



**TỐI ƯU HÓA GIAO HÀNG CHẶNG CUỐI CHO BÀI TOÁN MD-HF-TDVRPTW
BẰNG THUẬT TOÁN IALNS-SA: THỰC NGHIỆM TẠI VIỆT NAM
LAST-MILE DELIVERY OPTIMIZATION FOR THE MD-HF-TDVRPTW
USING IALNS-SA: EXPERIMENTS IN VIETNAM**

Nguyễn Việt Thành*, Ngô Trường Minh Triết

Viện Công nghệ Thông minh và Tương tác, Trường Công nghệ và Thiết kế, Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh.

*thanhv.or@gmail.com

Ngày nhận bài:

19/4/2026

Ngày chấp nhận đăng:

20/9/2026

Keywords: adaptive large neighborhood search algorithm, last-mile delivery, simulated annealing algorithm, vehicle routing problem.

ABSTRACT

This study addresses urban last mile delivery, where routing decisions must simultaneously account for multiple depots, heterogeneous vehicle fleets, time dependent travel times, and customer time windows. The study formulates the Multi Depot, Heterogeneous Fleet, Time Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows (MD-HF-TDVRPTW) and develops an Improved Adaptive Large Neighborhood Search combined with Simulated Annealing (IALNS-SA). The solver extends existing ALNS and SA frameworks through an enlarged set of time aware destroy operators, a dual evaluation scheme that searches on soft penalties but certifies the incumbent only under hard feasibility, per iteration stabilization of route duration limits and multi depot consistency, and a traffic aware alignment of depot departure times. On a Vietnamese dataset spanning four major cities with 200 customers and 100 vehicles, each solver was run ten times with different random seeds. IALNS-SA attains a mean total cost of 298.03 (standard deviation 50.62), a reduction of 38.8 to 60.9 percent relative to GRASP, HCLS, SA, and CWS, while activating only 12.6 vehicles on average. Wilcoxon signed rank tests with Holm correction confirm that this advantage is statistically significant ($p = 0.0078$), with IALNS-SA winning all ten paired comparisons against every baseline.

TÓM TẮT

Giao hàng chặng cuối trong đô thị ngày càng phức tạp do quyết định định tuyến phải đồng thời xét đến đa kho, đội xe dị chủng, thời gian di chuyển phụ thuộc thời điểm và cửa sổ thời gian phục vụ. Nghiên cứu xây dựng bài toán định tuyến phương tiện đa kho, đội xe dị chủng, phụ thuộc thời gian, có cửa sổ thời gian (MD-HF-TDVRPTW) và phát triển bộ giải IALNS-SA. So với các khung ALNS kết hợp SA hiện có, bộ giải mở rộng tập toán từ phá hủy nhận biết thời gian, bổ sung cơ chế đánh giá kép tìm kiếm trên hàm phạt mềm nhưng chỉ ghi nhận nghiệm tốt nhất khi khả thi cứng, ổn định hóa nghiệm trong từng vòng lặp đối với giới hạn thời lượng tuyến và tính nhất quán đa kho, đồng thời canh thời điểm xuất phát tại kho theo điều kiện giao thông. Trên bộ dữ liệu bốn đô thị lớn của Việt Nam với 200 khách hàng và 100 phương tiện, mỗi bộ giải được chạy độc lập 10 lần với các hạt giống ngẫu nhiên khác nhau. IALNS-SA đạt tổng chi phí trung bình 298.03 với độ lệch chuẩn 50.62, giảm từ 38.8 tới 60.9 phần trăm so với GRASP, HCLS, SA và CWS, đồng thời chỉ kích hoạt trung bình 12.6 phương

Từ khóa: Thuật toán tìm kiếm lân cận lớn thích nghi, giao hàng chặng cuối, giải thuật

luyện kim mô phỏng, tiện. Kiểm định hạng có dấu Wilcoxon với hiệu chỉnh Holm xác nhận ưu thế này định tuyến phương có ý nghĩa thống kê ($p = 0.0078$), với 10 trên 10 cặp so sánh đều nghiêng về tiện. IALNS-SA.

1. Giới thiệu

Giao hàng chặng cuối (LMD) là công đoạn cuối cùng của quá trình phân phối và là khâu phức tạp bậc nhất của logistics đô thị, do đồng thời chịu tác động của mật độ đơn hàng, yêu cầu giao đúng hẹn, hạ tầng giao thông và áp lực sử dụng đội xe hiệu quả; phần lớn quyết định tối ưu trong LMD vì vậy quy về bài toán định tuyến phương tiện (VRP) (Boysen và cộng sự, 2021; Braekers và cộng sự, 2016).

