NGHIÊN CỨU MÔ HÌNH TỐI ƯU TÍCH HỢP HỖ TRỢ TRỰC QUAN NHẰM NÂNG CAO HIỆU QUẢ QUẢN LÝ KHO HÀNG THỦ CÔNG

AN INTEGRATED OPTIMIZATION MODEL WITH VISUAL SUPPORT FOR IMPROVING OPERATIONAL EFFICIENCY IN MANUAL WAREHOUSES

NGUYỄN THỊ MỸ LINH[1], PHẠM KHÁNH LINH[1], TĂNG THỊ NHƯ QUỲNH[1], PHẠM THỊ YẾN[2*]

[1]Sinh viên Khoa Kinh tế, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

[2]Khoa Kinh tế, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

DOI: https://doi.org/10.65154/jmst.1021

Tóm tắt

Nghiên cứu đề xuất một mô hình tối ưu tích hợp nhằm giải quyết đồng thời bài toán phân bổ vị trí lưu trữ và định tuyến di chuyển trong kho hàng thủ công, với mục tiêu tối thiểu hóa tổng quãng đường tác nghiệp. Phương pháp được xây dựng dựa trên sự kết hợp giữa thuật toán GRASP cho phân bổ vị trí và Theta cho định tuyến, đồng thời tích hợp lớp hỗ trợ trực quan AR/VR nhằm nâng cao khả năng triển khai trong thực tế. Hệ thống được phát triển dưới dạng nền tảng quản lý kho và thử nghiệm tại một kho thực tế tại Hải Phòng. Kết quả thực nghiệm cho thấy phương án đề xuất có kết quả tích cực với sự khác biệt có ý nghĩa thống kê. Mặc dù mức cải thiện còn hạn chế trong điều kiện kho có mật độ lưu trữ cao, nghiên cứu cho thấy tiềm năng của cách tiếp cận tích hợp trong việc nâng cao hiệu quả vận hành kho thủ công, đồng thời mở ra hướng ứng dụng công nghệ trực quan trong hỗ trợ tác nghiệp.*

Từ khóa: *Quản lý kho, phân bổ vị trí lưu trữ, định tuyến trong kho, tối ưu hóa tích hợp, kho thủ công, AR/VR, GRASP, Theta*.*

Abstract

This study proposes an integrated optimization model to simultaneously address the storage assignment and routing problems in manual warehouses, with the objective of minimizing total travel distance during operations. The proposed method combines the GRASP algorithm for storage allocation and the Theta algorithm for routing, while incorporating an AR/VR-based visualization layer to enhance practical applicability. A warehouse management system was developed and tested in a real warehouse in Hai Phong, Vietnam. Experimental results indicate that the proposed approach has a postive result with statistically significant differences. Although the level of improvement remains limited under high-density storage conditions, the findings demonstrate the potential of integrated approaches in enhancing operational efficiency in manual warehouses, while also highlighting the applicability of visualization technologies in supporting warehouse operations.*

Keywords: *Warehouse management, storage assignment, order picking routing, integrated optimization, manual warehouse, AR/VR.*

1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh logistics Việt Nam tăng trưởng nhanh, hệ thống kho bãi không ngừng mở rộng nhằm đáp ứng nhu cầu lưu chuyển hàng hóa. Tuy nhiên, chi phí logistics vẫn ở mức cao, chiếm khoảng 16 - 30% GDP, trong đó hoạt động kho bãi và quản lý tồn kho đóng vai trò đáng kể trong cấu trúc chi phí [1]. Mặc dù quy mô kho bãi liên tục gia tăng, phần lớn kho hàng, đặc biệt các kho có quy mô vừa và nhỏ, vẫn vận hành theo phương thức thủ công hoặc bán tự động, với mức độ ứng dụng công nghệ còn hạn chế [2, 3], việc bố trí hàng hóa và tổ chức không gian lưu trữ chủ yếu dựa trên kinh nghiệm, thiếu các công cụ hỗ trợ tối ưu, dẫn đến nhiều thao tác di chuyển không cần thiếu trong quá trình tác nghiệp.

Theo Tompkins và cộng sự, chi phí di chuyển chiếm tỷ trọng đáng kể trong vận hành kho [4], trong khi De Koster và cộng sự chỉ ra rằng khoảng 55% thời gian lấy hàng đến từ di chuyển [5]. Điều này cho thấy việc tối ưu quãng đường di chuyển là yếu tố then chốt ảnh hưởng đến hiệu quả tác nghiệp. Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng quãng đường di chuyển được quyết định đồng thời bởi phân bổ vị trí lưu trữ và định tuyến di chuyển, trong đó hai bài toán này có mối quan hệ phụ thuộc lẫn nhau và cần được xem xét

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

tích hợp [6, 7]. Tuy nhiên, tại Việt Nam, 2 bài toán này thường chưa đường xử lý đồng bộ, dẫn đến hiệu quả khai thác chưa đạt mức tối ưu và chưa tận dụng được đầy đủ tiềm năng của không gian lưu trữ.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất một mô hình tối ưu tích hợp nhằm giải quyết đồng thời bài toán phân bổ vị trí lưu trữ và định tuyến di chuyển trong kho thủ công, với mục tiêu tối thiểu hóa tổng quãng đường di chuyển trong quá trình tác nghiệp. Qua đó, nhóm nghiên cứu hướng tới nâng cao hiệu quả quản lý kho hàng thông qua việc hỗ trợ ra quyết định tác nghiệp, đồng thời nghiên cứu phải đảm bảo tính khả thi về chi phí và khả năng triển khai, phù hợp với điều kiện các doanh nghiệp vừa và nhỏ tại Việt Nam.

