

Tối ưu hóa điều độ và tái điều độ cho cầu bãi trong môi trường bất định bằng giải thuật meta-heuristic

Nguyễn Vũ Anh Duy*

Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, TP Hồ Chí Minh, Việt Nam

*nvduy@ntt.edu.vn

Tóm tắt

Cảng container là cơ sở quan trọng trong vận chuyển container toàn cầu. Cầu bãi là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến thông lượng hoạt động của cảng. Tuy nhiên, nhiều tình huống không chắc chắn trong hoạt động của chúng có thể gây ra sự chậm trễ tổng thể cho quy trình làm việc. Nghiên cứu này đề cập đến việc điều độ và tái điều độ cầu bãi trong trường hợp cần cầu bị hỏng ngẫu nhiên. Trình tự công việc cho tất cả các cần cầu được xác định bằng thuật toán meta-heuristic với mục tiêu tối thiểu makespan, thời gian hoàn thành công việc cuối cùng. Trong quá trình vận hành cần trục, nếu một số cần trục bị hỏng, một quy trình được áp dụng để tái điều độ cần cầu nhằm giảm thiểu sự chậm trễ của tất cả các công việc. Thuật toán meta-heuristic, một nhánh của trí tuệ nhân tạo, được phát triển để giải quyết các vấn đề tối ưu với kích thước bài toán thực trong thời gian tính toán hợp lý. Các thực nghiệm số được sử dụng để xác minh hiệu suất của thuật toán.

Nhận 16/06/2025

Được duyệt 25/07/2025

Công bố 30/10/2025

Từ khóa

điều độ, tái điều độ, meta-heuristics, tối ưu hóa, cầu bãi

© 2025 Journal of Science and Technology - NTTU

1. Đặt vấn đề

Vận tải container đóng một vai trò không thể thiếu trong dòng chảy thương mại toàn cầu, và các cảng container, với tư cách là những trung tâm điều phối quan trọng, giữ vị trí huyết mạch trong chuỗi cung ứng quốc tế. Hiệu quả hoạt động của các cảng này, đặc biệt là trong khâu xử lý container tại bãi, có ảnh hưởng sâu rộng đến chi phí logistics, thời gian vận chuyển hàng hóa và năng lực cạnh tranh tổng thể của các nền kinh tế. Trong bối cảnh đó, việc điều độ và tái điều độ cho cầu bãi (Yard Cranes - YCs) nổi lên như một bài toán tối ưu hóa then chốt. Tuy nhiên, môi trường vận hành cảng container vốn dĩ rất năng động và chứa đựng vô số yếu tố bất định, từ hỏng hóc thiết bị đột ngột, sự thay đổi trong lịch trình của tàu và xe tải, cho đến thời gian xử lý container không đồng đều. Những yếu tố này không chỉ làm phức tạp hóa việc xây dựng một lịch trình tối ưu ban đầu mà còn có thể khiến các kế hoạch đã định sẵn nhanh chóng trở nên không còn khả thi, đòi hỏi phải có các cơ chế tái điều độ linh hoạt và hiệu quả.

Sự kém hiệu quả trong việc điều độ YC không chỉ đơn thuần làm tăng chi phí vận hành trực tiếp tại cảng, như chi phí nhiên liệu, nhân công và bảo trì thiết bị. Quan trọng hơn, nó còn gây ra những chi phí gián tiếp đáng kể cho toàn bộ chuỗi cung ứng. Chẳng hạn, thời gian xử lý container tại bãi kéo dài dẫn đến việc tàu phải neo đậu chờ đợi lâu hơn tại cảng, đồng thời gây ra tình

trạng tắc nghẽn cho các phương tiện vận tải đường bộ đến nhận hoặc giao container. Điều này không chỉ làm tăng chi phí lưu tàu và lưu xe mà còn phá vỡ lịch trình vận chuyển đã được hoạch định cẩn thận, kéo theo những ảnh hưởng tiêu cực đến các khâu tiếp theo trong chuỗi cung ứng, từ việc các nhà sản xuất không nhận được nguyên liệu đúng hạn cho đến việc hàng hóa không đến tay người tiêu dùng theo kế hoạch. Hậu quả cuối cùng là thiệt hại về kinh tế, mất mát doanh thu và suy giảm uy tín của các bên liên quan trong chuỗi cung ứng.

