



Mô hình và thuật toán tối ưu quản lý vận hành container trong tổ hợp cảng Models and Optimization Algorithms for Container Management in Port Complex

Đặng Thị Bích Hoài*

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

Từ khóa:

TÓM TẮT

Tối ưu hóa
Quản lý container
Tổ hợp cảng
Lập trình số nguyên Mô
phỏng sự kiện rời rạc
Phương pháp Monte
Carlo

Bài báo trình bày các mô hình toán học và thuật toán tối ưu nhằm nâng cao hiệu quả quản lý và khai thác container trong các tổ hợp cảng. Tác giả sử dụng phương pháp nghiên cứu chủ yếu bao gồm việc tối ưu hóa mặt bằng cảng qua bài toán Ek, ứng dụng mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) trong điều phối tài nguyên và hoạt động xếp dỡ, đồng thời áp dụng phương pháp Monte Carlo để tối ưu hóa số lượng container bảo đảm dự phòng cho sửa chữa. Kết quả mô hình hóa và mô phỏng cho thấy ứng dụng các thuật toán này giúp cải thiện hiệu quả sử dụng diện tích và tiết kiệm chi phí vận hành, đồng thời cân đối hợp lý tồn kho container dự phòng, góp phần giảm thời gian container nằm ngoài khai thác. Nghiên cứu cung cấp nền tảng khoa học và giải pháp thực tiễn cho quản lý container hiện đại trong môi trường cảng biển phức tạp.

Keywords:

ABSTRACT

Optimization
Container Management
Port Complex
Integer Programming
Discrete Event Simulation
Monte Carlo Method

This paper presents mathematical models and optimization algorithms aimed at improving the management and operation of containers in port complexes. The research methods mainly include spatial optimization via Ek problems, discrete event simulation (DES) for resource coordination and handling activities, and Monte Carlo methods to optimize the inventory of repair container reserves. The modeling and simulation results demonstrate that these algorithms can improve space utilization efficiency, reduce operating costs, and balance container reserve inventory to minimize downtime. This study provides scientific foundations and practical solutions for modern container management in complex seaport environments.

* Đặng Thị Bích Hoài. *Trường đại học Giao thông vận tải TP. Hồ Chí Minh*

Email: hoai.dang@ut.edu.vn

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150211>

Ngày nhận bài: 10/12/2025; Ngày nhận bài sửa: 03/03/2026; Ngày chấp nhận đăng: 15/03/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/03/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Trong bối cảnh phát triển kinh tế toàn cầu và sự gia tăng mạnh mẽ của hoạt động thương mại quốc tế, vận tải hàng hóa bằng container đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu quả logistics và chuỗi cung ứng. Tổ hợp cảng (Port Complex - PC) như một trung tâm giao thương cấp vùng hay quốc tế, đảm nhận chức năng vận chuyển, phân phối hàng hóa đa phương thức một cách hiệu quả, góp phần giảm chi phí và thời gian lưu thông hàng hóa. Tuy nhiên, sự phức tạp và đa dạng của các hoạt động trong tổ hợp cảng, đặc biệt là việc quản lý và khai thác container, đòi hỏi phải có các mô hình và thuật toán tối ưu tương ứng để nâng cao hiệu quả vận hành, tiết kiệm tài nguyên và đáp ứng nhu cầu thực tế ngày càng tăng.

Nghiên cứu này nhằm xây dựng và phát triển các mô hình toán học và thuật toán tối ưu nhằm nâng cao hiệu quả bố trí mặt bằng, quản lý tài nguyên và tối ưu hóa tồn kho container bảo đảm dự phòng cho công tác sửa chữa. Bài báo trình bày hệ thống hóa các phương pháp từ tối ưu hóa rời rạc mặt bằng tổ hợp cảng, mô phỏng sự kiện rời rạc cho điều phối tài nguyên đến mô hình hóa thống kê và tối ưu Monte Carlo cho quản lý tồn kho. Đặc biệt, tác giả tập trung trình bày hệ thống mô hình toán học và các thuật toán tối ưu liên quan đến quản lý và khai thác container trong tổ hợp cảng. Các mô hình được xây dựng dựa trên các bài toán thiết kế hình học, tối ưu hóa bố trí mặt bằng và phân bổ tài nguyên, kết hợp với các phương pháp mô phỏng sự kiện rời rạc (Discrete Event Simulation - DES) và thuật toán mô phỏng Monte Carlo nhằm giải quyết các bài toán tối ưu hóa rời rạc và tối ưu hóa ngẫu nhiên. Qua đó, cung cấp cơ sở khoa học và công cụ hỗ trợ hiệu quả cho việc xây dựng hệ thống quản lý tự động tại các tổ hợp cảng hiện đại, đặc biệt là trong điều kiện phức tạp và biến động của thị trường vận tải container hiện nay [1], [2].

Trong bài báo này, 'bài toán Ek' được hiểu là lớp bài toán tối ưu bố trí mặt bằng dạng rời rạc (Euclidean layout optimization), trong đó các thành phần của tổ hợp cảng được mô hình hóa trong không gian Euclid và các biến quyết định mô tả vị trí, kích thước, và quan hệ không gian giữa chúng. Ký hiệu 'Ek' được kế thừa và mở rộng từ các bài toán thiết kế hình học và bố trí mặt

bằng trong tài liệu [3], [4], [5] với E biểu diễn không gian Euclid và k biểu diễn số chiều hoặc số nhóm thành phần được xét trong bố trí.

Trong nghiên cứu này, tác giả cấu trúc bài báo gồm: phần tổng quan nghiên cứu, mục tiêu nghiên cứu, phương pháp nghiên cứu, kết quả thực nghiệm, bàn luận, và kết luận với định hướng ứng dụng vào vận hành thực tiễn tổ hợp cảng Việt Nam.

2. Tổng quan nghiên cứu

2.1 Nghiên cứu trong nước

Các nghiên cứu về quản lý và tối ưu hóa vận hành container trong tổ hợp cảng ở Việt Nam chủ yếu tập trung vào giải quyết các bài toán thực tiễn như tổ chức mặt bằng bãi container, nâng cao hiệu quả sử dụng thiết bị xếp dỡ, tối ưu hóa luồng vận chuyển và dự báo nhu cầu vận chuyển container. Những công trình đáng chú ý gồm:

- Tài liệu "Quản lý và khai thác cảng container" của TanCang-STC (2020) đã hệ thống hóa các quy trình quản lý container, phân loại khu chức năng và đề xuất giải pháp quản lý vận hành hiệu quả bãi container trong điều kiện cảng biển Việt Nam;
- Nghiên cứu của TS. Nguyễn Thị Thu Hương (2023) về mô hình đánh giá hiệu quả hệ thống logistics tích hợp mạng trung tâm góp phần đề xuất các chỉ báo phân tích và cơ sở dữ liệu thực tiễn để tối ưu các luồng hàng hóa trong logistics và cảng;
- Nguyễn Văn Mậu (2017) với chuyên khảo về tổ hợp và toán rời rạc đã trình bày các giải pháp lập trình toán học áp dụng cho quy hoạch và tổ chức layout mặt bằng kho bãi container, tuy nhiên khai thác chưa sâu về mô phỏng sự kiện rời rạc và quản lý dự phòng container.

Bên cạnh đó, thực tiễn triển khai các phương pháp heuristic và quy tắc tối ưu như FIFO, DDATE, SLACK, LWKR tại các bãi container lớn (VietNam, Tan Cang...) đã góp phần nâng cao năng suất vận hành và tối ưu hóa chi phí ở cấp độ nghiệp vụ, tuy chưa tích hợp các mô hình ngẫu nhiên và mô phỏng rời rạc ở cấp hệ thống.

2.2 Nghiên cứu quốc tế

Trong những năm gần đây (2020–2024), các nghiên cứu ứng dụng trí tuệ nhân tạo và học máy cho tối ưu hóa vận hành cảng container phát triển mạnh. “Optimizing container terminal operations: a systematic review of methods and applications (2024)” đã chỉ ra xu hướng sử dụng mạng nơ-ron, học tăng cường sâu và các thuật toán tiến hóa đa mục tiêu để tối ưu hóa đồng thời bố trí bãi, lập lịch cầu bến và thiết bị xếp dỡ. Bên cạnh đó, các nghiên cứu về bài toán lập lịch cầu bãi, cầu cầu trong điều kiện bất định đã xây dựng các mô hình quy hoạch ngẫu nhiên kết hợp giải thuật di truyền và metaheuristic để nâng cao hiệu quả quay vòng thiết bị, giảm thời gian chờ và độ trễ vận hành. Các mô hình học tăng cường sâu gần đây còn được tích hợp vào bài toán lập lịch thời gian thực cho cầu bến và cầu cầu, cho phép hệ thống tự điều chỉnh theo trạng thái vận hành và lưu lượng tàu – container biến động. Các hướng tiếp cận AI/ML này là nền tảng tham khảo cho việc xây dựng hệ thống mô hình tích hợp DES – Monte Carlo – tối ưu rời rạc trong nghiên cứu hiện tại.

Trên thế giới, lĩnh vực tối ưu hóa quản lý container tại tổ hợp cảng đã phát triển bài bản về cả lý thuyết và ứng dụng, đặc biệt là mô hình hóa toán học, các thuật toán tối ưu tiên tiến, mô phỏng sự kiện rời rạc (DES), mô hình ngẫu nhiên và ứng dụng trí tuệ nhân tạo:

- Sharma, JK (1997) giới thiệu toàn diện về phương pháp toán tối ưu và các thuật toán vận dụng trong bài toán xếp dỡ, tổ chức vận tải container thông qua lập trình số nguyên, quy hoạch động và thuật toán heuristic;

- Ruipeng Yang et al. (2023) đề xuất giải pháp location-allocation tối ưu cho logistics khẩn cấp vận dụng chiến lược chuyển vị ngang, đồng thời giải các bài toán tối ưu đa mục tiêu;

- Sudhanshu K Mishra (2006) phát triển tối ưu hóa toàn cục bằng phương pháp Particle Swarm, đưa ra chương trình Fortran mô phỏng tối ưu hóa bố trí, vận hành container trong điều kiện biến động lớn;

- Samik Raychaudhuri (2008) và James E. Gentle (2003) hệ thống hóa ứng dụng mô phỏng Monte Carlo trong đánh giá hiệu quả, quản lý tồn kho container sửa

chữa và tối ưu hóa mức dự phòng ngẫu nhiên trong logistics container;

- Gaurav Sharma (2013) đã triển khai và phân tích chi tiết mô phỏng quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES cho các hệ thống logistics và quản lý cảng container quy mô lớn, chỉ ra các giải pháp tối ưu hóa cấu trúc luồng vận tải và bố trí mặt bằng.