2. Tổng quan nghiên cứu

Tối ưu hóa trong quản lý kho hàng đã thu hút sự quan tâm rộng rãi, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu về hiệu quả vận hành và tốc độ xử lý đơn hàng ngày càng gia tăng. Các nghiên cứu trước đây chủ yếu tiếp cận theo hướng cải thiện từng thành phần riêng lẻ, nổi bật là bài toán phân bổ vị trí lưu trữ và bài toán định tuyến di chuyển.

Đối với bài toán phân bổ vị trí lưu trữ, các phương pháp phổ biến bao gồm lưu trữ ngẫu nhiên, chuyên dụng và theo khu vực; trong đó lưu trữ theo khu vực cho thấy hiệu quả trong việc giảm quãng đường di chuyển thông qua phân loại theo tần suất [8, 9]. Bên cạnh đó, các phương pháp tối ưu như heuristic (Greedy) và metaheuristic (Genetic Algorithm, Simulated Annealing) được áp dụng nhằm nâng cao chất lượng nghiệm trong các bài toán quy mô lớn [5], [10]. Tuy nhiên, phần lớn các tiếp cận này giả định môi trường tĩnh và chưa phản ánh đầy đủ tính động của hệ thống kho trong thực tế.

Đối với bài toán định tuyến, các thuật toán tìm đường như Dijkstra và A* được sử dụng rộng rãi nhằm xác định lộ trình ngắn nhất trong kho. Dù đảm bảo tính tối ưu trong môi trường có cấu trúc, các phương pháp này thường giả định cấu trúc lưu trữ cố định, do đó chưa xem xét mối quan hệ phụ thuộc giữa vị trí lưu trữ và hiệu quả định tuyến.

Nhằm khắc phục hạn chế này, một số nghiên cứu gần đây đã đề xuất các cách tiếp cận tích hợp. Nghiên cứu của nhóm tác giả Bashatah và Elnaggar kết hợp chiến lược phân bổ vị trí với các quy tắc định (S-shape, return, midpoint) để đánh giá tác động đồng thời của 2 yếu tố đến hiệu quả lấy hàng [11]; Muhojoki đã đề xuất tối ưu hóa thuật toán bằng cách tích hợp Genetic Algorithm với K- Medoids clustering để phân nhóm vị trí lưu trữ [12]; M. Mrad và cộng sự phát triển mô hình dựa trên Genetic Algorithm kết hợp Clarke & Wright savings heuristic nhằm đồng thời tối ưu quãng đường và chi phí vận hành [13]. Song song với đó, các công nghệ trực quan như AR/VR cũng được nghiên cứu nhằm hỗ trợ hiển thị vị trí và lộ trình trong không gian làm việc, cải thiện nhận thức và giảm sai sót; trong đó VR phục vụ mô phỏng môi trường, còn AR hỗ trợ hướng dẫn tác nghiệp trực tiếp [14, 15].

Mặc dù đã đạt được những kết quả nhất định, các nghiên cứu hiện nay vẫn tồn tại một số hạn chế đáng chú ý. Trước hết, phần lớn mô hình được xây dựng dựa trên giả định môi trường vận hành ổn định và mức độ tự động hóa cao, nên chưa phản ánh đầy đủ đặc thù của các hệ thống kho thủ công. Bên cạnh đó, nhiều phương pháp tối ưu có độ phức tạp tính toán lớn, làm giảm tính khả thi khi triển khai trong điều kiện thực tế, đặc biệt tại các kho quy mô vừa và nhỏ. Đồng thời, các hướng tối ưu hóa và công nghệ trực quan như AR/VR chủ yếu được phát triển tách biệt, thiếu một khung tiếp cận tích hợp nhằm hỗ trợ đồng thời ra quyết định và thực thi. Trong bối cảnh Việt Nam, hạn chế này càng rõ khi các nghiên cứu chủ yếu giải quyết từng bài toán riêng lẻ, trong khi các mô hình tích hợp gắn với điều kiện vận hành thực tế còn ít. Do đó, vẫn tồn tại khoảng trống nghiên cứu trong việc phát triển một mô hình tích hợp vừa tối ưu hóa phân bổ vị trí lưu trữ và định tuyến di chuyển, vừa đảm bảo khả năng triển khai thông qua các công cụ trực quan trong hệ thống kho thủ công.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đóng góp một cách tiếp cận tích hợp giữa phân bổ vị trí lưu trữ và định tuyến di chuyển thông qua việc đề xuất phương pháp kết hợp heuristic và thuật toán tìm đường nhằm cân bằng giữa hiệu quả tối ưu và khả năng áp dụng thực tế. Đồng thời, nghiên cứu bước đầu xem xét yếu tố động trong vận hành kho và tích hợp lớp hỗ trợ trực quan AR/VR nhằm nâng cao khả năng diễn giải và hỗ trợ ra quyết định tối ưu trong môi trường thực.