Trong thực tế, bài toán thường mở rộng đồng thời theo bốn hướng: đa kho (MD), đội xe dị chủng (HF), thời gian di chuyển phụ thuộc thời điểm (TD) và cửa sổ thời gian (TW). Việc dùng ma trận thời gian cố định trong môi trường đô thị có thể đánh giá sai tính khả thi của tuyến (Ichoua và cộng sự, 2003), trong khi các tổng quan cho thấy văn liệu vẫn phát triển theo từng nhánh tương đối riêng biệt và số công trình xử lý đồng thời cả bốn thành phần còn hạn chế, đặc biệt tại các đô thị đang phát triển (Solomon, 1987; Koç và cộng sự, 2016; Braekers và cộng sự, 2016; Wang và cộng sự, 2024; Adamo và cộng sự, 2024).

Với các bài toán giàu ràng buộc như vậy, metaheuristic là hướng tiếp cận chủ đạo, trong đó ALNS được xem là khung hiệu quả nhờ cơ chế phối hợp nhiều toán tử phá hủy và sửa chữa với xác suất lựa chọn thích nghi (Ropke và Pisinger, 2006; Voigt, 2025). Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất bộ giải IALNS-SA cho MD-HF-TDVRPTW với ba đóng góp chính. Thứ nhất, xây dựng khung bài toán tích hợp đồng thời MD, HF, TD và TW cho giao hàng chặng cuối. Thứ hai, phát triển bộ giải IALNS-SA với các cơ chế thiết kế riêng cho lớp bài toán này, gồm tập toán tử phá hủy nhận biết thời gian có khai thác lịch sử tìm kiếm ở mức cấp, cơ chế đánh giá kép mềm cứng, các bước ổn định hóa nghiệm theo vòng lặp và cơ chế canh thời điểm xuất phát; khác biệt so với ALNS chuẩn (Ropke và Pisinger, 2006) và các khung IALNS gần đây được đối chiếu chi tiết trong Mục 3.2. Thứ ba, cung cấp bằng chứng thực nghiệm có kiểm định thống kê trên dữ liệu bốn đô thị lớn của Việt Nam, trong đó mỗi bộ giải được chạy độc lập 10 lần và ưu thế của phương pháp đề xuất được xác nhận bằng kiểm định phi tham số. Bài báo được tổ chức như sau: Mục 2 trình bày cơ sở lý thuyết; Mục 3 trình bày mô hình toán học và phương pháp; Mục 4 trình bày kết quả và thảo luận; cuối cùng là kết luận.

2. Cơ sở lý thuyết

2.1 Giao hàng chặng cuối và bài toán định tuyến phương tiện

Giao hàng chặng cuối bắt đầu khi hàng hóa đã đến một điểm xuất phát trong đô thị và kết thúc khi hàng được giao đến khách hàng cuối cùng; đây là giai đoạn hội tụ đồng thời yêu cầu về thời gian, tổ chức đội xe và hạ tầng, nên có mức phức tạp vận hành cao nhất trong chuỗi logistics đô thị (Boysen và cộng sự, 2021). Các quyết định cốt lõi xoay quanh phân bổ phương tiện, phân công khách hàng, thiết kế tuyến và lập lịch phục vụ, do đó phần lớn bài toán trong lĩnh vực này quy về khuôn khổ VRP, lớp bài toán tối ưu tổ hợp xác định tập tuyến chi phí thấp nhất phục vụ mỗi khách hàng đúng một lần dưới các ràng buộc vận hành (Braekers, Ramaekers, và Van Nieuwenhuyse, 2016). Trong các biến thể của VRP, bài toán có TW giữ vai trò đặc biệt quan trọng vì đưa trực tiếp yếu tố lịch trình vào mô hình và làm tăng đáng kể độ khó tính toán (Solomon, 1987).

2.2 Bài toán định tuyến phương tiện đa kho, đội xe dị chủng, phụ thuộc thời gian, có cửa sổ thời gian (MD-HF-TDVRPTW)

MD-HF-TDVRPTW là biến thể giàu ràng buộc của VRP, trong đó quyết định định tuyến phải đồng thời xác định depot phục vụ, loại phương tiện, thứ tự phục vụ và thời điểm di chuyển trên từng cung: MD phát sinh bài toán gán khách hàng cho depot trong mạng lưới phân tán; HF đòi hỏi xử lý khác biệt về tải trọng, dung tích, chi phí cố định và chi phí vận hành giữa các loại

