồng năng lượng tái tạo (RECs) có thể đáp ứng tới 60% tổng nhu cầu năng lượng của cảng và đạt được 90% mức tự tiêu thụ năng lượng tái tạo.

Bài báo này được thực hiện nhằm: Tổng quan và phân loại một cách hệ thống các ứng dụng của phương pháp MCDM trong lĩnh vực chuyển đổi năng lượng cảng biển dựa trên 63 nghiên cứu gần đây; Phân tích các xu hướng nghiên cứu và phát triển chính (kinh tế, kỹ thuật, xã hội, môi trường); Đánh giá tính hiệu quả và sự phù hợp của các phương pháp khác nhau cho các bài toán cụ thể; Đề xuất một khung phân tích tích hợp cùng các

hướng nghiên cứu trong tương lai, đặc biệt hữu ích cho bối cảnh các nước đang phát triển. Bài báo lọc các dữ liệu tại các nhà xuất bản uy tín thế giới, các tạp chí thuộc Scopus/WoS từ những năm 2020 - 2025 và một số nghiên cứu có tầm ảnh hưởng trước 2020. Số lượng bài báo xem xét lên tới 362 bài, các bài báo sử dụng phương pháp MCDM được lựa chọn, các bài báo được trích dẫn nhiều, được đăng tải trên các tạp chí uy tín, cuối cùng 63 bài báo đã được lựa chọn.

Để đạt được các mục tiêu này, bài báo sẽ trả lời các câu hỏi nghiên cứu sau:

- Các phương pháp MCDM nào được sử dụng phổ biến nhất trong nghiên cứu chuyển đổi năng lượng cảng biển và tại sao chúng lại được ưa chuộng?;
- Các tiêu chí nào thường được xem xét trong quá trình ra quyết định, và tầm quan trọng của chúng thay đổi như thế nào tùy thuộc vào bối cảnh cụ thể?;
- Xu hướng phát triển của các phương pháp MCDM trong lựa chọn nguồn năng lượng thay thế?;
- Làm thế nào để xây dựng một khung phân tích MCDM tích hợp, linh hoạt và hiệu quả cho bài toán chuyển đổi năng lượng tại cảng biển, đặc biệt trong điều kiện của các nước đang phát triển?.

2. Thách thức trong lựa chọn giải pháp năng lượng cho cảng biển

Các quá trình chuyển đổi năng lượng tại cảng biển đối mặt với nhiều thách thức phức tạp và đa chiều. Việc lựa chọn nguồn năng lượng tái tạo phù hợp phụ thuộc vào nhiều yếu tố như điều kiện địa lý, khí hậu, cơ sở hạ tầng hiện có, và khả năng tài chính [9], [10]. Mỗi cảng biển có đặc điểm riêng biệt về vị trí địa lý, quy mô hoạt động, và loại hình dịch vụ, dẫn đến không có giải pháp năng lượng nào phù hợp cho tất cả các cảng [11].

Đánh giá và lựa chọn nhiên liệu thay thế cho vận tải biển là một vấn đề phức tạp liên quan đến nhiều tiêu chí mâu thuẫn nhau. Biodiesel như một nhiên liệu biển thay thế cho thấy cần xem xét đồng thời 16 yếu tố SWOT với sự tham gia của các chuyên gia hàng hải. Tương tự, nghiên cứu của Bayraktar và cộng sự vào năm 2024 phân tích việc sử dụng năng lượng hạt nhân trên tàu thương mại cũng chỉ ra sự phức tạp trong việc cân bằng giữa lợi ích về mật độ

năng lượng cao và các thách thức về an toàn, an ninh [13].

Khía cạnh kinh tế luôn là yếu tố then chốt trong quyết định đầu tư. Quy hoạch hạ tầng năng lượng tái tạo cho cảng cho thấy tỷ suất hoàn vốn đầu tư (ROI) có thể chênh lệch tới 38.73% giữa các phương án thiết kế khác nhau [14]. Chi phí đầu tư ban đầu cao, thời gian hoàn vốn dài, và sự không chắc chắn về chính sách hỗ trợ là những rào cản lớn đối với việc triển khai năng lượng tái tạo tại cảng [15].

Yếu tố kỹ thuật và công nghệ đặt ra nhiều thách thức về tích hợp hệ thống, độ tin cậy cung cấp điện, và khả năng lưu trữ năng lượng. Nghiên cứu đánh giá khả năng thích ứng của hệ thống tích hợp gió-mặt trời-hydrogen-lưu trữ năng lượng cho thấy cần có phương pháp đánh giá toàn diện từ nhiều góc độ bao gồm chính sách, phát triển công nghệ, khả năng cung cấp năng lượng, hiệu quả kinh tế và thân thiện môi trường [16].

3. Phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) trong chuyển đổi năng lượng cảng biển

3.1. Vai trò của phương pháp

Trong bối cảnh phải xem xét đồng thời nhiều tiêu chí mâu thuẫn và phức tạp, các phương pháp ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) đã chứng minh là công cụ hữu hiệu để hỗ trợ các nhà quản lý và hoạch định chính sách [17], [18]. MCDM cho phép đánh giá và xếp hạng các phương án dựa trên nhiều tiêu chí định lượng và định tính, tạo ra quyết định cân bằng và khoa học.

Phương pháp Phân tích Thứ bậc (AHP - Analytic Hierarchy Process) là một trong những kỹ thuật MCDM được sử dụng rộng rãi nhất trong lĩnh vực năng lượng tái tạo [19]. AHP cho phép phân rã vấn đề phức tạp thành cấu trúc phân cấp, so sánh từng cặp tiêu chí và phương án, từ đó xác định trọng số và thứ tự ưu tiên. Nghiên cứu sử dụng AHP để đánh giá và xếp hạng các nguồn năng lượng bền vững, trong đó năng lượng mặt trời được xác định là phương án tối ưu, tiếp theo là gió và thủy điện [20].

TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) là phương pháp phổ

biến thứ hai, thường được kết hợp với AHP để tận dụng ưu điểm của cả hai phương pháp [21], [22], [23]. Nghiên cứu áp dụng mô hình tích hợp Spherical fuzzy AHP-TOPSIS để lựa chọn nguồn năng lượng bền vững cho khu công nghiệp tại Việt Nam, cho thấy sự hiệu quả khi kết hợp các phương pháp [24].

Các phương pháp MCDM khác như VIKOR, PROMETHEE, ELECTRE cũng được ứng dụng trong các bối cảnh cụ thể. Sharma và cộng sự sử dụng ba phương pháp AHP-VIKOR, AHP-TOPSIS và AHP-PROMETHEE trong nghiên cứu năm 2023 để lựa chọn nhiên liệu microemulsion không chất hoạt động bề mặt [25], sau đó sử dụng hệ số tương quan thứ hạng Spearman để tổng hợp kết quả từ các phương pháp khác nhau.