3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu áp dụng cách tiếp cận tích hợp giữa mô hình hóa chuỗi quyết định trong vận hành kho thông qua hai bài toán tối ưu cốt lõi gồm phân bổ vị trí lưu trữ và định tuyến lấy hàng.

Trong nghiên cứu này, các thuật toán đã được kiểm chứng được lựa chọn thay vì phát triển phương pháp mới, nhằm đảm bảo hiệu quả tính toán và khả năng triển khai trong môi trường thực tế. Với đặc thù không gian nghiệm lớn và yêu cầu phản hồi nhanh, thuật toán được lựa chọn phải cân bằng giữa chất lượng nghiệm và chi phí tính toán. Theo đó, bài toán phân bổ vị trí

lưu trữ được giải bằng GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), cho phép xây dựng phương án bố trí hiệu quả dựa trên tần suất thao tác và khoảng cách, đồng thời hạn chế ảnh hưởng của các quyết định cục bộ. Bài toán định tuyến được xử lý bằng Theta* - một biến thể của A* - giúp xác định lộ trình di chuyển linh hoạt và hạn chế các đoạn đi vòng không cần thiết.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu phát triển một hệ thống quản lý kho trên nền tảng web nhằm tích hợp dữ liệu hàng hóa, mô hình hóa không gian lưu trữ và triển khai các thuật toán tối ưu. Hệ thống hỗ trợ trực quan hóa cấu trúc kho và tác nghiệp thông qua các chế độ hiển thị AR/VR, góp phần nâng cao khả năng quan sát và ra quyết định trong vận hành.

Quy trình nghiên cứu được tiến hành như sau: (i) Phân tích thực trạng vận hành kho thông qua thu thập dữ liệu kho thực tế và các tài liệu nghiên cứu liên quan; (ii) Xác định yêu cầu hệ thống kho và bài toán tối ưu; (iii) Xây dựng mô hình toán tối ưu làm cơ sở cho việc thiết kế giải pháp tối ưu; (iv) Thiết kế cơ chế tích hợp AR/VR trong hệ thống đề xuất; (v) Nghiên cứu và phát triển nguyên mẫu hệ thống quản lý kho trên nền tảng web; (vi) Triển khai thử nghiệm với dữ liệu và môi trường kho thực; (vii) Đánh giá hiệu quả và đề xuất cải tiến.

4. Xây dựng mô hình toán tối ưu

4.1. Mô tả bài toán

Bài toán xem xét dựa trên kho hàng đơn khối hình chữ nhật. Các lối đi ngang phía trước và phía sau bố cục kết nối các lối đi lấy hàng song song. Mỗi lối đi lấy hàng có hai phía, với các giá kệ nằm ở cả hai bên trái và phải. Tất cả các lộ trình đều bắt đầu và kết thúc tại kho tổng, nơi nằm phía trước lối đi lấy hàng. Bài toán đặt ra cho việc điều phối hoạt động phân bổ và định tuyến hàng hóa dựa trên dữ liệu kho:

- Phân bổ hàng hóa: Xác định vị trí cụ thể của hàng hóa tùy theo từng yêu cầu và mức độ tồn kho.

- Bài toán định tuyến: Sau khi các vị trí thao tác được xác định, hệ thống tiến hành xác lập lộ trình di chuyển tối ưu cho người vận hành trong kho, nhằm kết nối vị trí xuất phát với các điểm thao tác và tối thiểu hóa quãng đường di chuyển.

Bài toán đặt ra các giả định sau:

Nếu $s_i < \sum_{o\in O} e_{oi}$, hàng i cần được bổ sung, với số vị trí lưu trữ cần thiết: $[(\sum_{o\in O} e_{oi} - s_i)/\mu_i]$

Bài toán được giải theo từng đợt ngắn hạn nhằm phản ánh tính biến động của nhu cầu thực tế. Mỗi vị trí lưu trữ khi được bổ sung sẽ được lấp đầy đến công suất tối đa và chỉ chứa một SKU.

Trong trường hợp bổ sung nhiều SKU, nghiên cứu giả định mỗi SKU được xử lý độc lập; nếu cần bổ sung nhiều vị trí trong cùng một chuyến, bài toán định tuyến tương ứng được giải sau khi xác định tập vị trí cần ghé.

Số lượng vị trí trống luôn đủ để đáp ứng nhu cầu bổ sung: $| E | \geq \sum_{i\in S}[(\sum_{o\in O} e_{oi} - s_i)/\mu_i]$

4.2. Trình bày bài toán

Định nghĩa biến:

• ***Các tập hợp:***

O: Tập hợp các đơn hàng ($o \in O$).

A: Tập hợp các tác vụ vận chuyển, dãy kệ và lối đi trong kho ($a \in A$).

B: Tập hợp các vị trí lưu trữ trên kệ hai phía của một dãy.

S: Tập hợp các loại hàng hóa/SKU được yêu cầu bởi các đơn hàng ($i \in S$).

R: Tập hợp các SKU cần được bổ sung (nhập kho) ($R = \{i \in S \mid s_i < \sum_{o\in O} e_{oi}\}$).

N: Tập hợp các vị trí lưu trữ trong kho ($j, j' \in N$).

N^*: Tập hợp các vị trí bao gồm cả cửa kho, kho trung tâm (depot), $N^* = N \cup \{0\}$.