Hoạt động hiệu quả của YC là nền tảng cho năng suất của một cảng container hiện đại. Việc hiểu rõ vai trò, các loại YC và đặc biệt là các yếu tố bất định ảnh hưởng đến hoạt động của chúng là bước đầu tiên và quan trọng nhất trong nỗ lực tối ưu hóa. YCs đóng vai trò trung tâm trong việc quản lý và di chuyển container trong phạm vi bãi của cảng container. Chúng thực hiện các nhiệm vụ thiết yếu bao gồm xếp dỡ container từ các phương tiện vận tải nội bộ (như xe đầu kéo) lên các chồng container trong bãi lưu trữ, hoặc ngược lại, lấy container từ bãi để đưa lên xe tải hoặc tàu hỏa phục vụ cho việc vận chuyển ra khỏi cảng. YC là cầu nối quan trọng giữa hoạt động xếp dỡ tàu tại cầu tàu (thực hiện bởi cầu bờ - Quay Cranes) và mạng lưới vận tải nội địa, đảm bảo dòng chảy container được liên tục và hiệu quả. Có nhiều loại YC khác nhau, mỗi loại có những đặc điểm và ứng dụng

riêng biệt, phù hợp với các điều kiện vận hành và quy mô cảng khác nhau: cầu giàn bánh lốp (Rubber Tyred Gantry Crane - RTGC): đây là loại YC phổ biến nhất, được sử dụng rộng rãi tại các cảng container trên toàn thế giới. RTGC di chuyển trên các bánh lốp cao su, cho phép chúng có khả năng cơ động cao trong việc di chuyển giữa các dãy container (block) và các làn đường khác nhau trong bãi. Nguồn năng lượng chính của RTGC truyền thống là động cơ diesel, tuy nhiên, ngày càng có nhiều cảng chuyển sang sử dụng RTGC chạy điện (E-RTGC) hoặc RTGC lai (hybrid) để giảm phát thải và chi phí nhiên liệu. Ưu điểm của RTGC là tính linh hoạt cao và chi phí đầu tư cơ sở hạ tầng ban đầu thấp hơn so với RMGC. Tuy nhiên, chúng thường đòi hỏi không gian di chuyển rộng hơn và chi phí bảo trì có thể cao hơn.

Cầu giàn bánh sắt (Rail Mounted Gantry Crane - RMGC): RMGC di chuyển trên hệ thống ray cố định được lắp đặt dọc theo các block container. Chúng thường được cấp nguồn bằng điện lưới, giúp loại bỏ khí thải tại chỗ và giảm tiếng ồn so với RTGC chạy diesel. RMGC thường có khả năng tự động hóa cao hơn, cho phép xếp chồng container với mật độ cao hơn và tốc độ di chuyển giàn nhanh hơn khi có tải. Loại cầu này đặc biệt hiệu quả cho các cảng có quy mô lớn, luồng hàng ổn định và yêu cầu cao về mật độ lưu trữ và tự động hóa, cũng như các cảng cạn (intermodal terminals) nơi container được chuyển trực tiếp giữa tàu hỏa và xe tải. Nhược điểm chính của RMGC là chi phí đầu tư ban đầu cao cho cả cầu và hệ thống ray, cùng với tính linh hoạt kém hơn RTGC do bị giới hạn trên đường ray.

Vấn đề tái điều độ nhiều tác giả đã nghiên cứu điển hình như nghiên cứu [1]. Bài báo này đề xuất một phương pháp để sắp xếp lại kế hoạch cho bến đỗ và cần trục bốc dỡ tại các cảng container nhằm đối phó với sự thay đổi thường xuyên trong thời gian cập cảng của tàu thuyền. Các nhà nghiên cứu đã xây dựng một mô hình Lập trình nguyên tuyến tính hỗn hợp (Mixed-Integer Linear Programming - MILP) để giải quyết đồng thời bài toán phân bổ bến đỗ và cần trục (Berth Allocation and Crane Assignment Problem - BACAP). Với nghiên cứu [2], tác giả giải quyết vấn đề lập lịch cho cầu trục bãi tại các cảng container, vốn bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố không chắc chắn như thời gian xe tải đến và khối lượng công việc của cầu trục. Các tác giả đề xuất một phương pháp chủ động (proactive strategy) bằng cách xây dựng mô hình lập trình ngẫu nhiên nhằm tạo ra một lịch trình cố định duy nhất, có khả năng thích ứng tốt với nhiều tình huống khác nhau