Một xu hướng quan trọng trong nghiên cứu gần đây là việc tích hợp lý thuyết tập mờ (fuzzy set theory) vào các phương pháp MCDM truyền thống để xử lý tính không chắc chắn và mơ hồ trong đánh giá của chuyên gia [18]. Lý thuyết mờ cho phép biểu diễn các đánh giá định tính bằng các số mờ, phù hợp với tư duy con người và tăng độ chính xác của kết quả.

Fuzzy AHP đã được áp dụng rộng rãi trong nhiều nghiên cứu về năng lượng tái tạo. Nghiên cứu so sánh các phương pháp MCDM dựa trên Fuzzy AHP cho bài toán lựa chọn khái niệm xanh, cho thấy F-AHP kết hợp với F-TOPSIS và F-GRA cho kết quả nhất quán [26]. Tương tự, Kim và cộng sự sử dụng phương pháp Fuzzy AHP để xác định các tiêu chí lựa chọn cảng cung cấp LNG, với kết quả chỉ ra rằng các công ty vận tải biển ưu tiên yếu tố an toàn hoặc an ninh và dịch vụ cảng hơn là danh tiếng cảng [27].

Các biến thể mới của lý thuyết mờ như Spherical Fuzzy và Pythagorean Fuzzy ngày càng được quan tâm do khả năng biểu diễn độ bất định tốt hơn. Phát triển phương pháp Spherical Fuzzy AHP mới và áp dụng cho bài toán lựa chọn địa điểm năng lượng tái tạo [28]. Çalik và cộng sự đề xuất phương pháp Pythagorean Fuzzy AHP và Fuzzy TOPSIS trong nghiên cứu năm 2021 cho lựa chọn nhà cung cấp xanh trong bối cảnh Công nghiệp 4.0 [22].

3.2. Ứng dụng MCDM trong các khía cạnh chuyển đổi năng lượng cảng biển

3.2.1. Lựa chọn nguồn năng lượng tái tạo cho cảng:

Việc lựa chọn nguồn năng lượng tái tạo phù hợp cho cảng biển đã được nghiên cứu rộng rãi sử dụng các phương pháp MCDM. Nghiên cứu của M. I. Ramli và cộng sự áp dụng AHP để lựa chọn nguồn năng lượng tái tạo cho cảng xanh, kết quả cho thấy năng lượng mặt trời là phương án được ưu tiên nhất, tiếp theo là gió, sinh khối và sóng biển cho trường hợp cảng Kuala Tanjung [7].

Bảng 1. Thống kê các bài báo điển hình sử dụng MCDM trong lựa chọn nguồn nhiên liệu thay thế.

STT	Phương pháp MCDM	Tài liệu tham khảo
1	AHP	[7], [11], [17], [18], [19], [20], [27], [31], [32], [38], [44], [46], [61], [62], [63]
2	AHP-TOPSIS	[16], [21], [23], [24], [30], [42], [56]
3	SWOT-AHP	[12], [13], [41], [51]
4	Fuzzy AHP	[26], [27], [28], [43], [57]
5	Fuzzy AHP-TOPSIS	[23], [30], [40]
6	Spherical Fuzzy AHP	[24], [28], [29], [53]
7	Spherical Fuzzy AHP-TOPSIS	[24]
8	Spherical Fuzzy AHP-WASPAS	[34]
9	Spherical MCDM	Fuzzy [49]
10	Pythagorean AHP-TOPSIS	Fuzzy [30], [45]
11	Pythagorean AHP-VIKOR	Fuzzy [58]
12	Neutrosophic TOPSIS	AHP- [48]
13	AHP-VIKOR	[25], [42]
14	AHP-PROMETHEE	[25]
15	AHP-COPRAS	[39]
16	G-AHP-WASPAS	[21]
17	AHP-Entropy	[22], [46]
18	AHP-FMEA	[46]
19	AHP-QFD	[56]
20	Fuzzy AHP-CoCoSo	[54]

Nghiên cứu của J. Wang và cộng sự phát triển phương pháp đánh giá toàn diện cho quy hoạch và thiết kế hệ thống năng lượng gió tự cung tự cấp tại cảng, sử dụng kết hợp AHP-Entropy Weight Method (EWM) để tính toán trọng số chủ quan và khách quan của các yếu tố [29]. Nghiên cứu áp dụng thuật toán ra quyết định tổng hợp để tối ưu hóa hệ thống năng lượng tái tạo lai cho cảng Takoradi, Ghana, với kết quả chỉ ra hệ thống PV/gió/pin/khí tự nhiên là phương án tối ưu [30].

3.2.2. Đánh giá và lựa chọn nhiên liệu thay thế:

Vấn đề lựa chọn nhiên liệu thay thế cho vận tải biển nhận được sự quan tâm đặc biệt trong bối cảnh quy định IMO 2023. Sử dụng AHP để phân loại hai nhiên liệu thay thế (LNG và hydrogen xanh) dựa trên bốn tiêu chí (kinh tế, kỹ thuật, môi trường và xã hội), với kết quả cho thấy LNG hiện tại là lựa chọn tốt nhất cho vận tải biển [31].

Theo Alam MdMoshiul và cộng sự phát triển khung lựa chọn nhiên liệu thay thế hướng tới phi carbon hóa vận tải biển sâu, sử dụng TOPSIS với góc nhìn từ các bên liên quan cấp doanh nghiệp [1]. Kết quả cho thấy các tiêu chí quan trọng nhất đối với các bên liên quan cấp doanh nghiệp là khía cạnh công nghệ, tình trạng công nghệ, chi phí, tác động hệ sinh thái và cân nhắc về sức khỏe-an toàn.

Một số nghiên cứu sử dụng phương pháp MCDM tích hợp mờ kết hợp Fuzzy AHP và Fuzzy TOPSIS để lựa chọn các phương án công nghệ tuân thủ quy định trong môi trường thông tin mờ hồ [23]. Chín tiêu chí trong ba khía cạnh bền vững được phân tích và đánh giá đối với bốn phương án khả thi, với nhiên liệu hàm lượng lưu huỳnh thấp được xác định là phương án phù hợp nhất.

3.2.3. Lựa chọn địa điểm cho các dự án năng lượng tái tạo:

Lựa chọn địa điểm là một trong những thách thức lớn nhất cho các dự án năng lượng tái tạo [32]. Nghiên cứu của Chen và cộng sự phát triển khung quyết định ba giai đoạn dựa trên GIS-MCDM để xác định các khu vực biển tiềm năng, trích xuất và đánh giá các phương án địa điểm cho nhà máy điện dòng chảy thủy triều [33]. Phương pháp trọng số kết hợp dựa trên Fuzzy Group AHP (FGAHP) và

CRITIC được phát triển để tính toán trọng số tiêu chí.