E: Tập hợp các vị trí lưu trữ đang trống ban đầu.

T: Tập hợp các vị trí đã có hàng ban đầu $E \cup T = N$.

T_i: Tập hợp các vị trí ban đầu có chứa ít nhất một sản phẩm SKU.

H_o: Tập hợp các SKU trong đơn hàng o.

W_a: Tập hợp các vị trí lưu trữ trong dãy a.

• ***Tham số:***

e_{oi}: Số lượng mặt hàng, sản phẩm SKU I được yêu cầu trong đơn hàng o.

s_i: Số lượng tồn kho ban đầu của mặt hàng i ($s_i = \sum_{j\in T_i} q_j$).

μ_i: Sức chứa tối đa của một vị trí với mặt hàng i.

Q_j: Số lượng hàng hóa lưu trữ tại vị trí j ban đầu.

$d_{j,j'}$: Ma trận khoảng cách giữa vị trí j và j' (được trích xuất từ bản đồ số).

w_1, w_2: Lần lượt là các trọng số ưu tiên trong quá trình nhập hàng và và lấy hàng. ($w_2 > w_1$).

α, β, γ: Các hệ số trọng số cho hàm mục tiêu Slotting (Không gian, xếp chồng, khoảng cách).

• ***Đặt biến:***

v_{jo}: Biến nguyên phụ trợ dùng để loại bỏ chu trình con trong bài toán tuyến đường.

x_{ij}: Biến nhị phân quyết định mặt hàng i có được gán vào vị trí trống j.

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

y_{jo}: Biến nhị phân quyết định được ghé thăm trong đơn hàng o.

$z_{ij'o}$: Biến nhị phân quyết định nhân viên có di chuyển trực tiếp từ vị trí j sang j' trong nghiệp vụ o.

u_{jo}: Biến số nguyên quyết định số lượng mặt hàng thực tế được lấy từ vị trí j cho đơn hàng o.

Hàm mục tiêu: Tối thiểu tổng quãng đường di chuyển: $min = w_s \sum_{i\in R}\sum_{j\in E} d_{0j}x_{ij} + (1-w_s)\sum_{o\in O}\sum_{j\in N^*}\sum_{j'\in N^*} d_{jj'}z_{jj'o}$ (1)

Điều kiện ràng buộc:

Mỗi vị trí lưu trữ trống chỉ có thể chứa tối đa một đơn vị phân loại SKU và lượng tồn kho sẵn có một SKU sau khi bổ sung phải không được nhỏ hơn số lượng SKU được yêu cầu tương ứng:

$$s.t. \sum_{i\in R} x_{ij} \le 1 \quad \forall j \in E \quad (2)$$

$$\sum_{j\in E}\mu_i x_{ij} + s_i \ge \sum_{o\in O} e_{oi}, \forall i \in R \quad (3)$$

Nếu $u_{ji} > 0$ thì y_{jo} phải được thiết lập bằng 1, cho biết vị trí lưu trữ j phải được ghé thăm:

$$\sum_{j\in T_i} u_{jo} + \sum_{j\in E} u_{jo}x_{ij} = e_{oi}, \forall\, i \in H_o, o \in O \quad (4)$$

Tất cả các SKU theo yêu cầu của đơn hàng o đều được đáp ứng: $u_{jo} \le My_{io}, \ \forall j \in N, o \in O$ (5)

Đảm bảo đủ số lượng hàng tồn kho trong quá trình lấy hàng: $\sum_{o\in O} u_{jo} \le q_j, \forall j \in T$ (6)

$$\sum_{0\in 0} u_{jo} \le \mu_l + M(1-x_{ij}), \forall i \in R, j \in E \quad (7)$$

Đảm bảo khi vị trí j được ghé thăm, một lộ trình phải được chọn sao cho có đường đi vào và đi ra khỏi vị trí này:

$$y_{jo} = \sum_{j'\in N} z_{jj'o}, \forall\, j \in N, o \in O \quad (8)$$

$$y_{jo} = \sum_{j'\in N} z_{j'jo}, \forall\, j \in N, o \in O \quad (9)$$

Mỗi tác vụ đều bắt đầu và kết thúc tại kho tổng (depot): $\sum_{j\in N} z_{j0o} = 1, \forall\, o \in O$ (10)

$$\sum_{j\in N} z_{0jo} = 1, \forall\, o \in O \quad (11)$$

Loại bỏ chu trình con (subtour elimination):

$$v_{jo} - v_{j'o} + (|N|+1)z_{jj'o} \le |N|, \ \forall\, o \in O, j, j' \in N, j \ne j' \quad (12)$$

$$v_{jo} \in N \ \forall\, j \in N, o \in O \quad (13)$$

Miền giá trị: $u_{jo} \in N \ \forall\, j \in N, o \in O$ (14)

$$x_{ij} \in \{0,1\} \ \forall i \in R, j \in E \quad (15)$$

$$y_{jo} \in \{0,1\} \ \forall\, j \in N, o \in O \quad (16)$$

$$z_{jj'o} \in \{0,1\} \ \forall\, j, j' \in N^*, o \in O \quad (17)$$

Mô hình toán học được trình bày ở trên là mô hình phi tuyến tính do có số hạng bậc hai $x_{ij}u_{jo}$ trong Ràng buộc (5). Để có thể giải được bằng các bộ giải tối ưu, nhóm nghiên cứu thay thế $x_{ij}u_{jo}$ bằng một biến nguyên mới là Φ_{ijo}, cùng với các ràng buộc bổ sung (18) và (19):