mà không cần phải điều chỉnh lại. Mục tiêu của mô hình là tối thiểu hóa giá trị kỳ vọng của tổng thời gian hoàn thành công việc và tổng thời gian chờ của các tác vụ. Để giải quyết bài toán, một thuật toán di truyền tùy chỉnh (tailored genetic algorithm) đã được phát triển. Kết quả thực nghiệm cho thấy việc phân bổ khối lượng công việc một cách cân bằng giữa các cầu trục giúp cải thiện hiệu quả vận hành chung của cảng. Bài báo [3] nghiên cứu vấn đề tối ưu hóa việc sắp xếp lại lịch trình cho YC khi xảy ra các sự cố ngẫu nhiên và không thể đoán trước tại khu vực container nhập của cảng. Để giải quyết vấn đề này, các tác giả đã xây dựng một mô hình sắp xếp lại lịch trình cho YC với mục tiêu là tạo ra một kế hoạch mới có độ sai lệch ít nhất so với lịch trình ban đầu. Bài báo [4] lại có hướng tiếp cận khác, khi nghiên cứu cho cảng có hình chữ U. Bài báo này giải quyết vấn đề lập lịch trình tích hợp cho nhiều loại thiết bị (cầu trục bến, xe vận chuyển nội bộ, và YC) tại các cảng container có bố trí hình chữ U và áp dụng chế độ vận hành chu trình kép (double-cycling). Thách thức chính là sự không chắc chắn trong thời gian vận hành của thiết bị, có thể gây ra hiệu ứng dây chuyền (cascade effects) làm cho lịch trình ban đầu trở nên kém hiệu quả. Để giải quyết vấn đề này, các tác giả đề xuất một phương pháp lập lịch chủ động (robust-proactive) mới. Họ xây dựng một mô hình tối ưu hóa hai mục tiêu: vừa giảm thiểu tổng thời gian hoàn thành công việc vừa tối đa hóa tính ổn định của lịch trình. Một chỉ số dựa trên cấu trúc mạng phức hợp bất định (complex network structure entropy) được dùng để đánh giá mức độ ổn định và loại bỏ hiệu ứng dây chuyền. Chỉ số này định lượng chất lượng của các "khoảng thời gian trống" (gap time slots) giữa các hoạt động, vốn được xem là bộ đệm để hấp thụ sự bất định. Mô hình được giải quyết bằng thuật toán di truyền sắp xếp không thông trị NSGA-II. Kế tiếp một nghiên cứu về vấn đề tái điều độ cầu bờ, [5]. Bài báo này nghiên cứu vấn đề sắp xếp lại lịch trình tích hợp cho việc phân bổ bến đỗ và cần trục bốc dỡ khi đối mặt với các sự kiện không chắc chắn như tàu bị trễ và tàu đột xuất không có trong kế hoạch cập cảng. Những sự kiện này có thể làm gián đoạn kế hoạch ban đầu, gây lãng phí tài nguyên và làm giảm hiệu quả hoạt động của cảng. Các thử nghiệm số cho thấy thuật toán IGA được đề xuất có tốc độ giải quyết nhanh hơn đáng kể so với các bộ giải thương mại và các thuật toán heuristic khác (như SA, PSO), với độ lệch trung bình về chất lượng giải pháp không vượt quá 6 %.

Tầm quan trọng của YC trong chuỗi logistics tổng thể là không thể phủ nhận. Hiệu suất làm việc của chúng ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian quay vòng của tàu. Việc điều phối YC hiệu quả giúp giảm thiểu thời gian chờ đợi của tàu và xe tải, tối ưu hóa việc sử dụng không gian bãi quý giá, và đảm bảo sự kết nối thông suốt giữa các phương thức vận tải khác nhau, từ đó nâng cao năng lực cạnh tranh của cảng.

Đối tượng nghiên cứu của bài báo là bài toán điều độ và tái điều độ YC dưới tác động của các yếu tố không chắc chắn. Nghiên cứu tập trung vào việc xử lý hai loại bất định chính: khả năng xảy ra hỏng hóc cầu đột xuất và sự thay đổi về thời gian đến của các tác vụ so với dự kiến.

Dưới đây sẽ đề cập đến việc mô tả bài toán chi tiết cùng với mô hình toán. Tiếp theo sẽ là giải thuật được đề xuất để giải quyết vấn đề. Sau đó là thực nghiệm số để chứng minh tính hiệu quả của bài toán. Phần cuối cùng là kết luận của nghiên cứu.