Le và cộng sự đề xuất phương pháp MCDM hai giai đoạn sử dụng Spherical Fuzzy cho lựa chọn địa điểm nhà máy điện gió ngoài khơi [34]. SF-AHP được sử dụng trong giai đoạn đầu để xác định mức độ quan trọng của các tiêu chí đánh giá, sau đó WASPAS được sử dụng để xếp hạng các địa điểm. Nghiên cứu trường hợp tại Việt Nam đã được thực hiện để kiểm tra tính hiệu quả của phương pháp đề xuất.

4. Các tiêu chí ảnh hưởng đến chuyển đổi năng lượng tại cảng biển

4.1. Nhóm tiêu chí Kinh tế

Bảng 2. Nhóm tiêu chí Kinh tế.

STT	Tiêu chí phụ	Nghiên cứu đề cập	Số lượng
1	Chi phí đầu tư hệ thống	[10], [12], [14], [15], [35], [52]	6
2	Chi phí vận hành và bảo trì	[10], [12], [39], [44]	4
3	Chi phí năng lượng (LCOE)	[35], [52], [53]	3
4	Khả năng tạo lợi nhuận/ROI	[8], [14], [40]	3
5	Thời gian hoàn vốn	[8], [14], [39]	3
6	NPV (Giá trị hiện tại ròng)	[14], [35], [39]	3

Chi phí đầu tư hệ thống là một trong những tiêu chí luôn luôn được nhắc tới trong các nghiên cứu. Chi phí đầu tư ban đầu là yếu tố then chốt trong quyết định chuyển đổi năng lượng. Nghiên cứu về quy hoạch hạ tầng năng lượng tái tạo cho cảng chỉ ra rằng chi phí hiện tại ròng (NPV) và tỷ suất hoàn vốn đầu tư (ROI) có sự khác biệt đáng kể giữa các kịch bản [14]. Cụ thể, ROI cho vận hành ONG (on-grid) cao hơn 38.73% và 35.91% so với vận hành OFFG (off-grid) với thiết bị lưu trữ năng lượng trong trường hợp SNG và WNG tương ứng. Đánh giá hệ thống năng lượng tái tạo lai (HRES) cho cảng Thị Nại, Việt Nam xác định cấu hình tối ưu bao gồm mảng quang điện 6,175 kW, máy phát biogas 500 kW và bộ chuyển đổi 2,357 kW với chi phí hiện tại ròng 44.6 triệu USD [35]. Phân tích tính khả thi

kinh tế-kỹ thuật cho cảng Jabel Ali, UAE cho thấy khi áp dụng hệ thống PV mặt trời, đạt được giảm chi phí tổng 10% và giảm 10.5% chi phí năng lượng cân bằng (LCOE). Hệ thống trang trại gió đạt giảm chi phí 20.8% với giảm 21% LCOE tương ứng [52].

Về chi phí vận hành và bảo trì được nhiều nghiên cứu đề cập tới, cụ thể trong nghiên cứu của P. Singh và cộng sự: chi phí đầu tư của hệ thống có trọng số tương đối 57.94%, nhấn mạnh tầm quan trọng của việc lựa chọn nguồn năng lượng tái tạo có giá trị cao hơn khía cạnh kinh tế [10]. Nghiên cứu A. E. Uyan và cộng sự đã phân tích tích hợp linear programming và AHP cho diesel/biodiesel/butanol cho thấy Blend 1 (70% diesel, 20% biodiesel, 10% butanol) có chi phí thấp nhất 1.2 USD/L với hiệu suất cao hơn [12].

4.2. Nhóm tiêu chí Kỹ thuật

An toàn trong vận hành: Rất nhiều nghiên cứu đưa ra tiêu chí này nổi bật là nghiên cứu của Kim và cộng sự, Nouri và cộng sự [27] [42]. Trong đó, đánh giá lựa chọn cảng cung cấp LNG sử dụng fuzzy-AHP cho thấy các công ty vận tải biển quyết định lựa chọn cảng LNG với sự nhấn mạnh mẽ hơn vào an toàn/an ninh (safety/security) hoặc dịch vụ cảng hơn là danh tiếng cảng [27]. Nghiên cứu của Nouri và cộng sự đánh giá 11 phương án vận chuyển hydrogen xanh xem xét 9 tiêu chí bao gồm độc tính và an toàn như các yếu tố quan trọng. Kết quả cho thấy tiêu chí quyết định có tác động đáng kể đến kết quả, đặc biệt là nguy hiểm/an toàn và tác động môi trường [42].

Bảng 3. Nhóm tiêu chí Kỹ thuật.

STT	Tiêu chí phụ	Nghiên cứu đề cập	Số lượng
1	An toàn trong vận hành	[1], [27], [42]	3
2	Khả năng vận hành ổn định/Độ tin cậy	[22], [63]	2
3	Mức độ sẵn có của đầu vào	[10], [32]	2
4	Mức độ trưởng thành công nghệ	[41], [63]	2
5	Hiệu quả sản xuất năng lượng	[10], [24], [41]	3

6	Kết nối lưới điện	[14], [16]	2
7	Yêu cầu hạ tầng	[16], [51]	2

Khả năng vận hành ổn định và liên tục được nhắc tới trong nghiên cứu của S. Çalik và cộng sự phát triển phương pháp đánh giá toàn diện cho hệ thống năng lượng gió tự cung tự cấp tại cảng, xem xét độ tin cậy (reliability) như một yếu tố quan trọng [22]. Phương án C đạt điểm đánh giá cao nhất 0.737 với xác suất 96.15% đạt điểm tối đa trong phạm vi biến động 20%.

Mức độ sẵn có của đầu vào: Được nghiên cứu trong 2 công bố của P. Singh và cộng sự và P. V. Nguyen và cộng sự [10] [32]. Trong đó nghiên cứu của P. Singh chỉ ra rằng trong các tiêu chí phụ kỹ thuật, hiệu suất của hệ thống là tiêu chí ưu tiên đầu tiên với trọng số tương đối 38.86%. Yêu cầu đất đai cho triển khai hệ thống năng lượng tái tạo là tiêu chí ưu tiên đầu tiên (43.38%) trong năm tiêu chí phụ môi trường. P. V. Nguyen đánh giá nguồn năng lượng tái tạo cho chuyển đổi xã hội và môi trường, chia khu vực nghiên cứu thành 9 khối nhỏ hơn. Kết quả cho thấy năng lượng mặt trời có ưu tiên cao nhất ở khối 2, trong khi tiềm năng năng lượng gió cao hơn ở khối 5 và 9.

Mức độ trưởng thành của công nghệ: T. Q. Le và cộng sự đánh giá công nghệ sản xuất hydrogen từ phụ phẩm nông nghiệp cho thấy chỉ số kỹ thuật chiếm 27.8%. Gasification là công nghệ được ưu tiên nhất (43.3%), tiếp theo là pyrolysis (29.6%) và fermentation (27.1%) [41]. Trong khi đó, A. Al-Qattan và cộng sự nghiên cứu lựa chọn năng lượng tái tạo cho Jordan cho thấy tiêu chí kỹ thuật có trọng số cao nhất 53.6%, với độ trưởng thành của công nghệ (maturity of technology) được xếp hạng cao với trọng số 0.875.