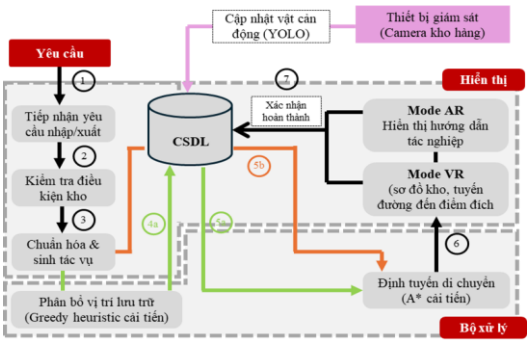
$$-M(1-x_{ij}) \le \Phi_{ijo} - u_{jo} \le M(1-x_{ij})$$

$$\forall i \in R, j \in N, o \in O \quad (18)$$

$$-Mx_{ij} \le \Phi_{ijo} \le Mx_{ij} \ \forall i \in R, j \in N, o \in O \quad (19)$$

4.3. Phương pháp giải

Phương pháp được đề xuất là một giải pháp tích hợp giữa mô hình hóa môi trường kho và các thuật toán thích hợp. Để triển khai trong thực tế, nghiên cứu phát triển hệ thống quản lý kho O-WMS nhằm thực thi các thuật toán tối ưu và hỗ trợ trực quan điều phối hoạt động tác nghiệp.



Hình 1. Quy trình xử lý dữ liệu

Hệ thống được xây dựng trên cơ sở dữ liệu trung tâm nhằm quản lý thông tin SKU, vị trí lưu trữ, trạng thái tồn kho, dữ liệu nhập/xuất và sơ đồ kho. Không gian kho được mô hình hóa trong hệ tọa độ ba chiều *Oxyz*, trong đó mặt bằng kho được biểu diễn trên trục *x* - *z*, còn trục y biểu diễn chiều cao lưu trữ. Cấu trúc lưu trữ của kho được tổ chức theo các cấp zone - rack - shelf - pallet, mỗi vị trí lưu trữ được gán các thuộc tính như kích thước, khả năng chịu tải và trạng thái sử dụng. Để phục vụ bài toán định tuyến, mô hình kho được rời rạc hóa thành lưới ô vuông với kích thước s, trong đó số ô lưới hai chiều được xác định $N_x = \lceil L/s \rceil, N_z = \lceil W/s \rceil$. Mỗi ô lưới được gán trạng thái trống (0) hoặc bị chiếm (1).

Ngoài các vật cản tĩnh như tường, cột và khu lưu trữ, hệ thống được thiết kế để hỗ trợ cập nhật các vật cản phát sinh thông qua mô-đun giám sát hình ảnh. Các khung hình từ camera có thể được xử lý bằng mô hình phát hiện đối tượng (YOLO) để nhận diện các thực thể như pallet, xe nâng hoặc người lao động và ánh xạ lên bản đồ lưới trong kho. Trong phạm vi nghiên cứu hiện tại, cơ chế này mới dừng ở mức đề xuất kiến trúc do việc triển khai đòi hỏi quá trình thu thập dữ liệu hình ảnh, huấn luyện mô hình AI và hiệu chuẩn hệ thống camera nhằm đảm bảo độ chính xác của phép ánh xạ tọa độ. Nội dung này sẽ được triển khai trong các nghiên cứu tiếp theo.

Bước 1-3. *Quy trình bắt đầu khi hệ thống O-WMS nhận yêu cầu nhập/ xuất kho*. Sau khi kiểm tra điều kiện kho và được phê duyệt, hệ thống tạo các tác vụ

cất/ lấy hàng tại các vị trí lưu trữ tương ứng.

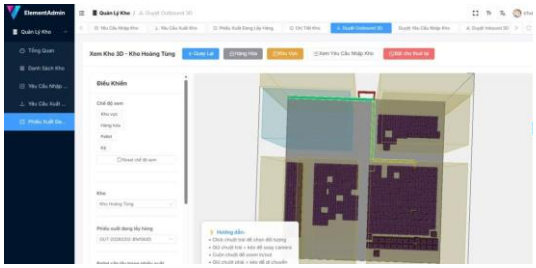
Bước 4. *Phân bổ vị trí lưu trữ.* Thuật toán GRASP là một metaheuristic xây dựng nghiệm kết hợp chiến lược tham lam và yếu tố ngẫu nhiên nhằm giảm sự phụ thuộc vào các quyết định "thiển cận" trong quá trình xây dựng nghiệm ban đầu [16]. Tại mỗi bước, chi phí gán pallet i vào vị trí lưu trữ j được xác định theo $C_{ij} = f_i.d_{ij}$ trong đó f_i là tần suất thao tác pallet/SKU I và d_{ij} là khoảng cách từ vị trí lưu trữ j đến khu vực nhập/ xuất kho. Thay vì chọn vị trí có chi phí nhỏ nhất, thuật toán xây dựng một danh sách ứng viên hạn chế (RCL) gồm các phương án có chi phí gần tối ưu thỏa mãn: $C_{ij} \leq C_{min} + \alpha(C_{max} - C_{min})$, trong đó $\alpha \in [0,1]$ là tham số điều chỉnh mức độ tham lam của thuật toán. Một phần tử trong RCL sau đó được lựa chọn ngẫu nhiên để gán pallet, điều này cho phép thuật toán xem xét nhiều cấu hình phân bổ khác nhau thay vì chỉ phụ thuộc vào lựa chọn tốt nhất tại từng bước [16]. Quá trình xây dựng nghiệm được lặp lại nhiều lần với các lựa chọn ngẫu nhiên khác nhau, nghiệm tốt nhất được giữ lại làm phương án cuối cùng.