xe; TD khiến thời gian hành trình thay đổi theo thời điểm khởi hành; TW buộc phục vụ trong các khoảng thời gian định trước (Koç và cộng sự, 2016; Ichoua và cộng sự, 2003; Solomon, 1987). Trong mạng lưới TD, bỏ qua biến động thời gian hành trình có thể làm sai lệch thời gian đến và phá vỡ tính khả thi của lời giải; Ichoua và cộng sự (2003) cho thấy mô hình phụ thuộc thời gian cải thiện đáng kể so với giả định cố định miễn bảo đảm tính chất vào trước ra trước, còn Wang và cộng sự (2024) khẳng định việc kết hợp đồng thời MD, TD và TW phản ánh thực tế đô thị tốt hơn nhưng làm tăng mạnh độ khó và nhu cầu về phương pháp gần đúng hiệu quả.

2.3 Thuật toán tìm kiếm lân cận lớn thích nghi (ALNS)

ALNS phát triển từ ý tưởng Large Neighborhood Search, trong đó nghiệm hiện tại được cải thiện qua hai nhóm thao tác phá hủy và sửa chữa, với xác suất chọn toán tử điều chỉnh theo hiệu quả lịch sử; cơ chế này giúp bộ giải thích nghi với đặc trưng từng instance và tạo được các lân cận đủ lớn để thoát khỏi cấu trúc nghiệm cục bộ mà tìm kiếm cục bộ truyền thống khó vượt qua (Ropke và Pisinger, 2006). Tổng quan của Voigt (2025) trên 211 nghiên cứu xác nhận ALNS là một trong những khung metaheuristic được dùng rộng rãi nhất cho các bài toán định tuyến giàu ràng buộc, trong đó các toán tử chèn kiểu regret thường thuộc nhóm hiệu quả nhất.

Trong những năm gần đây, hướng kết hợp ALNS với cơ chế chấp nhận nghiệm của SA ngày càng phổ biến nhằm cân bằng giữa mở rộng không gian tìm kiếm và khả năng thoát cực trị địa phương. Alinaghian, Jamshidian và Tirkolaee (2022) đề xuất IALNS với tiêu chuẩn chấp nhận SA và danh sách cấm cho bài toán định tuyến xanh đa kho, có lựa chọn cơ cấu đội xe hỗn hợp và thời gian phụ thuộc thời điểm, nhưng không xét cửa sổ thời gian và giới hạn thời lượng tuyến, vốn là hai ràng buộc trung tâm của giao hàng chặng cuối. Ma và Yang (2025) đề xuất IALNS-SA cho bài toán giao nhận đồng thời có cửa sổ thời gian với một kho, đội xe đồng nhất và thời gian tĩnh, dùng năm toán tử phá hủy và năm toán tử sửa chữa với trọng số cập nhật theo phân đoạn 1000 vòng lặp. Tang và cộng sự (2025) áp dụng IALNS trong khung hai cấp cho thu gom rác thải y tế với hai mục tiêu chi phí và rủi ro lây nhiễm, song tầng định tuyến vẫn dựa trên khoảng cách tĩnh với một trung tâm xử lý và một loại phương tiện. Như vậy, mỗi khung hiện có mới bao phủ một phần đặc thù của MD-HF-TDVRPTW, và chưa khung nào đồng thời giải quyết ba thách thức cốt lõi: đánh giá phép chèn phụ thuộc thời điểm khởi hành dưới ràng buộc cửa sổ thời gian cứng; đôn bẩy chi phí từ cấu trúc đội xe dị chủng; và tính nhất quán của nghiệm trong môi trường nhiều kho. Đây là khoảng trống mà bộ giải đề xuất trong Mục 3.2 hướng đến.

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1 Mô hình toán học

Bài toán được hình thức hóa như một mô hình quy hoạch số nguyên hỗn hợp cho trường hợp TD và HF. Thời gian di chuyển trên mỗi cung phụ thuộc vào giờ khởi hành. Dữ liệu đã cho cung cấp TW của khách, thời lượng phục vụ, dung tích của xe, chi phí cố định và biến đổi, giới hạn ca làm việc, mạng đường có nhãn mức độ giao thông theo giờ và các ràng buộc lưu thông được mô hình hóa như sau:

Tập chỉ số và các tham số:

- D : tập kho. Mỗi xe k gắn với một kho $d(k) \in D$.
- $N = \{1, \dots, n\}$: tập khách hàng.
- $K = \{1, \dots, |K|\}$: tập xe. Với mỗi $k \in K$, định nghĩa nút xuất phát s_k và nút kết thúc e_k .
- $V_k = \{s_k, e_k\} \cup N$. Tập cung hợp lệ của xe k : $A_k \subseteq \{(i, j) \in V_k \times V_k : i \neq j\}$. Các cung bị cấm do một chiều hay cấm xe nặng đã được loại khỏi A_k .
- $H = \{0, 1, \dots, 23\}$: tập lát cắt giờ trong ngày.