Các nghiên cứu quốc tế nhìn chung đã tích hợp sâu công cụ toán học, mô phỏng sự kiện rời rạc, tối ưu đa mục tiêu và AI để giải quyết các bài toán phức tạp về vận hành container trong môi trường cảng biển hiện đại. Tuy vậy, phần lớn các nghiên cứu này tập trung giải quyết từng lớp bài toán riêng lẻ như bố trí bãi, lập lịch thiết bị hoặc quản lý tồn kho, hiếm khi xây dựng một khung mô hình tích hợp đầy đủ từ tối ưu bố trí mặt bằng, mô phỏng vận hành đến tối ưu tồn kho sửa chữa. Đặc biệt, số lượng công trình xem xét đồng thời tương tác giữa thiết kế mặt bằng (layout), điều phối tài nguyên động và tồn kho container dự phòng vẫn còn hạn chế, nhất là trong bối cảnh các tổ hợp cảng đang phát triển ở các nước mới nổi.

2.3 Khoảng trống nghiên cứu

Mặc dù các nghiên cứu trên cho thấy AI và học máy đã được áp dụng sâu rộng trong tối ưu hóa vận hành cảng container, vẫn còn thiếu các mô hình tích hợp đồng thời tối ưu bố trí mặt bằng, điều phối tài nguyên theo mô phỏng sự kiện rời rạc và tối ưu tồn kho container dự phòng trên cùng một khung mô hình thống nhất phù hợp điều kiện tổ hợp cảng Việt Nam.

Các nghiên cứu trước đây đã ứng dụng nhiều phương pháp tối ưu hóa trong quản lý container, bao gồm lập trình số nguyên để xếp dỡ và bố trí diện tích, thuật toán Heuristic và quy tắc sắp xếp nhằm cải thiện luồng hoạt động. Các mô hình mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) được sử dụng rộng rãi trong dự báo và điều phối vận hành giúp theo dõi trạng thái động của tài nguyên.

Tổng hợp các công trình hiện hữu cho thấy một số khoảng trống nghiên cứu nổi bật:

- Ở Việt Nam, đa số mô hình tập trung vào cải tiến quy trình nghiệp vụ hoặc tối ưu hóa diện tích bãi container bằng kinh nghiệm, chưa có hệ thống mô hình

tích hợp cả toán học tối ưu, mô phỏng sự kiện rời rạc và tối ưu ngẫu nhiên dành cho quản lý tổng thể tổ hợp cảng;

- Việc tối ưu hóa số lượng container dự phòng sửa chữa ở cấp toán học chỉ tập trung vào các mô hình tuyến tính hoặc thống kê đơn giản, thiếu các mô hình mô phỏng xác suất lũy thừa và Monte Carlo như các nghiên cứu quốc tế;

- Phần lớn đề xuất giải pháp ở cả trong nước và quốc tế còn rời rạc theo từng góc độ: thiết kế mặt bằng, sắp xếp container, dự phòng sửa chữa... chưa có một khung hợp nhất, đa cấp mô phỏng tối ưu hóa tổng thể cho tổ hợp cảng trong điều kiện biến động phức tạp;

- Ứng dụng trí tuệ nhân tạo, thuật toán đa mục tiêu và mô phỏng đa cấp vẫn là hướng phát triển tiềm năng cho cả lĩnh vực, đặc biệt áp dụng tại các tổ hợp cảng lớn như ở Việt Nam.

Tuy nhiên, khoảng trống tồn tại ở việc kết hợp đồng thời mô hình toán học tối ưu với mô phỏng thực tiễn cũng như khai thác tối ưu hóa tồn kho bảo đảm dự phòng để cân bằng chi phí vận hành và thời gian container nằm ngoài khai thác. Do đó, nghiên cứu này tập trung phát triển, tích hợp đồng thời các mô hình và thuật toán tối ưu hóa toán học, mô phỏng sự kiện rời rạc, và Monte Carlo nhằm nâng cao hiệu quả quản lý container trong tổ hợp cảng, góp phần khép kín khoảng trống phát triển ứng dụng đa chiều mang tính hệ thống cả về lý thuyết lẫn thực tiễn. Tác giả không chỉ tổng hợp các mô hình tối ưu mà còn sử dụng mô phỏng Monte Carlo để giải quyết bài toán ngẫu nhiên trong quản lý tồn kho container sửa chữa, góp phần hoàn thiện giải pháp toàn diện cho tổ hợp cảng.

Điểm mới chính của nghiên cứu này thể hiện ở việc xây dựng và đề xuất một khung mô hình tích hợp ba lớp cho quản lý container trong tổ hợp cảng, bao gồm:

(i) mô hình tối ưu hóa rời rạc bố trí mặt bằng dựa trên bài toán Ek;

(ii) mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) cho điều phối tài nguyên và luồng container trên cấu hình mặt bằng đã tối ưu; và

(iii) mô hình Monte Carlo cho tối ưu hóa tồn kho container bảo đảm dự phòng cho sửa chữa.

Khác với các công trình trước đây thường nghiên cứu riêng lẻ từng bài toán (thiết kế mặt bằng, điều phối vận hành hoặc dự phòng sửa chữa), nghiên cứu này đề xuất một chuỗi mô hình liên kết, trong đó đầu ra của mô hình trước trở thành đầu vào của mô hình sau, tạo thành một hệ thống hỗ trợ quyết định tổng thể cho tổ hợp cảng.

Điểm khác biệt chính của nghiên cứu này là đề xuất một khung mô hình tích hợp ba lớp Ek – DES – Monte Carlo dành riêng cho tổ hợp cảng container trong bối cảnh Việt Nam, cho phép đánh giá đồng thời tác động của bố trí mặt bằng, điều phối tài nguyên và chính sách tồn kho container dự phòng trong cùng một kiến trúc mô hình thống nhất.

Về ý nghĩa khoa học, nghiên cứu góp phần hoàn thiện cơ sở lý thuyết về tích hợp mô hình toán học tối ưu với mô phỏng sự kiện rời rạc và mô phỏng ngẫu nhiên trong bối cảnh quản lý container tại tổ hợp cảng. Mô hình Ek được mở rộng để bao hàm các ràng buộc thực tiễn về khoảng cách an toàn, luồng di chuyển và vùng phục vụ thiết bị; mô hình DES được sử dụng không chỉ để mô phỏng mà còn để tìm kiếm phương án điều phối hiệu quả; trong khi mô hình Monte Carlo cho phép lượng hóa rủi ro và chi phí liên quan đến tồn kho container dự phòng dưới điều kiện bất định.

Về ý nghĩa thực tiễn, khung mô hình đề xuất có thể được sử dụng như một công cụ tham chiếu cho các nhà quản lý khi lập quy hoạch và cải tiến vận hành tại các tổ hợp cảng container ở Việt Nam. Thông qua việc mô phỏng và so sánh các kịch bản quy hoạch mặt bằng, tổ chức luồng container và chính sách sửa chữa – dự phòng, nhà quản lý có thể lựa chọn các phương án phù hợp với điều kiện hạ tầng, thiết bị và nhu cầu thị trường của từng cảng, đồng thời định lượng được mức cải thiện dự kiến về diện tích, thời gian và chi phí.

3. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chính của tác giả là xây dựng và phát triển các mô hình toán học tối ưu cùng các thuật toán phù hợp nhằm khai thác hiệu quả cho các hoạt động vận tải,

phân bố tài nguyên và quản lý container trong tổ hợp cảng. Đặc biệt, tập trung vào các vấn đề:

- Mô hình hóa hình học bố trí các thành phần trong tổ hợp cảng theo các biến số thực tế và ràng buộc thực tiễn;
- Thuật toán tối ưu sắp xếp các thành phần nhằm giảm thiểu diện tích mặt bằng sử dụng mà vẫn bảo đảm hiệu quả vận hành;
- Phương pháp xếp khít container nhằm tối đa hóa khả năng sử dụng không gian bãi và khả năng chứa.
- Mô hình ngẫu nhiên để tối ưu hóa số lượng container bảo đảm dự phòng cho công tác sửa chữa, cân bằng giữa chi phí vận hành và hiệu quả khai thác.

4. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng cách tiếp cận mô hình hóa – mô phỏng tích hợp, kết hợp ba lớp mô hình: tối ưu hóa rời rạc bố trí mặt bằng (bài toán Ek), mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) cho điều phối tài nguyên và luồng container, và mô hình ngẫu nhiên Monte Carlo cho tối ưu hóa tồn kho container bảo đảm dự phòng cho sửa chữa. Các mô hình này được tổ chức theo chuỗi liên kết, trong đó kết quả của lớp mô hình trước được sử dụng làm đầu vào cho lớp mô hình sau, tạo thành một hệ thống hỗ trợ ra quyết định tổng thể cho tổ hợp cảng container.