Bước 5. *Định tuyến di chuyển.*Sau khi xác định đích đến, hệ thống tiến hành hoạch định lộ trình di chuyển trên bản đồ lưới của kho. Nghiên cứu sử dụng thuật toán Theta*, một biến thể của A*, cho phép kết nối trực tiếp hai nút nếu tồn tại điều kiện Line-of-Sight (LOS), từ đó giảm hiện tượng đường đi gấp khúc thường gặp trong các thuật toán tìm đường trên lưới [17].

Trong quá trình tìm kiếm, mỗi núi n được đánh giá thông qua hàm chi phí $f(n) = g(n) + h(n)$, trong đó $g(n)$ là chi phí thực từ điểm xuất phát và $h(n)$ là chi phí ước lượng từ n đến điểm đích, được xác định bằng khoảng cách Euclid [17]. Nếu tồn tại điều kiện LOS "nhìn thẳng" giữa hai điểm đang xét, chi phí được cập nhật trực tiếp từ nút cha bậc hai, ngược lại thuật toán quay về cơ chế cập nhật A*. Ngoài ra mô hình bổ sung hệ số phạt P(n) nhằm hạn chế các khu vực có điều kiện di chuyển bất lợi, giúp lộ trình thu được phù hợp hơn với điều kiện vận hành thực tế.

Bước 6. *Hỗ trợ trực quan tác nghiệp.* Sau khi thực hiện phân bổ vị trí và định tuyến di chuyển, hệ thống cung cấp lớp giao diện hỗ trợ trực quan nhằm hỗ trợ người vận hành nhận diện vị trí hàng hóa và lộ trình di chuyển. Lớp hỗ trợ này được triển khai thông qua hai chế độ hiển thị AR và VR.

Ở chế độ VR, môi trường kho được mô hình hóa không gian 3D, trong đó các vị trí lưu trữ, pallet và tuyến di chuyển được hiển thị trực quan trên bản đồ kho số hóa, cho phép người dùng quan sát tổng thể cấu trúc và phương án tác nghiệp kho.



Hình 2. Hiển thị phân bổ vị trí và định tuyến tuyến đường bằng chế độ VR

Ở chế độ AR, lộ trình và vị trí thao tác được hiển thị trực tiếp trên hình ảnh môi trường thực thông qua camera thiết bị di động. Vị trí thiết bị được xác định bằng cơ chế nhận diện visual marker đặt tại các vị trí cố định trong kho; khi camera quét marker, hệ thống ước lượng pose của thiết bị và ánh xạ vị trí này sang nút tương ứng trên bản đồ kho để xác định điểm xuất phát cho thuật toán định tuyến. Lộ trình di chuyển sau đó được hiển thị dưới dạng các chỉ dẫn trực quan trên lối đi và đánh dấu vị trí pallet cần thao tác. Hiện tại hệ thống được triển khai dưới dạng nền tảng web phục vụ mô phỏng thử nghiệm thuật toán. Tuy nhiên, kiến trúc hệ thống được thiết kế theo hướng có thể mở rộng sang ứng dụng di động để tích hợp trực tiếp camera và triển AR trong môi trường kho thực tế.

Bước 7. *Cập nhật cơ sở dữ liệu.*Sau khi người vận hành hoàn thành và xác nhận nhiệm vụ, các thông tin phát sinh trong quá trình tác nghiệp như trạng thái thực hiện, vị trí thao tác và thay đổi tồn kho của từng SKU được cập nhật vào cơ sở dữ liệu trung tâm. Dữ liệu này trở thành đầu vào cho các vòng xử lý tiếp theo của hệ thống, qua đó duy trì sự đồng bộ giữa mô hình kho số hóa và trạng thái vận hành thực tế.

5. Ứng dụng thử nghiệm tại kho Hoàng Tùng Hải Phòng

Mục tiêu nghiên cứu là xây dựng hệ thống phần mềm hỗ trợ phân bổ vị trí lưu trữ và định tuyến tác nghiệp trong kho thủ công với hàm mục tiêu tối thiểu hóa tổng quãng đường di chuyển. Kho Hoàng Tùng (Hải Phòng) được lựa chọn làm môi trường thử nghiệm do mang đặc trưng điển hình của nhóm kho vừa và nhỏ. Kho có diện tích khoảng 600m², hàng hóa chủ yếu là hàng bao lưu trữ trên pallet đặt nền. Do không gian hạn chế, các pallet được bố trí sát nhau, thậm chí lấn vào lối đi nhằm tối đa hóa sức chứa, khiến lối đi giữa các cụm hàng hẹp hẹp và luồng tác nghiệp tập trung qua một cửa. Hoạt động vận hành phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm, dữ liệu chủ yếu được ghi nhận thủ công/ Excel; đồng thời các nghiệp