Các tham số vận hành:

- $q_i \geq 0$: nhu cầu của khách i theo một chiều đo đã chọn trong bước tiền xử lý.
- $Q_k > 0$: dung tích của xe k theo cùng chiều đo với q_i .
- $s_i \geq 0$: thời lượng phục vụ tại khách i tính bằng phút. Đặt $s_{s_k} = s_{e_k} = 0$.

- $[e_i, l_i]$: TW của khách i tính bằng phút.
- $[a_d, b_d]$: khung giờ vận hành của kho d . Suy ra $[e_{s_k}, l_{s_k}] = [a_{d(k)}, b_{d(k)}]$ và $[e_{e_k}, l_{e_k}] = [a_{d(k)}, b_{d(k)}]$.
- $H_k > 0$: giới hạn thời lượng tuyến của xe k tính bằng phút.
- $\bar{T}_{ij} \geq 0$: thời gian hành trình cơ sở của cung (i, j) tính bằng phút.
- $m_h > 0$: hệ số giờ cho lát $h \in H$.
- $F_k \geq 0$: chi phí cố định nếu sử dụng xe k .
- $c_k \geq 0$: chi phí biến đổi trên một phút chạy của xe k .
- M : hằng số đủ lớn cho ràng buộc thời gian. Ví dụ $M_{ij}^{time} = l_j - e_i + s_i + \max_h(\bar{m}_h \bar{T}_{ij})$.

Các biến quyết định:

- $x_{ijk} \in \{0,1\}$ với $(i, j) \in A_k$: bằng 1 nếu xe k đi cung (i, j) .
- $z_k \in \{0,1\}$: bằng 1 nếu xe k được sử dụng.
- $t_i \geq 0$: thời điểm bắt đầu phục vụ tại nút i tính bằng phút.
- $u_{ik} \geq 0$: tải tích lũy ngay sau khi phục vụ i nếu i nằm trên tuyến của xe k .
- $y_{ih} \in \{0,1\}$ với $i \in N, h \in H$: bằng 1 nếu thời điểm rời i thuộc lát giờ h .
- $w_{ijhk} \in \{0,1\}$ với $(i, j) \in A_k, h \in H$: biến tuyến tính hóa cho tích $x_{ijk} \cdot y_{ih}$ dùng trong hàm mục tiêu và lan truyền thời gian.

Hàm mục tiêu:

$$\min Z = \sum_{k \in K} F_k z_k + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A_k} \sum_{h \in H} c_k \bar{T}_{ij} m_h w_{ijhk} \quad (3.1)$$

Các ràng buộc:

$$\sum_{k \in K} \sum_{\substack{j \in V_k \\ (i,j) \in A_k}} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{\substack{j \in V_k \\ (j,i) \in A_k}} x_{jik} = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.3)$$

$$\sum_{\substack{j \in V_k \\ (i,j) \in A_k}} x_{ijk} - \sum_{\substack{j \in V_k \\ (j,i) \in A_k}} x_{jik} = 0, \quad \forall k \in K, \forall i \in N \quad (3.4)$$

$$\sum_{\substack{j \in V_k \\ (s_k,j) \in A_k}} x_{s_kjk} = z_k, \quad \forall k \in K \quad (3.5)$$

$$\sum_{\substack{j \in V_k \\ (j,e_k) \in A_k}} x_{jek} = z_k, \quad \forall k \in K \quad (3.6)$$

$$e_i \leq t_i \leq l_i, \quad \forall i \in N \quad (3.7)$$

$$a_{d(k)} \leq t_{s_k}, t_{e_k} \leq b_{d(k)}, \quad \forall k \in K \quad (3.8)$$

$$t_j \geq t_i + s_i + \bar{T}_{ij} \sum_{h \in H} m_h y_{ih} - M(1 - x_{ijk}), \quad \forall k \in K, \forall (i, j) \in A_k \quad (3.9)$$

$$\sum_{h \in H} y_{ih} = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.10)$$