2. Mô hình bài toán

Mô hình bài toán được thiết lập để tái điều độ lịch trình làm việc của YC trong bãi container khi có yếu tố bất định xảy ra. Dưới đây là chú thích các ký hiệu được dùng trong mô hình toán.

I	Tập hợp các công việc chưa hoàn thành
K	Tập hợp các cầu có thể hoạt động
p_i	Thời gian xử lý công việc i
t_{ij}	Thời gian cầu di chuyển từ vị trí công việc i tới vị trí công việc j
r_k	Thời gian sẵn sàng làm việc của cần cầu k
a_i	Thời gian công việc i đến
M	Số dương đủ lớn

Biến quyết định

X_{ik}	Biến nhị phân, có giá trị 1 khi container i được gán cho cần cầu k
Y_{ijk}	Biến nhị phân, có giá trị 1 khi công việc i được tiến hành ngay trước công việc j bởi cầu k
S_i	Biến liên tục, thể hiện thời gian bắt đầu công việc i

C_{max} Thời gian hoàn thành công việc cuối cùng

Mô hình toán

Hàm mục tiêu

$$\text{Min} C_{max} \quad (1)$$

Ràng buộc

$$\sum_{k \in K} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$2Y_{\{ijk\}} \leq X_{ik} + X_{jk} \quad \forall i, j \in I, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in I, j \neq i} Y_{jik} \leq X_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in I, j \neq i} Y_{ijk} \leq X_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (5)$$

$$S_i \geq a_i \quad \forall i \in I \quad (6)$$

$$S_i \geq r_k - M(1 - X_{ik}) \quad \forall i \in I, k \in K \quad (7)$$

$$S_j \geq S_i + p_i + t_{ij} - M(1 - Y_{ijk}) \quad \forall i, j \in I, i \neq j, k \in K \quad (8)$$

$$C_{\{max\}} \geq S_i + p_i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

Mô hình toán học này được thiết kế để tìm ra một lịch trình làm việc tối ưu cho các cần cầu, với mục tiêu chính là hoàn thành tất cả các công việc được giao trong khoảng thời gian ngắn nhất có thể, được biểu thị bằng việc tối thiểu hóa thời gian hoàn thành tổng thể. Để làm được điều này, mô hình đảm bảo rằng mỗi công việc phải được phân công cho duy nhất một cần cầu, đồng thời xác định một cách chặt chẽ trình tự thực hiện công việc cho mỗi cần cầu để tạo thành một chuỗi hợp lệ và liên mạch. Bên cạnh đó, mô hình tuân thủ các ràng buộc thực tế về thời gian: một công việc không thể bắt đầu trước khi cả cần cầu và xe container tương ứng sẵn sàng, và phải đợi cho công việc trước đó trong chuỗi hoàn thành, có tính đến cả thời gian xử lý và thời gian di chuyển giữa các vị trí. Cuối cùng, thời gian hoàn thành tổng thể được xác định bởi thời điểm công việc cuối cùng trong toàn bộ lịch trình kết thúc.

Yếu tố bất định mà bài toán đặt ra đó là thời điểm mà cần trục k sẵn sàng để nhận công việc mới. Đối với cần trục không bị lỗi, đây là thời điểm nó hoàn thành công việc cuối cùng trước sự cố. Đối với cần trục bị lỗi, đây là thời điểm sửa chữa hoàn tất, nếu thời gian sửa chữa là vô cùng có nghĩa là cầu đó không thể tiếp tục làm việc trong ca làm việc này. Ngoài ra yếu tố bất định còn nằm ở thời điểm xe container của công việc i đến nơi.

3. Giải thuật Simulated Annealing lai với Local Search

Đây là một phiên bản cải tiến của giải thuật Simulated Annealing (SA). Nó kết hợp sức mạnh khám phá của SA truyền thống, với khả năng quay lui để tránh tối ưu cục bộ, với một chiến lược Local Search (LS) mạnh

mẽ trong việc tìm kiếm tại mỗi bước. Mục tiêu cuối cùng vẫn là tìm ra lịch trình có thời gian hoàn thành tổng thể (makespan) thấp nhất. Hình 1 thể hiện lưu đồ giải thuật. Trong phần này, các mô tả về giải thuật sẽ được trình bày chi tiết.