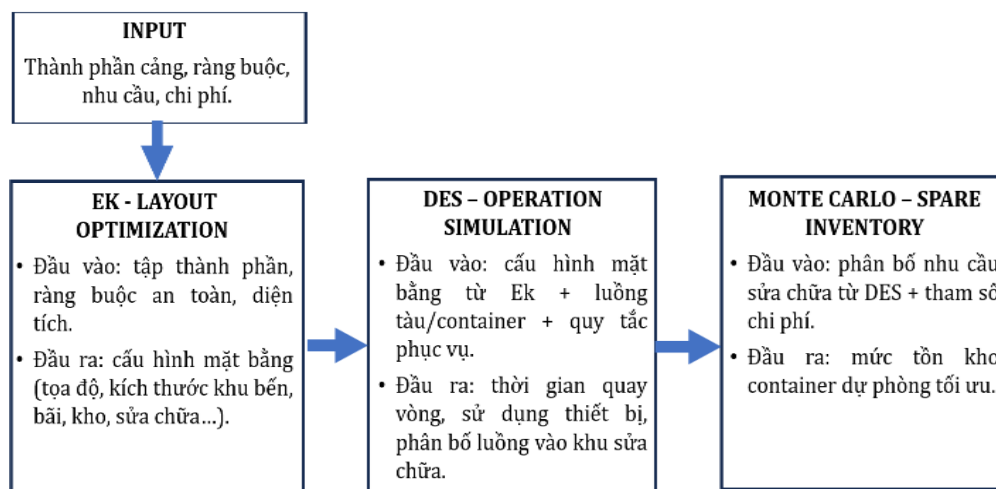
Ở lớp thứ nhất, bài toán Ek được xây dựng trên cơ sở mô hình hóa hình học mặt bằng tổ hợp cảng bằng các đa giác và hình chữ nhật, với các biến quyết định là vị trí, kích thước và cấu hình bố trí các khu chức năng (bến, bãi container, kho, khu sửa chữa, khu phương tiện,...), cùng các tham số về khoảng cách an toàn, kết nối giao thông nội bộ và vùng phục vụ của thiết bị xếp dỡ. Hàm mục tiêu tối thiểu hóa một phiếm hàm tổng hợp phản ánh diện tích trống, chi phí mặt bằng và mức độ thuận lợi cho luồng di chuyển, dưới các ràng buộc không chồng lấn, khoảng cách an toàn giữa các khu nguy hiểm và khu hành chính, cũng như khả năng tiếp cận của thiết bị đối với các khu bãi container. Kết quả của bài toán Ek là một tập phương án bố trí mặt bằng khả thi, trong đó lựa chọn cấu hình tối ưu hoặc gần tối ưu để đưa vào mô phỏng DES.

Ở lớp thứ hai, mô hình mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) được thiết lập trên nền cấu hình mặt bằng đã tối ưu hóa, mô tả chi tiết các quá trình đến – đi của tàu, luồng container qua bến, bãi, kho và khu sửa chữa, cũng như lịch hoạt động của thiết bị xếp dỡ và phương tiện vận chuyển nội bộ. Các tham số mô phỏng bao gồm phân bố thời gian đến của tàu và container, năng lực phục vụ của từng khu chức năng, các quy tắc ưu tiên xếp dỡ và luồng di chuyển trên mạng đường nội bộ. Quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES phát sinh và đánh giá nhiều kịch bản sắp xếp và điều phối tài nguyên, sử dụng tìm kiếm ngẫu nhiên có kiểm soát để quét không gian phương án và áp dụng các tiêu chuẩn dừng dựa trên số vòng lặp tối đa và mức cải thiện hàm mục tiêu. Kết quả mô phỏng cung cấp các chỉ tiêu về thời gian quay vòng container, mức sử dụng thiết bị, tải lượng khu sửa chữa và phân bố thời gian container nằm trong trạng thái chờ sửa chữa.

Ở lớp thứ ba, mô hình Monte Carlo được xây dựng để tối ưu hóa số lượng container bảo đảm dự phòng cho sửa chữa, trên cơ sở các phân bố ngẫu nhiên về lưu lượng container vào dây chuyền sửa chữa, thời gian sửa chữa và các chi phí đơn vị thu được hoặc hiệu chỉnh từ kết quả mô phỏng DES. Mô hình xem xét nhiều kịch bản ngẫu nhiên về nhu cầu sửa chữa theo ngày và tuần, với hàm mục tiêu là tối thiểu hóa chi phí kỳ vọng bao gồm chi phí thiếu container khai thác và chi phí duy trì tồn kho container dự phòng. Phương pháp Monte Carlo được sử dụng để lặp lại mô phỏng cho mỗi mức tồn kho dự phòng, ước lượng chi phí kỳ vọng và khoảng tin cậy thống kê, từ đó xác định mức tồn kho tối ưu hoặc gần tối ưu với độ tin cậy cho trước.

Trên nền tảng ba lớp mô hình này, nghiên cứu tiến hành thử nghiệm trên dữ liệu giả định được hiệu chỉnh theo các tham số điển hình của tổ hợp cảng container, đồng thời thực hiện phân tích độ nhạy đối với các tham số chính như nhu cầu thông qua, năng lực thiết bị và phân bố nhu cầu sửa chữa container. Cấu trúc tích hợp cho phép đánh giá đồng thời hiệu quả bố trí mặt bằng, hiệu quả vận hành và chính sách tồn kho container dự phòng trong một khung phân tích thống nhất, hướng tới ứng dụng trong thiết kế và quản lý tổ hợp cảng hiện đại. Bộ dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu là bộ dữ liệu giả định được hiệu chỉnh theo các tham số điển hình

của một tổ hợp cảng container quy mô trung bình tại Việt Nam (diện tích bãi, năng lực cầu bến, cường độ tàu đến, cơ cấu loại container...). Việc sử dụng dữ liệu giả định cho phép kiểm soát tốt các kịch bản và phân tích độ nhạy, nhưng cũng là một hạn chế khi đánh giá khả năng áp dụng trực tiếp cho một cảng cụ thể.



Hình 1. Kiến trúc khung mô hình tích hợp Ek – DES – Monte Carlo.

Hình 1 mô tả sơ đồ luồng của khung mô hình tích hợp gồm ba lớp: (i) tối ưu bố trí mặt bằng bằng bài toán Ek, (ii) mô phỏng sự kiện rời rạc DES để đánh giá vận hành theo bố trí mặt bằng đã chọn, và (iii) mô hình Monte Carlo tối ưu hóa tồn kho container dự phòng sửa chữa. Đầu ra của mỗi lớp trở thành đầu vào của lớp kế tiếp thông qua một tập tham số giao diện được chuẩn hóa.

Các tham số giao diện giữa ba lớp mô hình được định nghĩa như sau:

(i). Từ Ek sang DES:

- Tọa độ và kích thước từng khu chức năng (x_i, y_i, w_i, h_i) đối với bến, bãi container, kho CFS, khu sửa chữa, khu phương tiện;
- Ma trận khoảng cách hoặc thời gian di chuyển ước tính giữa các cặp khu chức năng;
- Danh sách các tuyến đường nội bộ khả dụng và năng lực thông hành đi kèm.

(ii). Từ DES sang Monte Carlo:

- Chuỗi thời gian số container phát sinh nhu cầu sửa chữa theo ngày/tuần;

- Phân bố thực nghiệm thời gian sửa chữa;
- Thống kê số container bị treo ngoài khai thác do chờ sửa chữa trong các kịch bản vận hành.

Bảng 1. Tham số đầu vào – đầu ra giữa các lớp mô hình

Từ lớp	Sang lớp	Tham số giao diện
Ek	DES	Tọa độ và kích thước các khu chức năng (x_i, y_i, w_i, h_i) cho bến, bãi container, kho CFS, khu sửa chữa, khu phương tiện và khu hành chính; ma trận khoảng cách/thời gian di chuyển ước tính giữa các cặp khu chức năng; danh sách các tuyến đường nội bộ khả dụng và năng lực thông hành tương ứng
Ek	DES	Thông tin về vùng phục vụ của từng loại thiết bị xếp dỡ (cầu bờ, cầu bãi, xe nâng, đầu kéo), bao gồm phạm vi hoạt động và các điểm giao nhận chính gắn với từng khu chức năng.
DES	Monte Carlo	Chuỗi thời gian số container phát sinh nhu cầu sửa chữa theo ngày hoặc tuần; phân bố thực nghiệm thời gian sửa chữa thu được từ mô

		phòng; thống kê số container bị treo ngoài khai thác do chờ sửa chữa trong các kịch bản vận hành.
DES	Monte Carlo	Các tham số chi phí tổng hợp (chi phí duy trì một container dự phòng trong kho, chi phí mất cơ hội do thiếu container khai thác, chi phí cố định và biến đổi của dây chuyền sửa chữa) được hiệu chỉnh từ kết quả mô phỏng và giả định vận hành.

Khung mô hình của nghiên cứu được tổ chức theo cấu trúc ba lớp tích hợp, bao gồm: (i) lớp tối ưu hóa bố trí mặt bằng bằng bài toán Ek, (ii) lớp mô phỏng sự kiện rời rạc DES đánh giá vận hành theo bố trí đã chọn, và (iii) lớp mô hình Monte Carlo tối ưu hóa tồn kho container dự phòng cho sửa chữa. Các lớp này liên kết theo chuỗi, trong đó đầu ra của lớp trước trở thành đầu vào của lớp sau thông qua một tập tham số giao diện được chuẩn hóa.

Lớp thứ nhất (Ek) tập trung tối ưu hóa cấu hình mặt bằng tổ hợp cảng trong không gian Euclid trên cơ sở các thành phần chức năng như bến, bãi container, kho CFS, khu sửa chữa, khu phương tiện và khu hành chính. Bài toán Ek cho phép xác định vị trí, kích thước và quan hệ không gian giữa các khu vực này với mục tiêu giảm diện tích trống, rút ngắn quãng đường di chuyển và vẫn thỏa các ràng buộc an toàn, kết nối giao thông nội bộ. Kết quả của lớp Ek là một hoặc một số phương án bố trí mặt bằng khả thi dùng làm dữ liệu đầu vào cho mô hình DES.

Lớp thứ hai (DES) sử dụng cấu hình mặt bằng tối ưu từ Ek để xây dựng mô hình mô phỏng sự kiện rời rạc mô tả chi tiết quá trình tàu đến – rời, xếp dỡ container, vận chuyển nội bộ, lưu kho và chuyển container vào khu sửa chữa. Trong lớp này, DES đóng vai trò mô hình mô phỏng dùng để đánh giá chất lượng từng phương án vận hành thông qua các chỉ tiêu như thời gian quay vòng container, mức sử dụng thiết bị, mức độ ùn tắc trên các tuyến di chuyển và lưu lượng container đi vào khu sửa chữa. Quá trình tối ưu hóa được thực hiện bằng thủ tục tìm kiếm ngẫu nhiên có hướng dựa trên mô phỏng (simulation-based optimization), trong đó DES là bộ máy đánh giá nghiệm.