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

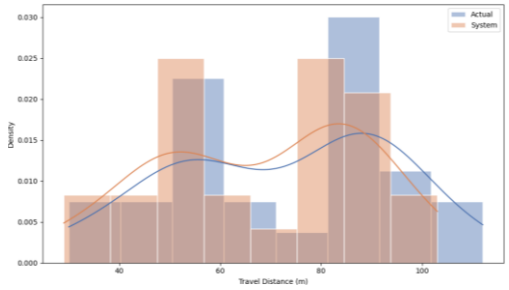
vụ nhập - xuất diễn ra xen kẽ khiến trạng thái lưu trữ thay đổi liên tục, làm gia tăng yêu cầu tổ chức vị trí hàng hóa và lộ trình di chuyển trong kho.

Dữ liệu được thu thập từ các nghiệp vụ nhập/ xuất kho diễn ra trong một giai đoạn vận hành thực tế của kho Hoàng Tùng. Để bảo đảm tính đồng nhất của mẫu quan sát và hạn chế ảnh hưởng của các nghiệp vụ có quy mô lớn, nghiên cứu tiến hành lọc dữ liệu và chỉ giữ lại các nghiệp vụ có khối lượng xử lý 1-5 MT, tương ứng với các tác vụ phổ biến trong hoạt động vận hành hằng ngày. Sau sàng lọc, 26 nghiệp vụ được lựa chọn làm bộ dữ liệu thử nghiệm. Các nghiệp vụ được giữ nguyên thông tin và vị trí thao tác theo điều kiện vận hành thực tế, sau đó được mô phỏng trên môi trường kho số hóa VR. Trên cùng tập nghiệp vụ và sơ đồ kho, hệ thống thực hiện phân bổ vị trí lưu trữ và xác định lộ trình di chuyển cho từng nghiệp vụ. Kết quả được so sánh với phương thức vận hành hiện tại nhằm đánh giá mức độ cải thiện về quãng đường di chuyển.

Phân tích thống kê mô tả được sử dụng để đánh giá xu hướng và mức độ biến động của quãng đường di chuyển giữa hai phương án vận hành [5], [8]. Kết quả xử lý bằng SPSS cho thấy theo phương thức hiện tại, quãng đường dao động 30m - 112m với giá trị trung bình 73,69m/nghiệp vụ, trong khi phương án phần mềm nằm trong khoảng 29m - 103m với giá trị trung bình 66,73m. Như vậy hệ thống giúp giảm trung bình 6,96m/nghiệp vụ (≈ 9,45%). Độ lệch chuẩn giảm nhẹ từ 23,586m xuống 22,184m cho thấy các tuyến di chuyển được tổ chức ổn định hơn. Tuy nhiên, hệ số biến thiên của hai trường hợp lần lượt đạt 32,01% và 33,24% cho thấy mức độ biến động tương đối giữa các nghiệp vụ vẫn tương đương, sự cải thiện chủ yếu đến từ việc rút ngắn quãng đường trung bình.

Để đảm bảo tính hợp lệ của các kiểm định tham số, nghiên cứu kiểm tra giả định phân phối chuẩn của dữ liệu bằng kiểm định Shapiro-Wilk [8]. Kết quả cho thấy dữ liệu không vi phạm giả định chuẩn, với *p-value* lần lượt đạt 0,145 (hiện tại) và 0,055 (phần mềm), đều lớn hơn 0,05. Do đó, kiểm định paired t-test được áp dụng để so sánh quãng đường di chuyển giữa hai phương án trên cùng một tập quan sát [5], [8]. Kết quả cho thấy sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95% với *p-value=0,008*, cho thấy phương án phần mềm giúp rút ngắn quãng đường di chuyển so với phương thức hiện tại.

Thêm vào đó, histogram cho thấy quãng đường di chuyển theo phương thức hiện tại có phạm vi phân bố rộng hơn, với nhiều nghiệp vụ tập trung ở vùng quãng đường lớn (trên 90m). Trong khi đó, phương án phần mềm có phân bố tập trung hơn quanh giá trị trung bình và số trường hợp có quãng đường rất dài giảm đi. Đường mật độ KDE cũng cho thấy phân bố của phương án phần mềm dịch nhẹ về phía các giá trị thấp hơn, cho thấy hệ thống đề xuất giúp rút ngắn quãng đường di chuyển giữa các nghiệp vụ.



Hình 3. Histogram & Kernel Density Plot Estimation

Nhìn chung, kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống phần mềm đề xuất giúp giảm khoảng 9,45% quãng đường di chuyển so với phương thức vận hành hiện tại. Mặc dù mức cải thiện chưa lớn, kết quả cho thấy việc phân bổ vị trí lưu trữ hợp lý kết hợp với hỗ trợ định tuyến có thể góp phần rút ngắn khoảng cách giữa khu nhập/ xuất và các vị trí thao tác, đồng thời hạn chế các đoạn di chuyển vòng trong quá trình tác nghiệp. Trong điều kiện kho thử nghiệm có quy mô nhỏ và mật độ lưu trữ cao, hệ thống chủ yếu hỗ trợ tối ưu bố trí vị trí lưu trữ nhằm cải tiện tuyến di chuyển, qua đó cho thấy tiềm năng nâng cao hiệu quả vận hành trong các kho thủ công quy mô nhỏ.