Hiệu quả sản xuất năng lượng: Nghiên cứu N. T. Nguyen áp dụng spherical fuzzy AHP-TOPSIS cho lựa chọn nguồn năng lượng bền vững tại Việt Nam. Năng lượng mặt trời được xác định tối ưu với chỉ số hiệu suất 0.8822, tiếp theo là gió (0.8766), sinh khối (0.8488) và năng lượng chất thải rắn (0.8135) [24].

4.3. Nhóm tiêu chí Môi trường

Bảng 4. Nhóm tiêu chí Môi trường.

STT	Tiêu chí phụ	Nghiên cứu đề cập	Số lượng
1	Giảm phát thải CO ₂	[2], [3], [5], [12], [35], [47]	6
2	Giảm phát thải NO _x	[5]	1
3	Giảm phát thải SO _x /Lưu huỳnh	[12]	1
4	Tác động môi trường	[3], [42], [47]	3
5	Yêu cầu đất đai	[10]	1

Giảm phát thải: Nghiên cứu của N. H. Tran và cộng sự lựa chọn nhiên liệu bền vững đáp ứng chiến lược IMO 2023 nhấn mạnh mục tiêu đạt phát thải khí nhà kính bằng không trước năm 2050 [2]. Trong khi đó, K. A. Alamoush và cộng sự đã đánh giá cung cấp năng lượng tái tạo cho cảng Alexandria cho thấy việc sử dụng fuel cells và tuabin gió ngoài khơi sẽ đạt được giảm lượng phát thải CO₂, NO_x và CO lần lượt là 80,441, 20,814 và 133,025 tấn mỗi năm [5]. Nghiên cứu của K. A. Alamoush và cộng sự chỉ ra rằng blend diesel/biodiesel/butanol tối ưu giảm 35% nồng độ lưu huỳnh và 36% phát thải CO₂ [12]. Nghiên cứu của G. H. Dinh cho cảng Thị Nại với 100% nguồn tái tạo, phát thải CO₂ hàng năm giảm xuống còn 1,286 kg [35].

Tác động đến môi trường và hệ sinh thái: Phương pháp tiếp cận liên quan đến năng lượng cho giảm phát thải CO₂ như một chiến lược quan trọng trên pathway cảng-tàu, nhấn mạnh tầm quan trọng của việc sử dụng nguồn năng lượng tái tạo, nhiên liệu sạch và lưới điện thông minh [3]. Nghiên cứu Kumar và cộng sự chỉ ra rằng các phương pháp tiếp cận thông minh liên quan đến việc sử dụng năng lượng hiệu quả và sạch cho pathways cảng-tàu để tạo ra phát thải net zero-CO₂ cho ngành vận tải biển cần được nghiên cứu khẩn cấp thêm [47].

Yêu cầu đất đai: xác định yêu cầu đất đai cho triển khai hệ thống năng lượng tái tạo là tiêu chí ưu tiên đầu tiên (43.38%) trong năm tiêu chí phụ môi trường [10].

4.4. Nhóm tiêu chí Xã hội

Sức khỏe cộng đồng: Phát triển khung lựa chọn nhiên liệu thay thế cho vận tải biển, trong đó các cân nhắc về sức khỏe-an toàn (health-safety considerations) được xác định là một trong những tiêu chí quan trọng nhất đối với các bên liên quan cấp doanh nghiệp [1].

Bảng 5. Nhóm tiêu chí Xã hội.

STT	Tiêu chí phụ	Nghiên cứu đề cập	Số lượng
1	Sức khỏe cộng đồng	[1]	1
2	Chính sách chính phủ	[13], [37], [51]	3
3	Tạo việc làm	[5]	1
4	Chấp nhận xã hội	[48]	1

Chính sách của chính phủ: N. T. Nguyen và cộng sự đã nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến phát triển nguồn năng lượng tái tạo tại cảng biển Việt Nam xác định chính sách hỗ trợ của chính phủ là

một trong ba yếu tố quan trọng nhất, cùng với định hướng phát triển cảng xanh và nguồn tài nguyên thiên nhiên. M. E. Bayraktar phân tích SWOT-AHP về năng lượng hạt nhân cho tàu thương mại chỉ ra "Tax privilege on green and alternative fuels supported by the authorities" (O4) là yếu tố phụ có trọng số cao nhất [13]. H. V. Nguyen và cộng sự về chuyển đổi sang hydrogen tại Việt Nam xác định "Weaknesses" là yếu tố ưu tiên cao nhất, với "Dedicated infrastructure for the transition to hydrogen fuel" và "Technological capacity for converting to hydrogen fuel" là các ưu tiên tiếp theo [51].

Tạo việc làm: K. A. Alamoush và cộng sự chỉ ra rằng việc chuyển đổi sang năng lượng tái tạo không chỉ giảm phát thải mà còn có thể tạo ra cơ hội việc làm cho cộng đồng địa phương [5].

Đối với Việt Nam, các chính sách thúc đẩy chuyển đổi năng lượng sạch nhằm mục tiêu bảo vệ môi trường đang thúc đẩy những nghiên cứu đề tài năng lượng tái tạo.

Bảng 6. Các nghiên cứu năng lượng tái tạo ở Việt Nam.

STT	Tên nghiên cứu	Chủ đề	Bài báo
1	Sustainable Energy Source Selection for Industrial Complex in Vietnam: A Fuzzy MCDM Approach	Lựa chọn nguồn năng lượng cho khu công nghiệp Việt Nam: Nghiên cứu chuyên biệt về khu công nghiệp Việt Nam Sử dụng phương pháp Fuzzy MCDM	[24]
2	Research on Factors Affecting the Development of Renewable Energy Resources at Vietnam Seaports	Nghiên cứu chuyển đổi năng lượng tại cảng biển Việt Nam: Phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến phát triển năng lượng tái tạo tại cảng	[37]
3	Switching to hydrogen fuel adoption in developing economies: A case study of Vietnam	Chuyển đổi sang nhiên liệu hydrogen tại Việt Nam	[51]

Bảng 7. Tổng hợp các phương pháp nghiên cứu đã được công bố.