Biểu diễn lời giải: lời giải của bài toán thể hiện một lịch trình cụ thể, trong đó các công việc được sắp xếp và phân bổ cho từng cần trục.

Các tham số của giải thuật bao gồm: nhiệt độ ban đầu, được đặt ở giá trị cao để thuật toán có thể dễ dàng chấp nhận các tìm kiếm không tốt nhằm khám phá rộng rãi không gian lời giải; tỷ lệ làm nguội, thể hiện tốc độ giảm nhiệt độ sau mỗi vòng lặp ngoài (ví dụ: 0,995); nhiệt độ tối thiểu, là giá trị giới hạn mà tại đó thuật toán dừng lại; và số lượng lân cận, biểu thị số lời giải lân cận ngẫu nhiên được tạo ra và so sánh trong mỗi vòng lặp trong.

Quá trình của giải thuật SA lai với LS gồm hai vòng lặp chính. Vòng lặp ngoài chịu trách nhiệm điều chỉnh nhiệt độ theo cơ chế làm nguội, bắt đầu từ nhiệt độ cao và giảm dần sau mỗi lần lặp. Khi nhiệt độ ở mức cao, thuật toán dễ dàng chấp nhận các bước đi không tốt; ngược lại, khi nhiệt độ giảm, chỉ những cải tiến mới được chấp nhận. Vòng lặp trong tập trung vào việc tìm kiếm lân cận. Tại mỗi lần lặp, thuật toán tạo ra các lời giải lân cận ngẫu nhiên bằng cách thay đổi vị trí các công việc và chọn lời giải tốt nhất trong số đó. Kết quả là một ứng viên chất lượng cao được chọn để tiến hành bước tiếp theo.

Thuật quay lui (Cơ chế Chấp nhận của SA): sau khi vòng lặp trong tìm được lời giải lân cận tốt nhất, thuật toán sẽ quyết định có nên di chuyển đến lời giải này hay không. Đây chính là "thuật quay lui": Nếu lân cận tốt hơn: lời giải mới luôn được chấp nhận. Nếu lân cận tệ hơn: lời giải mới vẫn có thể được chấp nhận với một xác suất nhất định, được tính bằng công thức:

$$p = e^{-\Delta E/T}$$

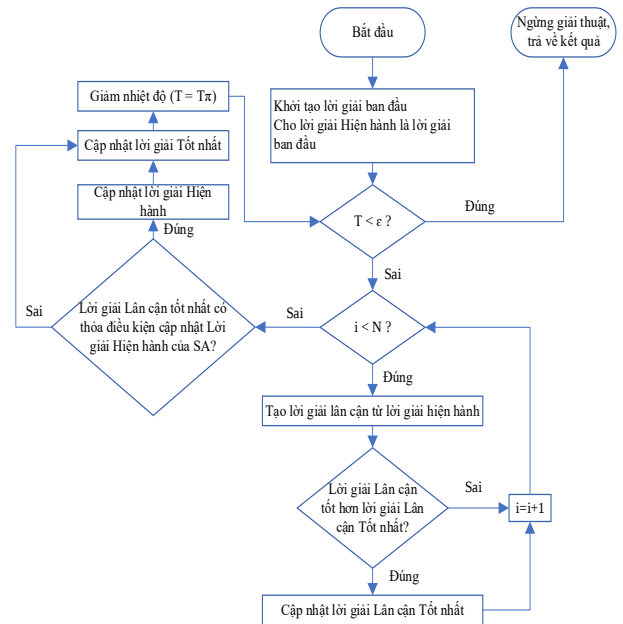
Trong đó:

ΔE là độ chênh lệch makespan (luôn dương).

T là nhiệt độ hiện tại của vòng lặp ngoài.

Khi T cao, xác suất p lớn, thuật toán dễ dàng chấp nhận các bước đi xấu để thoát khỏi tối ưu cục bộ.

Khi T thấp, xác suất p rất nhỏ, thuật toán gần như chỉ chấp nhận các bước đi tốt hơn.