Lớp thứ ba (Monte Carlo) tiếp nhận các thống kê về lưu lượng container cần sửa chữa, phân bố thời gian sửa chữa và các tham số chi phí từ kết quả mô phỏng DES để xây dựng mô hình tối ưu hóa tồn kho container dự phòng. Thông qua các kịch bản ngẫu nhiên được tạo ra bằng phương pháp Monte Carlo, mô hình xác định mức tồn kho container dự phòng tối ưu hoặc gần tối ưu trên cơ sở cân bằng giữa chi phí duy trì tồn kho và chi phí do thiếu container khai thác khi phát sinh nhu cầu sửa chữa. Kết quả lớp Monte Carlo cung cấp khuyến nghị định lượng về chính sách tồn kho dự phòng gắn với cấu hình mặt bằng và chiến lược vận hành đã lựa chọn.

Nhờ cấu trúc tích hợp này, khung mô hình cho phép đánh giá đồng thời ảnh hưởng của quyết định bố trí mặt bằng, điều phối tài nguyên vận hành và chính sách tồn kho container dự phòng trong một kiến trúc thống nhất. Điều này giúp các nhà quản lý cảng có thể thử nghiệm và so sánh nhiều kịch bản quy hoạch mặt bằng, tổ chức luồng container và chính sách sửa chữa – dự phòng trước khi triển khai trong thực tế.

4.1.2. Biến, tham số và ràng buộc của bài toán Ek (tối ưu bố trí mặt bằng trong không gian Euclid)

Bài toán Ek trong nghiên cứu này được xây dựng trên cơ sở mô hình hóa hình học mặt bằng tổ hợp cảng container bằng các đa giác liên thông, trong đó mỗi thành phần chức năng (bến cầu tàu, bãi container, kho, khu sửa chữa, khu phương tiện, khu hành chính, khu nguy hiểm,...) được biểu diễn bằng một hình chữ nhật với vị trí và kích thước xác định trên lưới tọa độ nguyên. Vector tham số quyết định θ bao gồm các biến về vị trí tâm, chiều dài, chiều rộng và cấu hình quay của từng thành phần, trong khi các tham số cố định mô tả ranh giới mặt bằng, diện tích sẵn có, các khu vực cấm bố trí và các yêu cầu kỹ thuật về khai thác.

Các tham số chính của bài toán bao gồm: tập thành phần I đại diện cho các khu chức năng, tập ô hoặc block J đại diện cho các vùng bố trí khả dĩ trên mặt bằng, các kích thước tiêu chuẩn a_i, b_i cho từng thành phần i , khoảng cách an toàn tối thiểu $S^{\min}$

giữa các khu nguy hiểm và khu hành chính – dân cư, các hệ số năng lực Q_i phản ánh công suất phục vụ của từng khu, cũng như các tham số về độ dài tuyến đường nội bộ, khả năng tiếp cận của thiết bị xếp dỡ và luồng di chuyển container giữa các khu.

Hàm mục tiêu của bài toán Ek được thiết kế dưới dạng phiếm hàm tổng hợp, có thể bao gồm các thành phần như diện tích trống chưa sử dụng, chi phí mặt bằng tương đương, mức độ thuận lợi của luồng di chuyển (thông qua các khoảng cách tiếp cận giữa bến – bãi – kho – cổng ra/vào), và các hệ số phạt khi vi phạm ràng buộc mềm về kết nối giao thông. Hệ ràng buộc bảo đảm:

i) các hình chữ nhật đại diện cho các thành phần không chồng lấn nhau trong không gian bố trí;

(ii) khoảng cách giữa các khu nguy hiểm với khu hành chính, khu công cộng luôn lớn hơn hoặc bằng $S^{\min}$ các khu bãi container, khu sửa chữa và kho phải nằm trong vùng phục vụ của thiết bị xếp dỡ (cầu cầu, cầu bãi, xe nâng,...), được mô hình hóa bằng các bán kính hoặc vùng phủ cho phép; và

(iii) mạng đường nội bộ bảo đảm khả năng kết nối giữa các khu chính, không tạo ra các “đảo” tách rời về luồng di chuyển container.

Nhờ hệ tham số và ràng buộc này, bài toán Ek phản ánh đầy đủ các yêu cầu thực tiễn của tổ hợp cảng container, đồng thời vẫn giữ được cấu trúc rời rạc thuận lợi cho việc áp dụng các thuật toán tối ưu hóa hiện đại.

4.1.3. Kết quả tối ưu bố trí mặt bằng và các chỉ tiêu hiệu quả

Trên cơ sở mô hình Ek đã xây dựng, nghiên cứu tiến hành tính toán với các bộ dữ liệu giả định được hiệu chỉnh từ các tham số điển hình của tổ hợp cảng container, bao gồm số lượng và loại hình thành phần, diện tích mặt bằng, các yêu cầu an toàn và luồng di chuyển. Kết quả tối ưu cho thấy mô hình cho phép xác định được các phương án bố trí mặt bằng trong đó các khu bến, bãi container, kho, khu sửa chữa và khu phương tiện được sắp xếp liên hoàn, bảo đảm các ràng buộc không chồng lấn và khoảng

cách an toàn, đồng thời tối thiểu hóa diện tích trống phân tán trên tổng mặt bằng.

Các tính toán minh họa chỉ ra rằng tỷ lệ diện tích trống giảm đáng kể so với phương án bố trí ban đầu theo kinh nghiệm, đặc biệt trong các kịch bản số lượng thành phần lớn, nhờ khả năng khai thác hợp lý các khu vực chuyển tiếp và khoảng trống giữa các thành phần. Đồng thời, tổng chiều dài các tuyến di chuyển chính giữa bến – bãi – kho và khu sửa chữa cũng được rút ngắn, góp phần cải thiện điều kiện vận hành và giảm chi phí vận chuyển nội bộ. Các phương án bố trí tối ưu hoặc gần tối ưu được lựa chọn làm cấu hình mặt bằng đầu vào cho mô hình mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) ở bước tiếp theo, nhằm đánh giá chi tiết hơn tác động của bố trí mặt bằng lên các chỉ tiêu vận hành động như thời gian quay vòng container và mức sử dụng thiết bị.

4.1.4. Thiết kế hình học sơ đồ không gian tổ hợp cảng

Nghiên cứu sử dụng bài toán tối ưu hóa Ek để thiết kế hình học sơ đồ không gian tổ hợp cảng. Mục tiêu đặt ra là mô hình hóa các đối tượng toán học đại diện cho thành phần cảng sao cho phản ánh chính xác nhất các mối tương tác vật lý và không gian giữa chúng, đồng thời tránh quá tải thông tin thừa. Các đối tượng trong mô hình gồm những tập điểm hình học đại diện cho các phần tử cấu thành như bến cảng, kho bãi, thiết bị xếp dỡ,... Mỗi đối tượng được xác định bởi hình dạng đặc trưng, thông thường là các hình chữ nhật, và vị trí trong không gian được mô tả bởi các tham số tọa độ và hướng quay [6] [7] [8] [9]. Có hai loại bài toán Ek:

- Biên cố định, trong đó các đặc trưng metric đã được xác định trước;

- Biên di động, trong đó một số đặc trưng metric là tham số cần tối ưu, có thể liên quan tương hỗ dẫn đến các phương trình liên kết phức tạp.

Các bài toán này thường kèm theo các ràng buộc tương hỗ giữa các tham số, tạo thành các phương trình liên kết đặc biệt cần được xem xét khi tối ưu.

Bài toán tối ưu thiết kế hình học được quy về tìm điểm cực trị của phiếm hàm mục tiêu trên tập hợp tham số, giới hạn bởi các ràng buộc về vị trí và kích thước,

đồng thời phải giữ nguyên các mối tương quan ràng buộc giữa các đối tượng trong tổ hợp (đặc biệt các điều kiện không giao cắt giữa các thành phần).

Bảng 2. Các khu vực chức năng của cảng container [1].

Thành phần	Mô tả chức năng
Vùng nước	Đảm bảo cho tàu neo đậu, quay trở, tránh bão, đón trả hàng tiêu, luồng hàng hải...
Cầu bến	Tàu thuyền neo đậu để bốc trả hàng hóa và thực hiện các dịch vụ khác
Bãi container	Nơi phân loại container (bãi xuất, bãi nhập, bãi rỗng, bãi container đặc biệt)
Kho CFS	Khu vực lưu giữ hàng lẻ, thực hiện các dịch vụ giá trị gia tăng và đóng/rút container
Khu vực kiểm hóa	Nơi hải quan tiến hành kiểm tra thực tế hàng hóa xuất nhập khẩu
Khu vực giao nhận	Nơi chuyển giao container giữa cảng và phương tiện vận tải nội địa (bộ, sắt)
Trung tâm điều độ	Trung tâm điều phối vận hành cảng
Xưởng sửa chữa	Khu vực sửa chữa, bảo dưỡng thiết bị, phương tiện và container
Khu thủ tục	Tiến hành các thủ tục hành chính và thương vụ cảng
Bãi đỗ xe	Nơi tập kết xe chờ vào cảng
Khu vực cổng	Kiểm soát phương tiện, hàng hóa ra, vào cảng

Quá trình giải quyết bài toán được chia thành hai giai đoạn:

- Giai đoạn 1: Tìm các điểm cực trị cục bộ hoặc gần đúng thông qua phương pháp sắp xếp, phủ kín theo thứ tự từng đối tượng hoặc phương pháp hội tụ nhanh.
- Giai đoạn 2: Tối ưu hóa phiếm hàm mục tiêu trên tập hợp các điểm cực trị đã xác định.