$$t_{e_k} - t_{s_k} \leq H_k, \quad \forall k \in K \quad (3.11)$$

$$u_{jk} \geq u_{ik} + q_j - Q_k(1 - x_{ijk}), \quad (3.12)$$

$$q_i \cdot \sum_{\substack{j \in V_k \\ (i,j) \in A_k}} x_{ijk} \leq u_{ik} \leq Q_k \cdot \sum_{\substack{j \in V_k \\ (i,j) \in A_k}} x_{ijk}, \quad \forall k \in K, \forall i \in N \quad (3.13)$$

$$u_{s_k k} = 0, \quad \forall k \in K \quad (3.14)$$

$$\sum_{\substack{j \in V_k \\ (s_k, j) \in A_k}} x_{s_k j k} \leq z_k, \quad z_k \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K \quad (3.15)$$

$$x_{ijk} = 0, \quad \forall k \notin K_i, \forall j \text{ với } (i,j) \in A_k \quad (3.16)$$

$$w_{ijhk} \leq x_{ijk}, \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A_k, \forall h \in H \quad (3.17)$$

$$w_{ijhk} \leq y_{ih}, \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A_k, \forall h \in H \quad (3.18)$$

$$w_{ijhk} \geq x_{ijk} + y_{ih} - 1, \quad \forall k \in K, \forall (i,j) \in A_k, \forall h \in H \quad (3.19)$$

Hàm mục tiêu (3.1) tối thiểu hóa tổng chi phí, bao gồm chi phí kích hoạt phương tiện và chi phí biến đổi theo thời gian di chuyển trên các cung được chọn. Các ràng buộc (3.2) và (3.3) bảo đảm mỗi khách hàng chỉ được phục vụ đúng một lần, trong khi ràng buộc (3.4) duy trì cân bằng luồng tại từng khách hàng để bảo đảm tính liên tục của tuyến. Các ràng buộc (3.5) và (3.6) gắn mỗi tuyến với depot tương ứng, qua đó xác định chính xác việc sử dụng phương tiện và chi phí cố định phát sinh. Các ràng buộc thời gian được mô tả bởi (3.7) đến (3.11). Cụ thể, (3.7) và (3.8) bảo đảm thời điểm phục vụ khách hàng và thời điểm xe hoạt động tại depot đều nằm trong các TW cho phép. Ràng buộc (3.9) và (3.10) thực hiện lan truyền thời gian dọc theo tuyến, trong đó thời gian hành trình phụ thuộc vào thời điểm rời nút hiện tại, cho phép phản ánh ảnh hưởng của trạng thái giao thông theo giờ. Ràng buộc (3.11) giới hạn tổng thời lượng làm việc của mỗi phương tiện. Các ràng buộc (3.12) đến (3.14) kiểm soát tải tích lũy trên tuyến, bảo đảm nhu cầu của khách hàng không vượt quá dung tích của phương tiện theo chiều đo đã được chuẩn hóa ở bước tiền xử lý. Ràng buộc (3.15) liên kết biến kích hoạt phương tiện với quyết định rời depot, còn ràng buộc (3.16) bảo đảm tính tương thích giữa khách hàng và tập phương tiện được phép phục vụ. Cuối cùng, các ràng buộc (3.17) đến (3.19) tuyến tính hóa tích giữa quyết định chọn cung và lát cắt thời gian, nhờ đó duy trì mô hình ở dạng quy hoạch nguyên tuyến tính hỗn hợp và phù hợp với bộ giải chuẩn.

Mô hình giả định mạng đường có hướng, thời gian hành trình là xác định và phụ thuộc vào thời điểm rời nút theo dạng lát giờ. Mỗi khách hàng được phục vụ đúng một lần bởi đúng một phương tiện, không cho phép tách đơn; mỗi xe xuất phát và kết thúc tại cùng một depot, chi phí gồm phần cố định khi kích hoạt xe và phần biến đổi theo thời gian di chuyển. Nhu cầu khách hàng và dung tích phương tiện được xét theo một chiều đo thống nhất, trong khi TW, giới hạn thời lượng ca, tương thích xe và các hạn chế lưu thông được xem là các ràng buộc cứng. Trong phạm vi nghiên cứu, mô hình chưa xét tồn kho động tại depot, nghỉ bắt buộc của lái xe, nạp nhiên liệu hoặc sạc trong ca, ghép cặp giao nhận hoàn trả, cũng như bất định do thời tiết hay sự cố. Ngoài ra, việc biểu diễn TD theo lát giờ chỉ là một xấp xỉ bậc thang của thời gian hành trình thực tế, do đó có thể phát sinh sai số tại biên lát và làm tăng nhanh độ lớn của mô hình khi mở rộng quy mô dữ liệu.