6. Kết luận

Nghiên cứu đề xuất một mô hình tích hợp nhằm tối ưu hóa phân bổ vị trí lưu trữ và định tuyến di chuyển trong kho thủ công thông qua việc kết hợp các thuật toán tối ưu với lớp hỗ trợ trực quan AR/VR. Sản phẩm nghiên cứu được thử nghiệm tại một kho thực tế tại Hải Phòng - đại diện cho nhóm kho quy mô nhỏ với mức độ tự động hóa thấp. Kết quả bước đầu cho thấy phương pháp đề xuất giúp rút ngắn quãng đường di chuyển trong quá trình tác nghiệp, qua đó góp phần cải thiện hiệu quả vận hành so với phương thức hiện tại.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế. Trước hết, thử nghiệm hiện mới được thực hiện trong một kho có quy mô nhỏ, do đó kết quả chủ yếu phản ánh điều kiện vận hành của một trường hợp nghiên cứu cụ thể. Trong giai đoạn này, VR chủ yếu được sử dụng để mô phỏng và trực quan hóa môi trường kho số hóa nhằm kiểm tra các lộ trình di chuyển do hệ thống đề xuất, trong khi AR và mô-đun phát hiện vật cản dựa trên thị giác máy tính chưa được triển khai trong điều kiện vận hành thực tế. Vì vậy, nghiên cứu

hiện chưa có cơ sở dữ liệu để đánh giá định lượng ảnh hưởng của các công nghệ này đối với hiệu quả tác nghiệp. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc mở rộng thử nghiệm trên nhiều cấu hình kho khác nhau và hoàn thiện các mô-đun AI, AR và VR sẽ giúp đánh giá toàn diện hơn tiềm năng ứng dụng của mô hình đề xuất.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **SV25-26.63**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] World Bank (2018), *Connecting to Compete 2018: Trade Logistics in the Global Economy*.

[2] Bộ Công Thương (2022), *Báo cáo Logistics Việt Nam 2022*, NXB Công Thương.

[3] Savills Vietnam (2023), *Vietnam Logistics & Industrial Report*.

[4] J. A. Tompkins et al. (2010), *Facilities Planning*, Vol.4th ed., Wiley.

[5] De Koster, René, et al. (2007), *Design and control of warehouse order picking: A literature review,* European Journal of Operational Research.

[6] Jinxiang Gu et al (2007), *Research on warehouse operation: A comprehensive review*, European Journal of Operational Research, Vol. 177(1).

[7] K. J. Roodbergen and R. de Koster (2001), *Routing methods for warehouses with multiple cross aisles,* International Journal of Production Research.

[8] Jinxiang Gu et al (2010), *Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review*, European Journal of Operational Research, Vol. 203(3), pp.539-549.

[9] C. G. Petersen and G. Aase (2004), *A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking*, International Journal of Production Economics, Vol.92, pp.11-19.

[10] K. J. Roodbergen and I. F. A. Vis (2009), *A survey of literature on automated storage and retrieval systems*, European Journal of Operational Research, Vol.194, No.2, pp.343-362.

[11] J. A. Bashatah and G. R. Elnaggar (2025), *Enhancing Warehouse Picking Efficiency Through Integrated Allocation and Routing Policies: A Case Study Towards Sustainable and Smart Warehousing*, Applied Sciences, Vol.15, No.20.

[12] Muhojoki, R. (2024), *Improving warehouse slotting using clustering and genetic algorithm*, Master's thesis, Chalmers University of Technology.

[13] M. Mrad et al. (2023), *A Genetic Algorithm for the Integrated Warehouse Location, Allocation and Vehicle Routing Problem in a Pooled Transportation System*, International Journal of Industrial Engineering, Vol.30, No.3, pp.852-875.

[14] H. Glockner, M. Jannek, J. Mahn, and B. Theis (2018), *Augmented reality in logistics: A study of picking processes,* Procedia CIRP.

[15] R. Palmarini, J. A. Erkoyuncu, R. Roy, and H. Tora (2018), *A systematic review of augmented reality applications in maintenance*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.

[16] Thomas A Feo and Mauricio G.C Resende (1995), *A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem,* Operations Research Letters.

[17] Nash, A., Daniel, K., Koenig, S., & Felner, A. (2007), *Theta*: Any-Angle Path Planning on Grids,* Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, pp.1177-1183.

[18] G. Ratliff and A. Rosenthal (1983), *Order-picking in a rectangular warehouse: A solvable case of the traveling salesman problem*, Operations Research, Vol.31, No.3, pp.507-521.

[19] N. Boysen, M. Briskorn, and S. Emde (2017), *Sequencing of picking orders in mobile rack warehouses,* European Journal of Operational Research, Vol.259, No.1, pp.293-307.

[20] D. Mourtzis, V. Zogopoulos, and E. Vlachou (2018), *Augmented reality application to support the assembly of highly customized products*, Procedia CIRP, Vol.70, pp.168-173.

[21] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael (1968), *A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths*, IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Vol.4, pp.100-107.

Ngày nhận bài:	24/02/2026
Ngày nhận bản sửa:	20/03/2026
Ngày duyệt đăng:	25/03/2026