Việc thiết kế bố trí mặt bằng tổ hợp cảng đòi hỏi xây dựng mô hình toán học sao cho vừa phản ánh chính xác cấu trúc vật lý và các mối tương quan thực tế giữa các thành phần, vừa đảm bảo mô hình đủ gọn gàng để tránh sự quá tải thông tin. Trong nghiên cứu này, các bài toán tối ưu hóa Ek liên quan được sử dụng làm khuôn khổ phân tích, trong đó các phép biến đổi đồng dạng riêng chi phối hình học của các thành phần cảng. Tập bài toán Ek trong nghiên cứu bao gồm hai biến thể:

(i) Ek với biến cố định, sử dụng các kích thước tiêu chuẩn và khoảng cách an toàn đã cho; (ii) Ek với biến động, trong đó một phần các tham số hình học được xem là biến tối ưu để khai thác linh hoạt hơn không gian mặt bằng.

Mục tiêu của việc thiết kế là tìm điểm cực trị (cực tiểu) của một phiếm hàm hiệu quả trên tập hợp các tham số vị trí và hình dạng hợp lệ. Trong đó, chỉ những phép biến đổi đồng dạng riêng được phép thực hiện nhằm giữ nguyên mối tương quan hình học cơ bản. Bài toán tối ưu hóa có thể được tóm tắt như sau:

$$\min_{x \in X} f(x, g) \quad (1)$$

Trong đó x là vector tham số (bao gồm vị trí, kích thước), g là các tham số không thay đổi, và X là tập giá trị hợp lệ của x .

Các tình huống áp dụng gồm bài toán sắp xếp — đảm bảo các thành phần không chồng chéo nhau trong không gian bố trí, và bài toán phủ — đảm bảo các khu vực chức năng được khai thác tối ưu mà không để lãng phí.

4.1.5. Phương pháp sắp xếp và quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES

Phương pháp sắp xếp theo thứ tự từng thành phần lần lượt hoặc sử dụng thuật toán hội tụ nhanh được áp dụng để tìm cực trị cục bộ của hàm mục tiêu. Sau đó, giải pháp tối ưu tổng thể được xác định bằng phương pháp tối ưu hóa phiếm hàm trên tập các kết quả cực trị cục bộ này [10].

Thuật toán tối ưu sắp xếp các thành phần cảng dựa trên tính toán mô phỏng sự kiện rời rạc (Discrete Event Simulation - DES) kết hợp phương pháp tìm kiếm ngẫu nhiên để phân chia các cực trị cục bộ. Thuật toán phân tích tất cả các tổ hợp sắp xếp chấp nhận được (satisfying constraints), sau đó lựa chọn giải pháp tối ưu theo tiêu chuẩn hiệu quả.

Hình dạng mặt bằng của tổ hợp cảng được mô hình bằng đa giác liên thông, trong đó các thành phần như bến cầu tàu, kho bãi,... được biểu diễn bằng các hình chữ nhật cho phép xoay góc quay bội số 90 độ hoặc các góc

khác. Thuật toán thực hiện xếp các thành phần này dọc theo các trục tọa độ, lấp đầy mặt bằng theo từng lớp.

Bảng 2: Tỷ lệ diện tích trống theo số lượng thành phần.

Số thành phần	Phương án ban đầu (%)	Quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES (%)
10	30	20
30	28	18
50	26	15
75	23	17
90	22	19

Mô tả: Quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES cải thiện diện tích trống 15–20% so với phương án thiết kế thủ công, do mỗi cấu hình bố trí được đánh giá bằng mô hình DES và lựa chọn theo tiêu chuẩn hàm mục tiêu. Các thử nghiệm mô phỏng trên máy tính cho thấy quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES cải thiện chất lượng bố trí lên 15-20% so với phương án thiết kế thủ công, giúp tiết kiệm diện tích mặt bằng mà vẫn bảo đảm đầy đủ chức năng hoạt động.

4.1.6. Tối ưu hóa lượng tài nguyên bằng phương pháp xếp khít các container

Việc tận dụng tối đa diện tích được cấp phát tại các khu vực lưu trữ và bãi chứa container là yếu tố then chốt giúp nâng cao hiệu quả hoạt động của cảng. Phương pháp xếp khít các kiện hàng (container và hàng đóng kiện) được phát triển dựa trên công thức tính toán số kiện xếp được trong một khu vực xác định thông qua việc điều chỉnh chiều dài, chiều rộng và xoay hướng các kiện.

Công thức tính toán bố trí hàng hóa sử dụng mô hình block, đơn nguyên, số kiện xếp theo chiều dài và chiều rộng, đảm bảo các kiện không vượt quá giới hạn không gian kho bãi mà vẫn tận dụng hết khả năng chứa.

Kết quả nghiên cứu ứng dụng tại các bãi container cho thấy phương pháp xếp khít giúp tăng sức chứa container và xe vận chuyển từ 4% đến 22%, đồng thời giảm chi phí vận hành và nâng cao năng suất khai thác.

4.1.7. Mô hình tối ưu hóa chi phí và tham số tổ hợp container

Ngoài việc tối ưu về không gian mặt bằng, việc tối ưu hóa các tham số hoạt động và chi phí trong tổ hợp container cũng là một phần quan trọng. Mô hình chi phí tổng hợp bao gồm chi phí mặt bằng, chi phí vận hành các tuyến xếp dỡ, chi phí bảo dưỡng kho phân loại và phương tiện vận chuyển [11].

Mô hình chi phí được biểu diễn dưới dạng hàm tuyến tính dựa trên các tham số như số lượng cầu tàu, chu kỳ thông tàu hàng, năng suất khai thác, diện tích bãi phân loại và các hệ số sử dụng công suất thực tế. Qua đó giúp cân đối chi phí đầu tư ban đầu và chi phí khai thác vận hành, hướng tới giảm thiểu tổng chi phí ngày trung bình.

4.2 Mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) cho điều phối tài nguyên

4.2.1. Thiết kế mô hình mô phỏng sự kiện rời rạc (DES)

Mô hình mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) được thiết kế trên nền cấu hình mặt bằng đã được lựa chọn từ kết quả bài toán Ek, với mục tiêu tái hiện các quá trình vận hành chính trong tổ hợp cảng container như tàu đến – rời, xếp dỡ container tại cầu tàu, vận chuyển nội bộ giữa bến và bãi, lưu kho, cấp phát cho khách hàng và đưa vào khu sửa chữa khi phát sinh hư hỏng. Các thực thể (entities) trong mô hình bao gồm tàu, container, thiết bị xếp dỡ (cầu cầu, cầu bãi, xe nâng, xe đầu kéo) và các nguồn lực phụ trợ; các sự kiện chính bao gồm tàu đến, bắt đầu/kết thúc xếp dỡ, container vào/ra bãi, bắt đầu/kết thúc vận chuyển nội bộ và bắt đầu/kết thúc sửa chữa.

Các tham số đầu vào của mô hình được xác định từ dữ liệu giả định và các đặc trưng chuẩn của tổ hợp cảng: phân bố thời gian giữa các lần tàu đến, kích thước lô container, phân bố thời gian xếp dỡ tại cầu tàu và bãi, năng lực phục vụ của từng thiết bị, cấu trúc mạng đường nội bộ và các quy tắc ưu tiên phục vụ. Không gian tìm kiếm của mô hình bao gồm các cấu hình sắp xếp thứ tự phục vụ, các chiến lược điều phối thiết bị và các phương án phân bổ luồng container giữa các khu bãi, được phát sinh ngẫu nhiên có kiểm soát để bảo đảm thỏa mãn các ràng buộc về an toàn và kết nối.

Quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES triển khai theo chu trình gồm các bước: phát sinh ngẫu nhiên hoặc bán ngẫu nhiên các mẫu thứ tự sắp xếp và điều phối tài nguyên trên cấu hình mặt bằng cho trước; mô phỏng chi tiết diễn biến hệ thống trong một chân trời thời gian đủ dài; thu thập các chỉ tiêu hiệu quả như thời gian quay vòng container, hệ số sử dụng thiết bị, mức độ ùn tắc trên các tuyến chính; và đánh giá giá trị phiếm hàm mục tiêu tổng hợp. Tiêu chuẩn dừng của quá trình tìm kiếm được xác định theo số vòng lặp mô phỏng tối đa và mức cải thiện tối thiểu của hàm mục tiêu trong một số vòng lặp liên tiếp, kết hợp với các bước “nhảy” tìm kiếm ngẫu nhiên có kiểm soát để tránh rơi vào các cực trị cục bộ. Kết quả mô hình DES không chỉ cho phép so sánh, lựa chọn các phương án điều phối tài nguyên trên cùng một cấu hình mặt bằng mà còn cung cấp các phân bố thống kê về lưu lượng và nhu cầu sửa chữa container, làm cơ sở cho việc thiết lập mô hình Monte Carlo tối ưu hóa tồn kho container bảo đảm dự phòng ở bước tiếp theo.

Cần nhấn mạnh rằng DES trong nghiên cứu này đóng vai trò mô hình mô phỏng để đánh giá chất lượng từng phương án bố trí và điều phối tài nguyên, chứ không phải một thuật toán tối ưu hóa độc lập. Quá trình tối ưu hóa được thực hiện bằng một thủ tục tìm kiếm ngẫu nhiên có hướng (randomized search) sinh các phương án ứng viên, trong đó mỗi phương án được gán một giá trị hàm mục tiêu thông qua mô phỏng DES. Như vậy, có thể xem đây là một thuật toán tối ưu hóa dựa trên mô phỏng (simulation-based optimization), trong đó DES là bộ máy đánh giá nghiệm.

4.2.2. Thuật toán tự tối ưu hóa sắp xếp các thành phần tổ hợp cảng thông qua mô hình DES

Phương pháp mô phỏng sự kiện rời rạc (Discrete Event Simulation - DES) được sử dụng để mô phỏng và tối ưu hóa hoạt động bố trí, sắp xếp các thành phần của tổ hợp cảng [10].