3.2 Thuật toán IALNS-SA

Thuật toán IALNS-SA được xây dựng trên khung ALNS, kết hợp với cơ chế chấp nhận nghiệm của SA. Về nguyên lý, ALNS đảm nhiệm việc mở rộng không gian tìm kiếm thông qua cơ chế phá hủy và sửa chữa thích nghi, trong khi SA cho phép chấp nhận có kiểm soát các nghiệm kém hơn để giảm nguy cơ kẹt tại cực trị địa phương (Kirkpatrick, Gelatt, và Vecchi, 1983; Ropke và Pisinger, 2006; Ma và Yang, 2025). Tuy nhiên, khác với các khung IALNS hiện có, vốn mỗi khung mới bao phủ một phần đặc thù của bài toán như đã phân tích ở Mục 2.3, bộ giải đề xuất tích hợp một tập cơ chế chuyên biệt xử lý đồng thời cả ba thành phần MD, HF và

TD dưới ràng buộc cửa sổ thời gian cứng. Bảng 1 đối chiếu khung đề xuất với ALNS chuẩn của Ropke và Pisinger (2006) và ba khung IALNS gần đây của Alinaghian và cộng sự (2022), Ma và Yang (2025) và Tang và cộng sự (2025).

Nghiem khởi tạo s_0 được xây dựng dưới dạng một nghiệm khả thi, trong đó khách hàng lần lượt được gán vào các tuyến sao cho vẫn thỏa ràng buộc dung tích, TW, giới hạn thời lượng tuyến và depot gốc của phương tiện. Mục tiêu của bước này không phải tạo ra nghiệm tốt nhất từ đầu, mà tạo một nền nghiệm đủ ổn định để các toán tử phá hủy và sửa chữa có thể khai thác hiệu quả ở các vòng lặp sau. Theo tinh thần của các phương pháp khởi tạo trong ALNS và IALNS-SA, một nghiệm ban đầu khả thi giúp giảm số vòng lặp sửa lỗi và rút ngắn giai đoạn hội tụ ban đầu của bộ giải (Ropke & Pisinger, 2006; Ma & Yang, 2025).

Ở mỗi vòng lặp, một toán tử phá hủy và một toán tử sửa chữa được chọn theo cơ chế bánh xe roulette. Nhóm phá hủy gồm tám toán tử: Random, Worst, Related Distance, Cluster, Service Time, Shaw, Historical Request Pair và Historical Action Pair. Toán tử Shaw đo độ liên quan đồng thời theo khoảng cách không gian, độ lệch cửa sổ thời gian, chênh lệch nhu cầu và mức tương thích phương tiện; chiều thứ tư là phần mở rộng dành riêng cho đội xe dị chủng so với công thức gốc của Shaw (1998). Hai toán tử lịch sử khai thác thông tin ở mức cặp, khác với cách khai thác lịch sử theo chỉ phí vị trí của từng khách hàng riêng lẻ trong các khung hiện có (Alinaghian và cộng sự, 2022): bộ giải tích lũy tần suất các cặp khách hàng cùng tuyến và chỉ phí tốt nhất từng ghi nhận của từng cung, từ đó phá bỏ các cặp gắn kết kém hiệu quả lặp lại và các cung có chỉ phí xấu hơn đáng kể so với lịch sử, giúp thông tin học được từ chính quá trình tìm kiếm hướng trực tiếp cho pha phá hủy.

Pha sửa chữa dùng Greedy Insertion và các biến thể Regret 2, Regret 3, Regret 4 (Ropke và Pisinger, 2006) với hai điều chỉnh: chỉ phí chen được cộng một thành phần nhiễu ngẫu nhiên nhỏ để đa dạng hóa quỹ đạo tìm kiếm, và khi một khách hàng không còn vị trí chen khả thi cứng do đánh giá phụ thuộc thời gian, cơ chế dự phòng cho phép chen theo đánh giá mềm để nghiệm không vỡ cấu trúc, phần vi phạm do hàm phạt xử lý.