Hình 1. Lưu đồ thuật toán

4. Thử nghiệm số

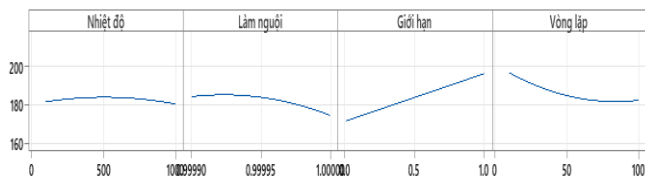
Đầu tiên trong phần thử nghiệm số này, các tham số của giải thuật sẽ được xác định thông qua phương pháp quy hoạch thực nghiệm. Bảng 1 thể hiện 49 lần chạy giải thuật với các tham số thay đổi giữa hai mức cao và thấp, có xét đến giá trị trung bình của tham số. Các giá trị cao và thấp được sử dụng trong phần nghiên cứu này dựa trên thời gian tính toán có thể chấp nhận được đối với giải thuật. Giải thuật được tiến hành với bài toán có kích thước tương đương với thực tế, với 50 công việc và 20 YC làm việc, thời gian tính toán lâu nhất khi thay đổi các tham số là 1230 giây trên máy tính xách tay, CPU core i7, 10750H, ram 32Gb, hệ điều hành Window 11 với ngôn ngữ lập trình Java 8 với IDE là Eclipse.

Bảng 1. Makespan của lời giải khi các tham số giải thuật thay đổi

STT	Nhiệt độ	Làm nguội	Giới hạn	Vòng lặp	Makespan	STT	Nhiệt độ	Làm nguội	Giới hạn	Vòng lặp	Makespan
1	1000	0,999999	1,000	10	202	26	1000	0,999999	1,000	100	181
2	100	0,999900	1,000	100	187	27	1000	0,999900	0,010	10	179
3	1000	0,999999	0,010	100	161	28	100	0,999999	0,010	10	166
4	1000	0,999999	0,010	10	164	29	100	0,999900	1,000	10	212
5	100	0,999999	0,010	100	166	30	1000	0,999900	1,000	100	184
6	1000	0,999900	0,010	100	169	31	1000	0,999900	1,000	10	212
7	550	0,999950	0,505	55	185	32	100	0,999900	0,010	100	170
8	550	0,999950	0,505	55	187	33	100	0,999999	1,000	100	180
9	100	0,999900	1,000	10	214	34	550	0,999950	0,505	55	184

10	550	0,999950	0,505	55	184	35	1000	0,999999	0,010	10	165
11	1000	0,999900	1,000	100	187	36	550	0,999950	0,505	55	183
12	1000	0,999999	1,000	100	182	37	1000	0,999999	0,010	100	162
13	100	0,999999	0,010	10	164	38	550	0,999950	0,505	55	186
14	100	0,999999	1,000	100	182	39	550	0,999950	0,010	55	175
15	1000	0,999900	1,000	10	207	40	550	0,999999	0,505	55	179
16	100	0,999900	0,010	10	183	41	550	0,999950	0,505	55	186
17	1000	0,999900	0,010	10	180	42	550	0,999950	0,505	10	199
18	100	0,999999	1,000	10	201	43	550	0,999950	0,505	55	183
19	100	0,999900	0,010	100	176	44	100	0,999950	0,505	55	182
20	100	0,999900	0,010	10	181	45	550	0,999900	0,505	55	180
21	100	0,999999	0,010	100	162	46	550	0,999950	0,505	55	185
22	1000	0,999999	1,000	10	203	47	550	0,999950	0,505	100	180
23	1000	0,999900	0,010	100	173	48	1000	0,999950	0,505	55	180
24	100	0,999900	1,000	100	187	49	550	0,999950	1,000	55	191
25	100	0,999999	1,000	10	198						

Kết quả tối ưu của bộ tham số giải thuật là: nhiệt độ ban đầu 1000, tốc độ làm nguội 0,999999, giới hạn nhiệt độ dừng là 0,01 và vòng lặp là 60. Hình 2 thể hiện sự ảnh hưởng của các nhân tố chính khi tiến hành thực nghiệm đối với giá trị hàm mục tiêu của giải thuật.



Hình 2. Đồ thị các nhân tố chính trong bài toán quy hoạch thực nghiệm.

Một số bài toán với các kích thước khác nhau được đưa ra để thử nghiệm giải thuật. Mỗi vấn đề giải thuật tiến hành tính toán để kiểm tra độ phân tán. Kết quả giải thuật vận hành ổn định, sai số giữa các lần tính toán nhỏ (dưới 3 %), Bảng 2 thể hiện các lần tính toán của giải thuật với các bài toán có kích thước khác nhau. Thời gian tính toán dài nhất khoảng 40 phút, nhưng điều này là có thể chấp nhận được cho việc điều độ cho cả một ca làm việc dài. Đối với các trường hợp tái điều độ, do số lượng công việc và số YC cần tái điều độ sẽ không quá nhiều, khi đó thời gian tính toán giảm đi đáng kể.