Tập hợp các thành phần của tổ hợp được biểu diễn trong không gian Euclid với tọa độ số nguyên, tạo thành một lưới tọa độ. Mục tiêu tối thiểu hóa một phiếm hàm mục tiêu tổng hợp, được đánh giá qua các tiêu chuẩn

hiệu quả như diện tích sử dụng, chi phí vận hành, thời gian quay vòng container.

Quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES triển khai theo chu trình sau:

- Phát sinh ngẫu nhiên các mẫu thứ tự sắp xếp thành phần trên diện tích cho phép, cho phép xoay góc các thành phần theo các bội số cố định;
- Đánh giá và tính toán phiếm hàm mục tiêu theo mô hình mô phỏng;
- Lựa chọn ngẫu nhiên các giải pháp chấp nhận được dựa trên các tiêu chuẩn đánh giá để tìm kiếm cực bộ giá trị cực tiểu phiếm hàm;
- Kết hợp các bước tìm cực tiểu trong lân cận và tìm kiếm tuyến tính để đảm bảo xu hướng giảm dần của hàm mục tiêu.

Phương pháp được tổ chức trên cơ sở mô hình hóa các quá trình ngẫu nhiên, cho phép xử lý tính phi tuyến, rời rạc và phức tạp của bài toán bố trí tổ hợp cảng thực tế.

4.3 Thuật toán tối ưu hóa lượng tài nguyên bằng phương pháp xếp khít các container

Để tối ưu hóa việc sử dụng không gian kho bãi và phương tiện vận tải, nghiên cứu đưa ra phương pháp xếp khít các container trong khu vực chứa hàng hình chữ nhật [11].

Phương pháp dựa trên việc điều chỉnh số lượng kiện hàng theo chiều dài và chiều rộng, cho phép xoay các kiện tương đối nhau để đạt được mật độ xếp tối ưu nhất.

Công thức tính toán số lượng kiện hàng theo từng chiều và số block xếp được xây dựng dựa trên kích thước thực tế của kiện và diện tích kho bãi hoặc phương tiện vận tải.

Công thức xếp khít container trong kho bãi:

$$\begin{aligned} L_w &= n_l \times L_c, W_w = n_w \times W_c, \\ n_w &= m_w \times b_w, n_l = m_l \times b_l, \end{aligned} \quad (2)$$

Trong đó:

- L_c, W_c : Chiều dài và chiều rộng kiện hàng;

- L_w, W_w : Chiều dài và chiều rộng khu chứa hàng;
- n_w, n_l : Số kiện theo chiều rộng và chiều dài;
- m_w, m_l : Số block theo chiều rộng và chiều dài;
- b_w, b_l : Số kiện trong block theo chiều rộng, dài.

Kết quả áp dụng phương pháp này có thể tăng sức chứa các phương tiện từ 4-22% tùy loại, đồng thời tăng hiệu quả sử dụng kho bãi lên 11-17%.

4.4 Mô hình tối ưu hóa các tham số hệ thống container trong tổ hợp cảng

Dựa trên mô hình toán học cho chi phí vận hành và xây dựng các thành phần tổ hợp cảng, thuật toán tối ưu hóa định hướng giảm thiểu chi phí trung bình ngày tổng hợp bao gồm [11] [12]

- Chi phí tìm mặt bằng cho xếp dỡ container và kho phân loại;
- Chi phí duy trì hoạt động bến xếp dỡ và kho đóng gói;
- Chi phí vận chuyển chuyên dùng và vận chuyển tổng hợp.

Công thức chi phí được biểu diễn chi tiết từng thành phần, phụ thuộc vào số lượng cầu tàu, các dây chuyền công nghệ, chu kỳ thông tàu, lượng hàng thông qua và các hệ số sử dụng công suất hoạt động.

4.5 Mô hình ngẫu nhiên tối ưu hóa số lượng container bảo đảm dự phòng cho sửa chữa

Số lượng container dự phòng cần được tối ưu hóa để cân đối hai yếu tố:

- Đảm bảo đủ tải lượng công việc sửa chữa trong điều kiện lưu lượng ngẫu nhiên hàng ngày;
- Giảm thiểu thời gian container nằm ngoài khai thác gây thiệt hại cho các hãng tàu.

Bài toán được mô hình hóa như bài toán tối ưu hóa ngẫu nhiên với hàm mục tiêu tuyến tính đại diện tổng thiệt hại do container bị giữ lâu và do thiếu hụt công suất dây chuyền sửa chữa.

Phương pháp giải bài toán này được thực hiện thông qua mô hình mô phỏng Monte Carlo trên máy tính, với các bước chính:

- Xác định quy luật phân phối xác suất của đơn hàng sửa chữa dựa trên dữ liệu lịch sử;

- Mô phỏng đánh giá tổng thiệt hại tại các mức container bảo đảm dự phòng khác nhau;

- Lựa chọn giá trị tối ưu của lượng container bảo đảm dự phòng tương ứng với giá trị cực tiểu tổn thất.

Mô hình sử dụng dãy ngẫu nhiên tuyến tính để đảm bảo chất lượng thống kê của các phép sinh mẫu thử.

4.5.1. Tối ưu hóa số lượng container bảo đảm dự phòng cho công tác sửa chữa

Trong hoạt động khai thác container, việc quản lý thời gian container nằm ngoài khai thác do hư hỏng và sửa chữa có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả vận hành và chi phí của các hãng tàu. Do tính ngẫu nhiên của mức độ hư hỏng và tốc độ luân chuyển container, số lượng container cần bảo đảm dự phòng để phục vụ công tác sửa chữa cũng được coi là một đại lượng ngẫu nhiên. Mức độ bảo đảm dự phòng này phải đủ để bù đắp những biến động không đều của tải lượng sửa chữa, đồng thời không làm tăng quá mức thời gian container nằm ngoài khai thác, gây thiệt hại cho các hãng tàu.

Việc rút ngắn thời gian container nằm ngoài khai thác do hư hỏng và sửa chữa là yếu tố quyết định đến hiệu quả luân chuyển và chi phí vận hành trong tổ hợp cảng. Số lượng container dự phòng cần thiết nhằm điều hòa sự mất cân bằng do lưu lượng ngẫu nhiên các đơn hàng sửa chữa, tuy nhiên lượng container dự phòng tăng sẽ kéo dài thời gian container nằm ngoài khai thác, gây thiệt hại kinh tế cho các hãng tàu.

Như vậy, cần xác định số container dự phòng tối ưu để tổng thiệt hại bao gồm:

- Thiệt hại do không đủ tải cho dây chuyền sửa chữa tại cơ sở;
- Thiệt hại do container bị giữ kéo dài ngoài khai thác.

Mục tiêu của mô hình là xác định số lượng container bảo đảm dự phòng tối ưu sao cho tổng thiệt hại kinh tế gồm hai thành phần được giảm thiểu: thiệt hại do không đủ tải cho dây chuyền sản xuất sửa chữa và thiệt hại do container bị giữ kéo dài ngoài khai thác.

4.5.2. Mô hình ngẫu nhiên tối ưu hóa số lượng container dự phòng

Mô hình tối ưu hóa số lượng container bảo đảm dự phòng được thể hiện như sau [12]

$$\min_{N_d} W = \sum_{i=1}^T (C_t X_i + C_s Y_i) \quad (3)$$

Trong đó:

- W là tổng tổn thất của hãng tàu trong chu kỳ T ngày;
- N_d là số container dự phòng cần tối ưu;
- C_t là tổn thất thu nhập do container bị giữ kéo dài;
- X_i là số container nằm trong dự phòng ngày thứ i ;
- C_s là tổn thất do không đủ tải cho dây chuyền sản xuất sửa chữa;
- Y_i là lượng không đủ tải ngày thứ i .

Lượng không đủ tải Y_i phụ thuộc vào số lượng container sửa chữa và dự phòng trong ngày, cùng các tham số chi phí kế hoạch sửa chữa và tỉ lệ chi phí biến thiên, thể hiện theo công thức tuyến tính.

Tính ngẫu nhiên của số container sửa chữa và dự phòng khiến bài toán thuộc lớp tối ưu hóa ngẫu nhiên, khó giải bằng các phương pháp phân tích truyền thống. Do đó, phương pháp mô phỏng trên máy tính được áp dụng để tìm giá trị tối ưu bằng cách:

- Xác định quy luật phân phối xác suất thực tế của số đơn hàng yêu cầu sửa chữa container dựa trên dữ liệu lịch sử. Kết quả nghiên cứu cho thấy luồng đơn hàng gần đúng với phân phối lũy thừa.
- Mô phỏng mẫu thực tế của các đại lượng ngẫu nhiên dựa trên phân phối này.
- Thực hiện tính toán tổn thất tổng hợp cho các giá trị dự phòng container khác nhau.
- Lựa chọn giá trị dự phòng tối ưu sao cho tổng tổn thất đạt cực tiểu.

Mô hình toán học biểu diễn tổng thiệt hại W trong chu kỳ T ngày dưới dạng hàm tuyến tính:

$$W = \sum_{i=1}^T (C_t X_i + C_s Y_i) \quad (4)$$

trong đó:

- X_i là số container nằm trong lượng dự phòng ngày i ;
- Y_i là lượng không đủ tải dây chuyền ngày i ;
- C_t, C_s lần lượt là tổn thất thu nhập do container bị giữ kéo dài và tổn thất do không đủ tải dây chuyền.

Mức Y_i phụ thuộc vào số container sửa chữa và dự phòng trong ngày, chi phí kế hoạch sửa chữa, và tỷ lệ chi phí biến thiên.

Do tính chất ngẫu nhiên và tương tác phức tạp giữa các tham số, bài toán được giải bằng mô phỏng máy tính, áp dụng mô hình Monte Carlo. Việc này bao gồm:

- Xác định quy luật phân phối xác suất của lưu lượng đơn hàng sửa chữa dựa trên dữ liệu lịch sử (nghiên cứu cho thấy phân phối lũy thừa phù hợp).
- Mô phỏng mẫu đơn hàng sửa chữa dựa trên phân phối này.
- Tính toán tổn thất tổng hợp ứng với từng giá trị container dự phòng.
- Tìm giá trị container dự phòng tối ưu để giảm thiểu tổng tổn thất.