Bảng 1. Đối chiếu bộ giải IALNS-SA đề xuất với các khung IALNS và IALNS hiện có

Tiêu chí	ALNS (Ropke và Pisinger, 2006)	IALNS (Alinaghian và cộng sự, 2022)	IALNS-SA (Ma và Yang, 2025)	IALNS (Tang và cộng sự, 2025)	IALNS-SA đề xuất
Lớp bài toán	PDPTW, một kho	VRP xanh đa kho, lựa chọn quy mô và cơ cấu đội xe hỗn hợp, thời gian phụ thuộc thời điểm; không có cửa sổ thời gian	VRPSDPTW, một kho, đội xe đồng nhất, thời gian tĩnh	LRP hai cấp cho rác thải y tế; tầng định tuyến: một trung tâm xử lý, một loại xe, có cửa sổ thời gian, hai mục tiêu chi phí và rủi ro	MD, HF, TD và TW tích hợp đồng thời
Đánh giá phép chen	Ma trận thời gian tĩnh	Tốc độ tuyến tính từng khúc bảo đảm vào trước ra trước; chỉ phí nhiên liệu và phát thải theo tải trọng, tốc độ, độ dốc	Khoảng cách tĩnh	Khoảng cách trắc địa tĩnh, tốc độ cố định theo loại xe	Tải mô phỏng toàn bộ lịch trình với thời gian phụ thuộc thời điểm khởi hành
Toán tử phá hủy	Shaw, random, worst	Chín toán tử theo khoảng	Năm toán tử: random với	Bốn toán tử: Shaw, ngẫu	Tám toán tử, bổ sung hai

Tiêu chí	ALNS (Ropke và Pisinger, 2006)	IALNS (Alinaghian và cộng sự, 2022)	IALNS-SA (Ma và Yang, 2025)	IALNS (Tang và cộng sự, 2025)	IALNS-SA đề xuất
		cách, vùng và lịch sử chi phí vị trí từng khách hàng; kèm danh sách cấm	quy mô động, similarity, maximum saving cost, destroying vehicle, maximum waiting time	nhiên, chuỗi liên tiếp, worst theo chi phí và rủi ro	toán tử lịch sử ở mức cặp (cặp khách hàng, cặp cung) và Shaw mở rộng chiều tương thích phương tiện
Toán tử sửa chữa	Greedy và regret	Bốn toán tử tham lam và regret, có biến thể nhiều	Năm toán tử: global optimal, minimum insertion cost, random K, minimum waiting time, regret	Ba toán tử: regret, tham lam theo chi phí và rủi ro, ngẫu nhiên	Greedy và Regret 2, 3, 4 có nhiều ngẫu nhiên cùng cơ chế dự phòng khi chèn thất bại
Xử lý ràng buộc	Ràng buộc cứng	Ràng buộc cứng thông qua phạt lớn để loại nghiệm vi phạm	Ràng buộc cứng	Ràng buộc cứng	Đánh giá kép: tìm kiếm trên hàm phạt mềm, ghi nhận nghiệm tốt nhất theo khả thi cứng; hệ số phạt tự điều chỉnh
Ổn định hóa nghiệm	Không	Không	Không	Đảo chiều từng tuyến cuối mỗi vòng lặp để giảm rủi ro lây nhiễm	Cắt tuyến vượt giới hạn thời lượng và loại trùng lặp, và nghiệm trong từng vòng lặp
Cập nhật trọng số toán tử	Theo phân đoạn	Theo phân đoạn vòng lặp	Theo phân đoạn 1000 vòng lặp	Điều chỉnh phần thưởng theo xếp hạng Pareto với bốn mức thưởng	Liên tục theo làm mượt mũ ngay trong từng vòng lặp
Lập lịch xuất phát tại kho	Không	Không; tốc độ từng cung là biến quyết định theo khung giờ	Không	Không	Canh thời điểm rời kho bằng phép lặp điểm bắt động theo điều kiện giao thông

Nguồn: Tác giả tổng hợp

Trung tâm của bộ giải là cơ chế đánh giá kép mềm cứng: trong tìm kiếm, nghiệm ứng viên được đánh giá bằng hàm chi phí mở rộng gồm ba thành phần phạt tuyến tính với hệ số ρ_T cho vi phạm của sổ thời gian, ρ_Q cho vượt tải và ρ_H cho vượt thời lượng tuyến, cho phép quỹ đạo tìm kiếm đi xuyên vùng bán khả thi vốn là cầu nối giữa các cực trị địa phương trong không gian bị siết chặt bởi cửa sổ thời gian; ngược lại, nghiệm tốt nhất chỉ được cập nhật khi vượt qua kiểm tra khả thi cứng, nên kết quả cuối cùng luôn là một phương án triển khai được. Các hệ số phạt được thiết kế tự điều chỉnh theo chu kỳ 200 vòng lặp dựa trên tỷ lệ chấp nhận và mức trì trệ; với ngân sách 100 vòng lặp của thực nghiệm hiện tại, các hệ số giữ nguyên giá trị khởi tạo.