Bảng 2. Chạy thử nghiệm giải thuật

Số STT công việc	Số cầu	Makespan	Độ lệch chuẩn	Thời gian tính toán (s)	
1	200	30	215,30	1,42	2214
2	200	20	308,17	1,19	1777

3	200	10	592,67	4,30	1409
4	200	5	1156,93	7,10	841
5	150	30	166,64	1,03	1965
6	150	20	233,13	1,92	1472
7	150	10	450,13	3,58	1182
8	100	30	126,00	0,00	1673
9	100	20	161,20	1,32	1342
10	100	10	294,40	3,11	924
11	100	5	563,60	4,81	575
12	50	10	175,27	0,96	568
13	50	5	319,27	1,62	446
14	30	5	193,40	1,06	405
15	20	5	145,60	0,91	383

5. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu về việc điều độ và tái điều độ cho YC trong cảng container trong các điều kiện bất định. Trong bài báo này, mô hình toán đã được đề xuất, qua đó, yếu tố bất định được thể hiện thông qua thời gian sẵn sàng hoạt động của cầu, nếu thời gian sẵn sàng là vô cùng đồng nghĩa với cầu bị hỏng hóc không thể phục hồi trong ca làm việc. Để tìm kiếm lời giải cho bài toán, thuật toán SA lai với LS đã được đề xuất. qua phần thực nghiệm số, các tham số của giải thuật đã được tìm ra, cụ thể: nhiệt độ ban đầu 1000, tốc độ làm nguội 0,999999, giới hạn nhiệt độ dừng là 0,01 và vòng lặp là 60. Ngoài ra, một số vấn đề với kích thước khác nhau đã được giải với giải thuật, kết quả cho thấy giải thuật dựa trên nền tảng của việc tạo lời giải ngẫu nhiên nhưng kết quả sau nhiều lần tính



toán vẫn ổn định, và thời gian tính toán nằm trong giới hạn cho phép.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Nguyễn Tất Thành, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam.

Tài liệu tham khảo

1. Kim, A., Park, H.-J., Park, J.-H., & Cho, S.-W. (2021). Rescheduling strategy for berth planning in container terminals: An empirical study from Korea. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(5), 527.
2. Liu, W., Zhu, X., Wang, L., Yan, B., & Zhang, X. (2021). Optimization approach for yard crane scheduling problem with uncertain parameters in container terminals. *Journal of Advanced Transportation*, 2021(1), 5537114.
3. Yao, L., Zheng, H., Liu, Y., Li, D., & Zhao, Y. (2023). Yard crane rescheduling under the influence of random fault. *Machines*, 11(6), 580.
4. Cai, L., Li, W., Zhou, B., Li, H., & Yang, Z. (2024). Robust multi-equipment scheduling for U-shaped container terminals concerning double-cycling mode and uncertain operation time with cascade effects. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 158, 104447.
5. Zheng, H., Wang, Z., & Liu, H. (2023). The integrated rescheduling problem of berth allocation and quay crane assignment with uncertainty. *Processes*, 11(2), 522.

Optimizing yard crane scheduling and rescheduling under uncertainty using a meta-heuristic framework

Nguyen Vu Anh Duy*

Nguyen Tat Thanh University, Ho Chi Minh City, Vietnam

*nvduy@ntt.edu.vn

Abstract Container terminals are important facilities in global container transportation. Yard cranes are key factors influencing the throughput of port operations. However, many uncertain scenarios in their operation can cause delays to the overall workflow. This study addresses the scheduling and rescheduling of yard cranes in cases of random crane breakdowns. The job sequences for all cranes is determined using a meta-heuristic algorithm to minimize makespan. During crane operations, if some cranes break down, a procedure is applied to reschedule the cranes in order to minimize the delay of all jobs. The meta-heuristic algorithm, as a branch of artificial intelligence, is developed to solve realistic-scale optimization problem within a reasonable computation time. Numerical experiments are conducted to verify the algorithm's performance.

Keywords scheduling, rescheduling, meta-heuristics, optimization, yard cranes