4.5.3. Phương pháp mô phỏng Monte Carlo

Phương pháp Monte Carlo được sử dụng trong mô hình hóa nhằm tạo ra các mẫu thử ngẫu nhiên có phân phối xác suất đã xác định, giúp đánh giá các đặc tính hệ thống một cách thực tế và có độ tin cậy cao. Các bộ tạo sinh số ngẫu nhiên đồng dạng tuyến tính được sử dụng với việc lựa chọn tham số mô-đun, gia số, thừa số và giá trị khởi đầu sao cho chu kỳ của dãy số ngẫu nhiên đủ lớn và mang tính chất ngẫu nhiên cao [13], [14].

Việc tạo sinh số thực dựa trên phép chia số nguyên tạo ra trên máy tính với kích thước ngôn ngữ máy tính, giúp tăng tốc độ tính toán và tránh sử dụng các phép toán chia chậm.

Ngoài ra, các phép tạo sinh khác như tạo sinh nhân lên đơn thuần cũng đã được nghiên cứu tuy nhanh hơn nhưng không đảm bảo chu kỳ dài nhất của dãy số.

Bằng việc lặp lại chạy mô hình mô phỏng với nhiều bộ số ngẫu nhiên khác nhau, các kết quả cực trị của hàm mục tiêu có thể được đánh giá chính xác, giảm thiểu sai số lựa chọn, đồng thời xác định khoảng tin cậy cần thiết cho các tham số tối ưu.

Phương pháp Monte Carlo sử dụng dãy số ngẫu nhiên phân phối đều tạo ra qua bộ tạo sinh đồng dạng tuyến tính có tham số mô-đun, gia số, thừa số và giá trị khởi đầu tối ưu nhằm đảm bảo tính ngẫu nhiên và chu kỳ dài.

Các giá trị nguyên sinh được biểu diễn dưới dạng số thực, thuận tiện tính toán trên máy tính với chế độ số học “điểm cố định”, tăng tốc độ và giảm sai số.

Việc chạy lặp lại mô hình với nhiều bộ số ngẫu nhiên độc lập nâng cao độ tin cậy, giảm sai số lựa chọn và tạo ra khoảng tin cậy cho các kết quả cực trị của hàm mục tiêu.

5. Kết quả

Kết quả mô phỏng cho thấy:

- Quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES cải thiện hiệu quả bố trí mặt bằng tổ hợp cảng lên tới 15-20% so với thiết kế hiện có, qua việc tối ưu hóa thứ tự

lắp đặt và vị trí các thành phần dựa trên việc sắp xếp tuần tự và phủ kín bề mặt;

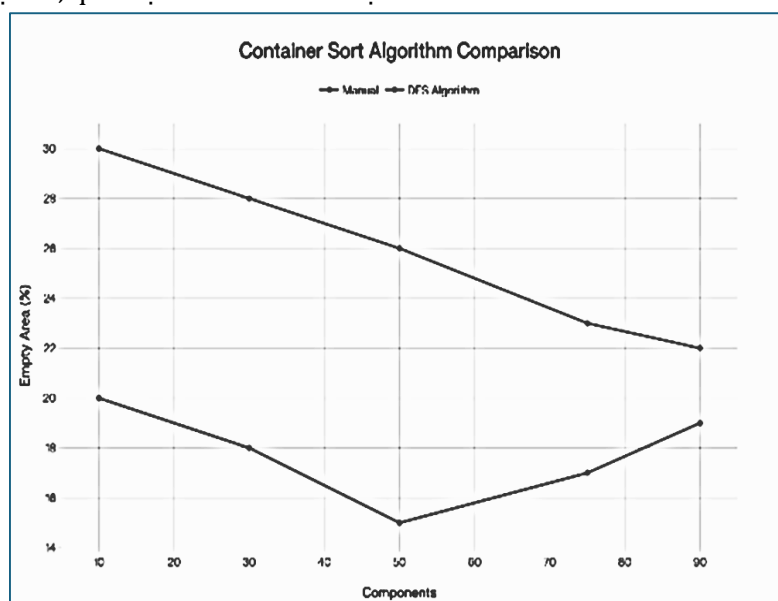
- Phương pháp xếp khối container trong kho và trên các phương tiện vận tải nâng cao sức chứa lên 4-22%, giúp giảm diện tích sử dụng và tăng năng suất xử lý;

- Mô hình Monte Carlo xác định số lượng container bảo đảm dự phòng giúp cân bằng chi phí vận hành và thiệt hại do container nằm ngoài khai thác, với hàm mục tiêu tuyến tính được tối ưu hóa hiệu quả;

- Thuật toán tối ưu hóa kết hợp kinh nghiệm thiết kế với mô phỏng ngẫu nhiên cung cấp phương án linh hoạt, phù hợp với các yêu cầu vận hành đa dạng và phức tạp.

Dưới đây là biểu đồ so sánh giữa phương pháp thủ công và thuật toán tối ưu DES trong việc sắp xếp các thành phần của tổ hợp cảng, biểu thị qua tỷ lệ diện tích trống (%) với các số lượng thành phần khác nhau.

Biểu đồ cho thấy quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES giảm đáng kể tỷ lệ diện tích trống so với phương án thủ công, với mức giảm từ 15-20% khi số lượng thành phần nhỏ đến vừa. Tuy nhiên, khi số thành phần lớn (75-90), hiệu quả DES có phần giảm do giới hạn thời gian và tính phức tạp tính toán, đòi hỏi sự kết hợp với kinh nghiệm thiết kế.



Hình 2. So sánh giữa phương pháp thủ công và tối ưu hóa dựa trên thuật toán tối ưu DES.

6. Bàn luận

Kết quả nghiên cứu minh chứng hiệu quả rõ rệt của việc kết hợp các mô hình toán học tối ưu với các thuật toán mô phỏng sự kiện rời rạc và mô hình ngẫu nhiên Monte Carlo trong quản lý container tại tổ hợp cảng. Phương pháp này giúp giải quyết bài toán đa mục tiêu, đa ràng buộc phức tạp trong thực tế vận hành.

Giới hạn của nghiên cứu gồm thời gian tính toán phức tạp khi số lượng thành phần lớn, cũng như tính ngẫu nhiên gây phân tán kết quả mô phỏng. Do đó, việc tích hợp kinh nghiệm thiết kế và điều chỉnh tham số thuật toán là cần thiết để đạt hiệu quả tối ưu trong thực tiễn.

Hạn chế quan trọng của nghiên cứu là chưa kiểm chứng khung mô hình trên bộ dữ liệu vận hành chi tiết của một tổ hợp cảng cụ thể tại Việt Nam. Do đó, các con số cải thiện (15–20% diện tích, 4–22% sức chứa, khoảng 10% thời gian quay vòng) mang tính minh họa trên bộ dữ liệu giả định và cần được hiệu chỉnh, kiểm chứng lại khi áp dụng cho từng cảng với đặc thù riêng về luồng hàng, cấu hình mặt bằng và thiết bị.

Nghiên cứu cũng mở ra hướng phát triển thuật toán đa cấp, đa mục tiêu mô phỏng cho các tổ hợp cảng quy mô lớn hơn cùng với ứng dụng AI hỗ trợ.

Kết quả mô phỏng DES cho thấy dưới cấu hình mặt bằng tối ưu, thời gian quay vòng trung bình của một container giảm khoảng 10% so với phương án bố trí ban đầu, đồng thời hệ số sử dụng của các thiết bị chính (cầu cầu, cầu bãi, xe đầu kéo) được phân bố đều hơn, hạn chế hiện tượng quá tải cục bộ. Phân tích kết quả theo từng kịch bản nhu cầu cho thấy khi lưu lượng container tăng đến ngưỡng 20%, hệ thống vẫn duy trì được mức độ phục vụ chấp nhận được mà không cần mở rộng diện tích mặt bằng, nhưng yêu cầu điều chỉnh chiến lược điều phối thiết bị để tránh tắc nghẽn tại một số nút.

Đối với mô hình Monte Carlo, các đường cong chi phí kỳ vọng theo mức tồn kho container dự phòng cho thấy tồn tại một vùng nghiệm khá phẳng xung quanh giá trị tối ưu, điều này gợi ý nhà quản lý có thể lựa chọn mức dự phòng cao hơn một chút so với giá trị tối ưu toán học để tăng độ an toàn mà không làm chi phí tổng

thể tăng đáng kể. Việc báo cáo kèm khoảng tin cậy thống kê cho chi phí và số lượng container dự phòng cũng cho phép đánh giá mức độ ổn định của nghiệm dưới các kịch bản biến động khác nhau.

Các kết quả mô phỏng và tối ưu hóa cho thấy việc áp dụng đồng thời mô hình Ek cho bố trí mặt bằng, mô phỏng sự kiện rời rạc (DES) cho điều phối tài nguyên và phương pháp Monte Carlo cho tối ưu tồn kho container dự phòng có thể giúp cải thiện đáng kể hiệu quả khai thác tổ hợp cảng. Cụ thể, phương án bố trí mặt bằng tối ưu giúp giảm tỷ lệ diện tích trống và rút ngắn cự ly di chuyển giữa các khu chức năng; mô phỏng DES cho thấy thời gian quay vòng container và mức sử dụng thiết bị được cải thiện so với các phương án bố trí truyền thống; trong khi mô hình Monte Carlo hỗ trợ xác định mức tồn kho container dự phòng hợp lý, cân bằng giữa chi phí duy trì và rủi ro thiếu container khai thác.