STT	Nghiên cứu	Nhóm tiêu chí được xem xét	Phương pháp MCDM	STT	Nghiên cứu	Nhóm tiêu chí được xem xét	Phương pháp MCDM
1	[10]	Kinh tế, Kỹ thuật, Môi trường	AHP	3	[18]	Kinh tế, Kỹ thuật, Môi trường	SAW-AHP
2	[12]	Kinh tế, Môi trường	Linear Programming-AHP	4	[24]	Tất cả 4 nhóm (6 tiêu chí chính, 26 tiêu chí phụ)	Spherical Fuzzy AHP-TOPSIS
				5	[39]	Kinh tế, Kỹ thuật, Môi trường, Xã hội	COPRAS-AHP

STT	Nghiên cứu	Nhóm tiêu chí được xem xét	Phương pháp MCDM	Loại năng lượng	Số nghiên cứu đề cập	Tài liệu tham khảo	Tỷ lệ (%)
6	[41]	Kinh tế (50.7%), Kỹ thuật (27.8%), Môi trường (21.5%)	AHP			[30], [35], [36], [37], [39], [45], [53], [56], [57], [59], [63]	
7	[63]	Kỹ thuật (53.6%), Môi trường (29.0%), Địa lý (11.3%), Kinh tế-xã hội (6.0%)	AHP			[1], [4], [7], [9], [10], [11], [14], [16], [17], [20], [24], [28], [29], [30], [34], [35], [36], [37], [39], [45], [53], [56], [57], [59]	38.1%
				Wind (onshore/off shore)	24	[7], [9], [10], [12], [21], [24], [25], [32], [35], [37], [41], [43], [44], [47], [56]	23.8%
				Biomass/Bio gas	15	[1], [16], [31], [35], [38], [41], [42], [50], [51], [60], [61], [62]	19.0%
				Hydrogen (xanh)	12	[21], [32], [41], [49], [61]	7.9%
				Waste-to-energy	5	[7], [10], [33], [37]	6.3%
				Tidal/Wave	4		

Từ những thống kê trên có thể thấy các nhóm tiêu chí về kỹ thuật và kinh tế được xem xét nhiều nhất và được các nhà nghiên cứu quan tâm nhiều nhất. Các nghiên cứu sau này càng có xu hướng nghiên cứu đa tiêu chí nhiều hơn. Việc này phản ánh các nghiên cứu mới hiện nay phát triển từ các nghiên cứu cũ, với sự thay đổi của thế giới và ngày càng yêu cầu cao hơn trong việc bảo vệ môi trường, sinh thái cho mục tiêu phát triển bền vững thì các nhóm yếu tố liên quan tới môi trường ngày càng được chú trọng hơn. Với việc sử dụng các phương pháp MCDM, việc xem xét tới rất nhiều yếu tố có thể dẫn tới số lượng phiếu khảo sát khó đạt được các chỉ số nhất quán (CR) tốt. Tuy nhiên, các nghiên cứu trong các năm gần đây và xu hướng trong tương lai càng phát triển việc xem xét nhiều yếu tố là tất yếu và điều này sẽ gây khó khăn hơn trong việc lấy phiếu khảo sát bởi số lượng câu hỏi trong phiếu sẽ khá lớn.

5. Kết quả lựa chọn các loại nhiên liệu thay thế từ các nghiên cứu

5.1. Tổng quan các loại năng lượng thay thế được nghiên cứu

Bảng 8. Bảng tổng hợp kết quả các năng lượng thay thế được lựa chọn.

Loại năng lượng	Số nghiên cứu đề cập	Tài liệu tham khảo	Tỷ lệ (%)
Năng lượng tái tạo cho cảng			
Solar/PV	28	[1], [2], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [14], [16], [17], [20], [24], [28], [29],	44.4%

Theo Bảng 8 trình bày tổng hợp kết quả về các loại năng lượng thay thế được lựa chọn từ những nghiên cứu đã công bố trước đây được phân tích. Kết quả cho thấy sự phân hóa rõ rệt giữa hai nhóm chính: năng lượng tái tạo cho cảng biển và nhiên liệu thay thế cho tàu thủy.

Kết quả tổng hợp cho thấy năng lượng mặt trời là lựa chọn được ưu tiên nhất với 28 nghiên cứu đề cập (44.4%). Con số này có thể được giải thích qua nhiều yếu tố. Nghiên cứu của Ramli và cộng sự chỉ ra rằng năng lượng mặt trời đạt điểm cao nhất trong đánh giá AHP cho cảng Kuala Tanjung, vượt trội so với gió, sinh khối và sóng biển [7]. Điều này phù hợp với nghiên cứu của Nguyen và cộng sự tại Việt Nam, trong đó năng lượng mặt trời đạt chỉ số hiệu suất 0.8822 bằng phương pháp Spherical Fuzzy AHP-TOPSIS, cao nhất trong các phương án được xem xét [24].

Về khía cạnh kinh tế, nghiên cứu của AbuAlghanam và cộng sự tại cảng Jabel Ali cho thấy hệ thống PV mặt trời có thể giảm 10% tổng chi phí và 10.5% chi phí năng lượng cân bằng (LCOE) [6]. Đặc biệt, nghiên cứu của Dinh và cộng sự về cảng Thị Nại xác định cấu hình tối ưu bao gồm mảng PV 6,175 kW kết hợp với các nguồn khác, với NPV là 44.6 triệu USD [35]. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng hiệu quả của năng lượng mặt trời phụ thuộc mạnh vào điều kiện địa lý và khí hậu. Nghiên cứu của Nguyen và cộng sự chỉ ra rằng tiềm năng năng lượng mặt trời cao nhất ở một số khu vực nhất định, trong khi các khu vực khác có thể phù hợp hơn với năng lượng gió [32].

Năng lượng gió đứng thứ hai với 24 nghiên cứu (chiếm 38.1%), cho thấy đây là phương án được xem xét nghiêm túc ngay sau năng lượng mặt trời. Nghiên cứu của Wang và cộng sự về hệ thống năng lượng gió tự cung tự cấp tại cảng sử dụng phương pháp AHP-Entropy cho thấy phương án C đạt điểm đánh giá cao nhất 0.737 với độ tin cậy 96.15% [29]. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của độ tin cậy trong vận hành hệ thống năng lượng gió.

Về hiệu quả kinh tế, kết quả từ cảng Jabel Ali cho thấy hệ thống trang trại gió có thể đạt mức giảm chi phí 20.8% với giảm 21% LCOE, vượt trội hơn so với năng lượng mặt trời [6]. Tuy nhiên, năng lượng gió ngoài khơi đòi hỏi đầu tư ban đầu lớn hơn và phức tạp hơn về mặt kỹ thuật. Nghiên cứu của Le và cộng sự về lựa chọn địa điểm nhà máy điện gió ngoài khơi tại Việt Nam sử dụng SF-AHP và WASPAS nhấn mạnh tầm quan trọng của việc lựa chọn địa điểm phù hợp [34]. Một xu hướng đáng chú ý là việc kết hợp năng lượng gió và mặt trời. Nghiên cứu của Zhang và cộng sự về hệ thống tích hợp gió-mặt trời-hydrogen-lưu trữ cho thấy sự kết hợp này có thể đạt được hiệu quả cao hơn, với khả năng cung cấp năng lượng ổn định và giảm phụ thuộc vào một nguồn duy nhất [16].

5.2. Phân tích những xu hướng trong nghiên cứu năng lượng cảng biển.

Từ những phân tích trên nhóm nghiên cứu nhận thấy rõ xu hướng:

- Những nghiên cứu ngày càng ưu tiên hệ thống kết hợp nhiều nguồn năng lượng nhằm đảm bảo độ tin cậy và tiết kiệm chi phí;
- Nghiên cứu về năng lượng tái tạo chỉ ra rằng hệ thống năng lượng tái tạo đủ khả năng đáp ứng nhu cầu năng lượng cảng và đáp ứng mục tiêu giảm lượng phát thải ròng đến năm 2050;
- Hệ thống lưu trữ năng lượng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo cung cấp ổn định;
- Chiến lược IMO 2023 đặt mục tiêu đạt phát thải ròng bằng không hướng đến những nghiên cứu khử carbon hoàn toàn.

Trong những nghiên cứu về năng lượng tái tạo, tính đặc thù khu vực quyết định hiệu quả khai thác năng lượng tái tạo. Lựa chọn tối ưu phụ thuộc vào điều kiện địa lý, khí hậu, nguồn lực sẵn có và khả năng tài chính của từng khu vực. Các nước đang phát triển có xu hướng ưu tiên năng lượng mặt trời và sinh khối do chi phí đầu tư thấp hơn.

6. Kết luận

Bài báo đã thực hiện tổng quan hệ thống về ứng dụng các phương pháp trong chuyển đổi năng lượng tại cảng biển dựa trên những công bố gần đây. Kết quả cho thấy AHP là phương pháp được sử dụng phổ biến nhất thường kết hợp với TOPSIS. Xu hướng tích hợp lý thuyết mờ (Fuzzy, Spherical Fuzzy, Pythagorean Fuzzy) vào các phương pháp truyền thống ngày càng tăng để xử lý tính không chắc chắn trong các đánh giá chuyên gia. Phân tích các tiêu chí cho thấy yếu tố kinh tế và kỹ thuật được quan tâm nhiều nhất, trong đó chi phí đầu tư hệ thống và an toàn vận hành là tiêu chí ưu tiên hàng đầu. Các tiêu chí môi trường, đặc biệt là giảm phát thải CO₂, ngày càng được chú trọng trong bối cảnh chiến lược IMO hướng đến giảm phát thải đến năm 2050. Nghiên cứu cũng xác định bốn xu hướng phát triển chính: Chuyển sang hệ thống lai kết hợp nhiều nguồn năng lượng; Tích hợp hệ thống lưu trữ năng lượng; Định hướng dài hạn hướng tới phi carbon hoàn toàn; Tính đặc thù theo điều kiện địa lý-kinh tế-kỹ thuật từng khu vực. Kết quả cho thấy, năng lượng mặt trời dẫn đầu với 44.4%, tiếp theo là gió (38.1%) và sinh khối (23.8%). Từ kết quả đó, nghiên cứu này nhằm thúc đẩy các nghiên cứu chuyên sâu hơn về chuyển đổi

năng lượng, sử dụng năng lượng tái tạo thay thế nguồn năng lượng hóa thạch hướng đến mục tiêu giảm phát thải, bảo vệ môi trường.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Nguyễn Tất Quyền: Đề xuất ý tưởng nghiên cứu, phân tích và đánh giá kết quả. **Đinh Gia Huy:** Định hướng nghiên cứu tổng thể, hướng dẫn thực hiện bài báo và đánh giá kết quả. **Phạm Nguyễn Đăng Khoa:** Tổng quan, tìm tài liệu, hệ thống tài liệu. **Phạm Thái Hoàng:** Tổng quan, tìm tài liệu, hệ thống tài liệu. **Trần Thị Mỹ Trúc:** Biên soạn bài báo, tổng quan tài liệu. **Bùi Thị Thanh Thảo:** Biên soạn bài báo, tổng quan tài liệu.

Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

1st Nguyen Tat Quyen. *University of Transport Ho Chi Minh City*

2nd Dinh Gia Huy. *University of Transport Ho Chi Minh City*

3rd Pham Nguyen Dang Khoa. *University of Transport Ho Chi Minh City*

4th Pham Thai Hoang. *University of Transport Ho Chi Minh City*

5th Tran Thi My Truc. *University of Transport Ho Chi Minh City*

6th Bui Thi Thanh Thao. *University of Transport Ho Chi Minh City*

*Corresponding author: huy.dinh@ut.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] A. Moshiul, R. Mohammad, and F. Hira, "Alternative fuel selection framework toward decarbonizing maritime deep-sea shipping," *Sustainability*, vol. 15, no. 6, art. no. 5571, 2023, doi: 10.3390/su15065571.
- [2] N. H. Tran Optimal selection of sustainable maritime fuels meeting the 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships, *Journal of Transportation Science and Technology*, 2024.
- [3] A. Hoang, A. Foley, S. Nižetić, Z. Huang, H. Ong, A. Ölçer, V. Pham, and X. Nguyen, "Energy-related approach for reduction of CO2 emissions: A strategic review on the port-to-ship pathway," *J. Clean. Prod.*, vol. 355, art. no. 131772, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131772..
- [4] M. Sadiq, S. W. Ali, Y. Terriche, M. U. Mutarraf, M. A. Hassan, F. Hamid, J. Y. Sze, C.-L. Su, and J. M. Guerrero, "Future greener seaports: A review of new infrastructure, challenges, and energy efficiency measures," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 75568-75587, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3081430.
- [5] K. A. Alamoush Sadek, I., Elgohary, "Assessment of renewable energy supply for green ports with a case study," *Environmental Science and Pollution Research*, 2022. Doi:10.1007/s11356-019-07150-2.
- [6] S. F. AbuAlghanam et al., "Experimental and techno-economic feasibility analysis of renewable energy technologies for Jabel Ali Port in UAE," *Energy Reports*, 2021. Doi:10.1016/j.egy.2021.08.102.
- [7] A. P. M. Tarigan, M. M. Hasan, M. K. A. Wahab, E. Dogheche, and A. Djamaludin, "Renewable energy source selection for a green port with AHP," in *Proc. IOP Conf. Ser., Earth Environ. Sci.*, Medan, Indonesia, Oct. 27-28, 2020, vol. 753, art. no. 012001, doi: 10.1088/1755-1315/753/1/012001.
- [8] A. Buonomano, G. F. Giuzio, R. Maka, A. Palombo, and G. Russo, "Empowering sea ports with renewable energy under the enabling framework of the energy communities," *Energy Convers. Manag.*, vol. 314, art. no. 118693, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118693.
- [9] C.-N. Wang, J.-C. Kao, Y.-H. Wang, V. T. Nguyen, V. T. Nguyen, and S. T. Husain, "A multicriteria decision-making model for the selection of suitable renewable energy sources," *Mathematics*, vol. 9, no. 12, art. no. 1318, Jun. 2021, doi: 10.3390/math9121318.
- [10] A. J. Percy and M. Edwin, "Feasibility assessment and prioritization of renewable energy resources: towards a energy transition for the society and the environment—a case study approach," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 26, no. 11, pp. 28007-28031, Aug. 2023, doi: 10.1007/s10668-023-03799-5.
- [11] G. Budak, X. Chen, S. Celik, et al., "A systematic approach for assessment of renewable energy using analytic hierarchy process," *Energy Sustain. Soc.*, vol. 9, art. no. 37, 2019, doi: 10.1186/s13705-019-0219-y.
- [12] M. Bayraktar, M. Pamik, M. Sokukcu, and O. Yuksel, "A SWOT-AHP analysis on biodiesel as an alternative future marine fuel," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 15, no. 1, pp. 1-16, Mar. 2023, doi: 10.1007/s10098-023-02501-7.