Ý nghĩa thực tiễn của các kết quả này nằm ở chỗ chúng cung cấp cho nhà quản lý cảng một công cụ phân tích định lượng để đánh giá các phương án thiết kế và vận hành trước khi triển khai trên thực tế. Thay vì dựa chủ yếu vào kinh nghiệm và các quy tắc heuristics đơn lẻ, hệ thống mô hình tích hợp cho phép mô phỏng các kịch bản khác nhau về nhu cầu, năng lực thiết bị và chính sách sửa chữa container, từ đó lựa chọn phương án phù hợp với điều kiện cụ thể của từng tổ hợp cảng.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế cần được thẳng thắn nhìn nhận. Thứ nhất, bộ dữ liệu sử dụng trong mô hình chủ yếu có tính chất giả định, được hiệu chỉnh theo các tham số điển hình, chưa dựa trên bộ dữ liệu vận hành chi tiết của một tổ hợp cảng cụ thể, do đó mức độ “fit” với một trường hợp thực tế cụ thể còn hạn chế. Thứ hai, các giả định trong mô hình như phân bố thời gian đến của tàu, lưu lượng container, thời gian sửa chữa và hành vi xếp dỡ được đơn giản hóa nhằm bảo đảm khả năng tính toán, chưa xét đầy đủ các yếu tố bất thường như sự cố thiết bị, thay đổi lịch trình tàu, tắc nghẽn ngoài dự kiến. Thứ ba, mô hình hiện tại mới tập trung vào khía cạnh không gian, thời gian và chi phí, chưa xem xét sâu các yếu tố môi trường, an toàn lao động và các ràng buộc pháp lý cụ thể tại từng cảng.

Trong tương lai, hướng phát triển của nghiên cứu là mở rộng mô hình theo hai hướng chính. Một là hiệu

chỉnh và kiểm chứng mô hình trên dữ liệu thực tế của một hoặc nhiều tổ hợp cảng, qua đó đánh giá độ tin cậy, khả năng dự báo và hiệu quả ứng dụng trong điều kiện vận hành cụ thể. Hai là tích hợp thêm các thành phần mô hình nâng cao như tối ưu đa mục tiêu (kết hợp chi phí, thời gian, môi trường), các thuật toán trí tuệ nhân tạo và học máy để tự động điều chỉnh tham số điều phối trong DES, cũng như kết hợp các mô hình rủi ro nhằm mô phỏng tốt hơn các kịch bản gián đoạn và biến động lớn trong chuỗi cung ứng container. Bên cạnh đó, mô hình Monte Carlo có thể được mở rộng để xem xét đồng thời nhiều loại container khác nhau, các cấp độ ưu tiên sửa chữa, cũng như kết hợp với các chiến lược bảo trì dự báo (predictive maintenance) của thiết bị và container.

7. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng và trình bày một khung mô hình tích hợp gồm ba lớp cho quản lý và khai thác container trong tổ hợp cảng, bao gồm: (i) lớp tối ưu hóa bố trí mặt bằng dựa trên bài toán Ek trong không gian Euclid, (ii) lớp mô phỏng sự kiện rời rạc DES cho vận hành và điều phối tài nguyên, và (iii) lớp mô hình Monte Carlo tối ưu hóa tồn kho container dự phòng cho sửa chữa. Khung mô hình cho phép liên kết chặt chẽ giữa quyết định thiết kế mặt bằng, chiến lược vận hành động và chính sách tồn kho dự phòng trong một kiến trúc thống nhất.

Kết quả tính toán và mô phỏng trên bộ dữ liệu giả định được hiệu chỉnh theo các tham số điển hình cho thấy việc áp dụng bài toán Ek giúp giảm đáng kể tỷ lệ diện tích trống trên mặt bằng và rút ngắn quãng đường di chuyển giữa các khu chức năng, trong khi quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng DES cải thiện các chỉ tiêu vận hành như thời gian quay vòng container và mức sử dụng thiết bị so với phương án bố trí và điều phối truyền thống. Bên cạnh đó, mô hình Monte Carlo hỗ trợ xác định mức tồn kho container dự phòng hợp lý, cân bằng giữa chi phí duy trì tồn kho và rủi ro thiếu container khai thác trong điều kiện nhu cầu sửa chữa biến động ngẫu nhiên.

Về ý nghĩa khoa học, nghiên cứu góp phần hoàn thiện cơ sở lý thuyết về tích hợp các mô hình tối ưu hóa rời rạc, mô phỏng sự kiện rời rạc và mô hình ngẫu

nhien trong bối cảnh quản lý container tại tổ hợp cảng. Bài toán Ek được mở rộng để bao hàm các ràng buộc thực tiễn về khoảng cách an toàn, vùng phục vụ của thiết bị và mạng đường nội bộ; mô hình DES được sử dụng như một công cụ đánh giá nghiệm trong quy trình tối ưu hóa dựa trên mô phỏng; trong khi mô hình Monte Carlo cho phép lượng hóa rủi ro và chi phí liên quan đến tồn kho container dự phòng.

Về ý nghĩa thực tiễn, khung mô hình đề xuất có thể được sử dụng như một công cụ tham chiếu hỗ trợ các nhà quản lý cảng trong việc đánh giá, so sánh các phương án quy hoạch mặt bằng, tổ chức luồng container và chính sách dự phòng sửa chữa trước khi triển khai trong thực tế. Thông qua việc thử nghiệm nhiều kịch bản về nhu cầu, năng lực thiết bị và mức độ hư hỏng container, người vận hành có thể lựa chọn các phương án phù hợp với điều kiện hạ tầng và mục tiêu khai thác cụ thể.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế. Thứ nhất, bộ dữ liệu sử dụng chủ yếu mang tính giả định và được hiệu chỉnh theo các tham số điển hình, chưa dựa trên số liệu vận hành chi tiết của một tổ hợp cảng cụ thể, do đó các con số cải thiện chỉ mang tính minh họa và cần được kiểm chứng thêm. Thứ hai, một số giả định về phân bố thời gian đến tàu, luồng container và thời gian sửa chữa được đơn giản hóa nhằm đảm bảo khả năng tính toán, chưa phản ánh đầy đủ các yếu tố bất thường như sự cố thiết bị, thay đổi lịch trình tàu và gián đoạn chuỗi cung ứng.

Trong nghiên cứu tiếp theo, tác giả dự kiến phát triển mô hình xác định số lượng đầu xe vận tải tối thiểu dựa trên các tham số lộ trình, khu vực và số chuyến, nhằm bổ sung thêm một lớp hỗ trợ quyết định về phương tiện vận tải đường bộ. Đồng thời tác giả cần thu thập và hiệu chỉnh mô hình trên dữ liệu thực tế từ một hoặc vài tổ hợp cảng container tại Việt Nam để đánh giá độ tin cậy và khả năng ứng dụng của khung Ek – DES – Monte Carlo trong điều kiện vận hành cụ thể. Bên cạnh đó, có thể mở rộng khung mô hình theo hướng tối ưu đa mục tiêu kết hợp đồng thời chi phí, thời gian và yếu tố môi trường, tích hợp các thuật toán trí tuệ nhân tạo để tự động hiệu chỉnh tham số trong mô hình DES, cũng

như mở rộng mô hình Monte Carlo cho nhiều loại container và chính sách bảo trì khác nhau.

Tổng thể, nghiên cứu đã cung cấp các khuôn khổ mô hình và giải thuật gắn chặt với thực tiễn điều hành container đa cấp trong tổ hợp cảng. Đây là nền tảng lý thuyết quan trọng để triển khai hệ thống quản lý và tự động hóa hiện đại, đáp ứng các yêu cầu tối ưu hóa nguồn lực, chi phí và mặt bằng trong phát triển logistics cũng như hạ tầng cảng Việt Nam.

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

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 không được cung cấp theo yêu cầu.

1st Dang Thi Bich Hoai*. *University of Transport Ho Chi Minh City.*

*Corresponding author: hoai.dang@ut.edu.vn

Tài liệu tham khảo

- [1] TanCang-STC, *Quản lý và khai thác cảng container*, Tài liệu giảng dạy nội bộ, 2020.
- [2] N. T. T. Hương, "Xây dựng mô hình đánh giá hiệu quả hệ thống logistics tích hợp theo cách tiếp cận mạng trung tâm," *Tạp chí Kinh tế Tài chính*, 2023.
- [3] В. В. Дыбская, *Логистика складирования для практиков*. Москва: Альфа-Пресс, 2005, pp. 201.
- [4] Ж.-Ж. Ламбен, *Менеджмент, ориентированный на рынок*. Санкт-Петербург: Питер, 2004, pp. 800.
- [5] Л. Г. Дымова, "Методика построения гипернечетких функций желательности с учетом мнений группы экспертов при решении задач оценки и оптимизации качества методами теории нечетких множеств," *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Технические науки*, no. 15, pp. 24–28, 2002.
- [6] Đ. P. Hồ, *Quản trị kinh doanh và quản lý kinh tế: Phương pháp định lượng trong nghiên cứu*. Hà Nội, Việt Nam: NXB Tài chính, 2020, p. 547.
- [7] J. Sharma, *Operations Research: Theory and Applications*. 4th ed. Delhi, India: Macmillan India Ltd., 2009. accessed: Nov. 1, 2025. [Online]. Available: <https://fr.scribd.com/document/362707778/337748610-Operations-Research-JK-Sharma-pdf>.
- [8] B. Gillett, *Introduction to Operations Research: A Computer-Oriented Algorithmic Approach*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1979. P.617
- [9] R. Yang, Y. Li, B. Zhang, and R. Yang, "Location-allocation problem in the emergency logistics system considering lateral transshipment strategy," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 187, Jan. 2024, Art. no. 109771, doi:10.1016/j.cie.2023.109771.
- [10] G. Sharma, *Implementation and Analysis of DES Algorithm*. Germany: Lambert Academic Publishing, 2014, p. 76.
- [11] S. K. Mishra, "Global Optimization by Particle Swarm Method: A Fortran Program," *SSRN Electronic Journal*, 2006, doi:10.2139/ssrn.921504
- [12] N. V. Mậu, *Tổ hợp và các dạng toán rời rạc liên quan*. Hà Nội, Việt Nam: NXB Đại học Quốc gia Hà Nội, 2017.
- [13] S. Raychaudhuri, "Introduction to Monte Carlo simulations," in *Proc. 2008 Winter Simulation Conf.*, Miami, FL, USA, pp.91-100, 2008.
- [14] J. E. Gentle, *Random Number Generation and Monte Carlo Methods*, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2003.