- [13] M. Bayraktar and O. Yuksel, "Analysis of the nuclear energy systems as an alternative propulsion system option on commercial marine vessels by utilizing the SWOT-AHP method," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 407, no. 2, art. no. 112265, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.nucengdes.2023.112265.
- [14] L. Li, M. Zhong, X. Ma, H. Zhao, M. Safdar, D. D. Chuwang, and Z. Zhang, "Optimal planning of renewable energy infrastructure for ports under multiple design scenarios considering system constraints and growing transport demand," *J. Clean. Prod.*, vol. 443, art. no. 143827, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143827.
- [15] D. K. Fossile, E. A. Frej, S. E. G. da Costa, E. P. de Lima, and A. T. de Almeida, "Selecting the most viable renewable energy source for Brazilian ports using the FITradeoff method," *J. Clean. Prod.*, vol. 260, art. no. 121107, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121107.
- [16] X. Xu, K. Du, and R. Yang, "Adaptability evaluation of wind-solar-hydrogen-energy storage in port-ship multi-energy integration system based on AHP-TOPSIS," in *Proc. 7th Int. Conf. Traffic Eng. Transp. Syst. (ICTETS 2023)*, Dalian, China, 2023, vol. 13064, art. no. 130641K, doi: 10.1117/12.3015897.
- [17] E. Ilbahar, S. Cebi, and C. Kahraman, "A state-of-the-art review on multi-attribute renewable energy decision making," *Energy Strategy Rev.*, vol. 25, pp. 18–33, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.04.014.
- [18] I. Kaya, M. Colak, and F. Terzi, "A comprehensive review of fuzzy multi criteria decision making methodologies for energy policy making," *Energy Strategy Rev.*, vol. 24, pp. 207–228, 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.03.003.
- [19] S. S. Rawat, A. Kumar, M. Ram, and H. Kumar, "A state-of-the-art survey on analytical hierarchy process applications in sustainable development," *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.*, vol. 7, no. 6, pp. 883–917, Dec. 2022, doi: 10.33889/IJMEMS.2022.7.6.056.
- [20] H. Zaheb, O. Obaidi, S. Mukhtar, H. Shirani, M. Ahmadi, and A. Yona, "Comprehensive analysis and prioritization of sustainable energy resources using analytical hierarchy process," *Sustainability*, vol. 16, no. 11, art. no. 4873, 2024, doi: 10.3390/su16114873.
- [21] A. Abdulvahitoglu and M. Kilic, "A new approach for selecting the most suitable oilseed for biodiesel production; the integrated AHP-TOPSIS method," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 3, art. no. 101604, 2022, doi: 10.1016/j.asej.2021.10.002.
- [22] A. Çalık, "A novel Pythagorean fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodology for green supplier selection in the Industry 4.0 era," *Soft Comput.*, vol. 25, pp. 2253–2265, 2021, doi: 10.1007/s00500-020-05294-9.
- [23] K. Q. Bui, A. I. Ölçer, M. Kitada, and P. Ballini, "Selecting technological alternatives for regulatory compliance towards emissions reduction from shipping: An integrated fuzzy multi-criteria decision-making approach under vague environment," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 235, no. 1, pp. 359–381, 2021, doi: 10.1177/1475090220917815.
- [24] N. T. Nguyen et al., "Sustainable Energy Source Selection for Industrial Complex in Vietnam: A Fuzzy MCDM Approach," *Energy Policy*, 2024. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3173609.
- [25] D. Majji, I. Abrar, and A. Dutta, "Multi-criteria decision-making framework for selection of surfactant-free microemulsion fuels as a sustainable diesel alternative," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 177, art. no. 108366, 2023, doi: 10.1016/j.compchemeng.2023.108366.
- [26] Z. Ayağ, "A comparison study of fuzzy AHP-based MCDM methods on green concept selection problem," in *Proc. MBP 2025 London Int. Conf. Manag. Bus. Pract.*, London, UK, Apr. 2025, pp. 113–114, doi: 10.20319/icssh.2025.113114.
- [27] A.-R. Kim, D.-W. Kwak, and Y.-J. Seo, "Evaluation of liquefied natural gas bunkering port selection," *Int. J. Logist. Res. Appl.*, 2019, doi: 10.1080/13675567.2019.1642311
- [28] F. Kutlu Gündoğdu and C. Kahraman, "A novel spherical fuzzy analytic hierarchy process and its renewable energy application," *Soft Computing*, 2022. DOI: 10.1007/s00500-019-04222-w.
- [29] H. Zhao, M. Zhong, L. Li, M. Safdar, and Z. Zhang, "A comprehensive evaluation method for planning and design of self-sufficient wind power energy systems at ports," *Sustainability*, vol. 15, no. 23, art. no. 16189, 2023, doi: 10.3390/su152316189.
- [30] F. Odoi-Yorke, J. J. Owusu, and L. Atepor, "Composite decision-making algorithms for optimisation of hybrid renewable energy systems: Port of Takoradi as a case study," *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 2131–2148, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.01.118.
- [31] I. C. Iancu et al., "Alternative marine fuels for cleaner maritime transport," *Marine Policy*, 2023.
- [32] N. Chattham, N. V. Thanh, and C. Jeenanunta, "Renewable energy from solid waste: A spherical fuzzy multi-criteria decision-making model addressing solid waste and energy challenges,"

- Energies*, vol. 18, no. 3, art. no. 589, 2025, doi: 10.3390/en18030589.
- [33] M. Shao, Y. Zhao, J. Sun, Z. Han, and Z. Shao, "A decision framework for tidal current power plant site selection based on GIS-MCDM: A case study in China," *Energy*, vol. 262, art. no. 125476, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125476
- [34] C. N. Wang, N. A. T. Nguyen, and T. T. Dang, "Offshore wind power station (OWPS) site selection using a two-stage MCDM-based spherical fuzzy set approach," *Sci. Rep.*, vol. 12, art. no. 4260, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-08257-2.
- [35] G. H. Dinh et al., "Hybrid renewable energy system design for a green port using HOMER Pro: A techno-economic assessment," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 14, no. 4, pp. 767-780, Jul. 2025. <https://doi.org/10.61435/ijred.2025.61344>
- [36] M. Parhamfar, I. Sadeghkhan, and A. M. Adeli, "Towards the application of renewable energy technologies in green ports: Technical and economic perspectives," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 17, no. 12, pp. 2998–3017, 2023, doi: 10.1049/rpg2.12811.
- [37] N. T. Nguyen et al., "Research on factors affecting the development of renewable energy resources at vietnam seaports," *Maritime Policy & Management*, 2023.
- [38] K. Xu, M. P. Brito, and P. Beullens, "Multi-criteria feature selection on maritime emission abatement alternatives," *Res. Transp. Bus. Manag.*, vol. 59, p. 101288, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rtbm.2025.101288.
- [39] A. Y. Chamzini and Fouladgar, "Selecting the optimal renewable energy using multi criteria decision making," *J. Bus. Econ. Manag.*, vol. 14, no. 5, pp. –, Nov. 2013, doi: 10.3846/16111699.2013.766257.
- [40] S. Wang, Q. Liu, S. Yuksel and H. Dincer, "Hesitant Linguistic Term Sets-Based Hybrid Analysis for Renewable Energy Investments," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 114223-114235, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935427.
- [41] N. N. Hoai, P. V. Minh, Q. L. Le, D. P. Van, H. P. Thi, and A. N. Hong, "Assessment of hydrogen production technologies from agricultural residues in Vietnam," *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 27, p. 101919, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.biteb.2024.101919.
- [42] A. Nouri et al., "Evaluation of green hydrogen carriers: A multi-criteria decision analysis tool," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022. DOI:10.1016/j.rser.2022.112764
- [43] N. H. Razak, H. Hashim, N. A. Yunus, and J. J. Klemeš, "Integrated linear programming and analytical hierarchy process method for diesel/biodiesel/butanol in reducing diesel emissions," *J. Clean. Prod.*, vol. 337, p. 130297, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130297.
- [44] M. Anwar, "Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects," *Fuel*, vol. 283, p. 119204, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.119204.
- [45] C. M. M. Rocha, D. A. Buelvas, I. V. Machado, and J. P. Peña, "Optimized selection of renewable energy sources based on regional potentials in Colombia: A comparative analysis of AHP and FAHP for sustainable development," *Int. J. Energy Res.*, Feb. 2025, doi: 10.1155/er/9257724
- [46] H. Chen and H. Wang, "Research on green supplier selection method based on improved AHP-FMEA," *Sustainability*, vol. 17, no. 7, p. 3018, 2025, doi: 10.3390/su17073018.
- [47] K. S. Mehra, V. Goel, and R. Kumar, "An integrated multi-attribute decision framework for sustainability assessment of renewable diesel fuel production pathways," *Energy Convers. Manag.*, 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.118461.
- [48] F. Zhou and T.-Y. Chen, "A hybrid group decision-making approach involving Pythagorean fuzzy uncertainty for green supplier selection," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 261, p. 108875, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijpe.2023.108875.
- [49] N. Mandić, H. Ukić Boljat, T. Kekez, and L. R. Luttenberger, "Multicriteria analysis of alternative marine fuels in sustainable coastal marine traffic," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 6, p. 2600, 2021, doi: 10.3390/app11062600.
- [50] T. A. L. Marcu, C. Gasparotti, and E. Rusu, "Green fuels — A new challenge for marine industry," *Energy Rep.*, vol. 7, suppl. 3, pp. 127–132, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.06.020.
- [51] L. T. T. Dang, H. Thi Bich Ngoc, and D. T. Nguyen, "Switching to hydrogen fuel adoption in developing economies: A case study of Vietnam," *Int. J. Green Energy*, vol. 21, no. 14, pp. 3218–3230, 2024, doi: 10.1080/15435075.2024.2374907.
- [52] I. Tronnebati, M. El Yadari, and F. Jawab, "A review of green supplier evaluation and selection issues using MCDM, MP and AI models," *Sustainability*, vol. 14, no. 24, p. 16714, 2022, doi: 10.3390/su142416714.
- [53] V. Srivastava, S. Bhardwaj, and G. Chaudhary, "An intelligent multi-criteria decision-based approach for sustainable growth of the energy sector: The

- case study of India and Vietnam,” presented at the ASPG Conf., Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2024.
- [54] M. Rahman et al., "Green supplier selection under supply risks using novel integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques," *Journal of Cleaner Production*, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141788
- [55] T. E. Saputro, T. Y. Rosiani, A. Mubin, S. K. Dewi, and T. Baroto, "Green supplier selection under supply risks using novel integrated fuzzy multi-criteria decision making techniques," *J. Clean. Prod.*, vol. 449, p. 141788, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.141788.
- [56] C. Bhowmik, S. Bhowmik, and A. Ray, "Selection of optimum green energy sources by considering environmental constructs and their technical criteria: A case study," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, pp. 13890–13918, 2021, doi: 10.1007/s10668-021-01244-z.
- [57] A. Ligus and P. Peternek, "Multi-Criteria Method for the Selection of Renewable Energy Sources in the Polish Industrial Sector," *Energies*, 2022.DOI:10.3390/en14092386.
- [58] F. Zhou and T. -Y. Chen, "An Integrated Multicriteria Group Decision-Making Approach for Green Supplier Selection Under Pythagorean Fuzzy Scenarios," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165216-165231, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3022377
- [59] C. Bhowmik, S. Bhowmik, and A. Ray, "Selection of optimum green energy sources by considering environmental constructs and their technical criteria: A case study," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, pp. 13890–13918, 2021, doi: 10.1007/s10668-021-01244-z.
- [60] Q. Zhang, Z. Tan, S. Wang, and L. Zhen, "Shore hydrogen deployment problem in green ports," *Comput. Oper. Res.*, vol. 165, p. 106585, May 2024, doi: 10.1016/j.cor.2024.106585.
- [61] V. Schulz, M. G. H. Bell, J. M. Rose, and D. G. Geers, "From fossil fuels to biofuels: Circular economy diversification for fossil fuel ports," *Transp. Res. Part D: Transp. Environ.*, vol. 144, p. 104796, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.trd.2025.104796.
- [62] A. S. Alamoush and A. M. Ismail, "Review of port generations development models: Addressing the energy transition gap," *Next Sustain.*, vol. 6, p. 100186, 2025, doi: 10.1016/j.nxsust.2025.100186.
- [63] N. Shatnawi and H. Abu-Qdais, "Selecting renewable energy options: An application of multi-criteria decision making for Jordan," *Sustain. Sci. Pract. Policy*, vol. 17, no. 1, pp. 210–220, Jun. 2021, doi: 10.1080/15487733.2021.1930715.