Hai bước ổn định hóa nghiệm được thực hiện ngay sau pha sửa chữa trong từng vòng lặp: cắt tuyến quá dài, tức gỡ bớt khách hàng ở phần đuôi các tuyến vượt giới hạn H_k và tái chen mềm sang tuyến khác; và loại trùng lặp, vá nghiệm, bảo đảm mỗi khách hàng xuất hiện đúng một lần trên đúng một tuyến sau khi các toán tử hoạt động trên nhiều tuyến thuộc nhiều kho, đồng thời chen bù khách bị bỏ sót. Đây là hai thành phần đặc thù của môi trường đa kho và phụ thuộc thời gian, không có trong các khung một kho.

Thuật toán 1. Thuật toán IALNS-SA

Input:

problem, nghiệm khởi tạo s_0 , tập toán tử phá huỷ D , tập toán tử sửa chữa R , tham số T_0 , α , ρ_T , ρ_Q , ρ_H , H_k , $destroy_{min}$, $destroy_{max}$, số vòng lặp I_{max} , ngưỡng thời gian t_{max}

Khởi tạo:

$s_{best} \leftarrow s_0$; $s_{curr} \leftarrow s_0$; $cost_{best} \leftarrow cost(s_{best})$; $T \leftarrow T_0$

$w_D, w_R \leftarrow$ trọng số khởi tạo cho từng toán tử (=1)

$\lambda \leftarrow$ hệ số học trọng số; $\sigma \leftarrow$ phần thưởng cải thiện, chấp nhận, từ chối khởi tạo lịch sử hành động và cập khách hàng

while chưa vượt I_{max} và thời gian $< t_{max}$ **do**

 chọn $d_{func} \in D$ và $r_{func} \in R$ theo *roulette*(w_D, w_R)

 xác định số khách cần phá d dựa trên tỉ lệ ngẫu nhiên

$(s', removed) \leftarrow d_{func}(s_{curr}, d)$ # Phá huỷ

$s'' \leftarrow r_{func}(s', removed, \rho_T, \rho_Q, \rho_H)$ # Sửa chữa mềm

$s'' \leftarrow shave_long_routes(s'')$ # Cắt tuyến dài

$s'' \leftarrow dedupe_and_repair(s'')$ # Loại trùng và vá lại

$\Delta \leftarrow cost(s'') - cost(s_{curr})$

if $\Delta \leq 0$ **or** $rand() < exp(-\Delta/T)$ **then**

$s_{curr} \leftarrow s''$ # Chấp nhận theo SA

if $cost_{feasible}(s_{curr}) < cost_{best}$ **then**

$s_{best} \leftarrow s_{curr}$; $cost_{best} \leftarrow cost_{feasible}(s_{curr})$

 cập nhật trọng số w_D, w_R theo hiệu suất toán tử (σ, λ)

 điều chỉnh các hệ số phạt ρ_T, ρ_Q, ρ_H định kỳ

$T \leftarrow \alpha \times T$ # Làm nguội nhiệt độ

end while

return $s_{best}, cost_{best}$

Với mỗi tuyến, thời điểm rời kho được xác định bằng phép lặp điểm bất động (tối đa sáu lần) sao cho phương tiện đến khách hàng đầu tiên đúng lúc mở cửa sổ thời gian, thay vì xuất phát tại thời điểm 0 và chờ tại chỗ; do thời gian di chuyển phụ thuộc thời điểm khởi hành, cơ chế này chỉ có ý nghĩa trong môi trường TD và trực tiếp làm giảm tổng thời lượng tuyến.

Sau mỗi vòng lặp, trọng số của cặp toán tử vừa dùng được cập nhật ngay theo công thức làm mượt mũ $w \leftarrow (1 - \lambda)w + \lambda\sigma$ với hệ số học λ bằng 0.2, mức thưởng σ bằng 6, 3 hoặc 1

tương ứng với tạo nghiệm tốt nhất mới, cải thiện nghiệm hiện tại hoặc được chấp nhận, và phân rã khi bị từ chối; so với cập nhật theo phân đoạn cố định, cập nhật liên tục giúp phân phối lựa chọn toán tử phản ứng nhanh với giai đoạn tìm kiếm khi ngân sách vòng lặp hạn chế. Việc chấp nhận nghiệm tuân theo tiêu chuẩn Metropolis với nhiệt độ làm nguội hình học $T \leftarrow \alpha \times T$ (Kirkpatrick và cộng sự, 1983); kết thúc vòng lặp chính, nghiệm tốt nhất được tinh chỉnh thêm bằng các phép di dời đơn lẻ dưới đánh giá khả thi cứng trước khi xuất kết quả. Trình tự tổng quát của bộ giải được tóm tắt trong Thuật toán 1.

4. Kết quả và thảo luận

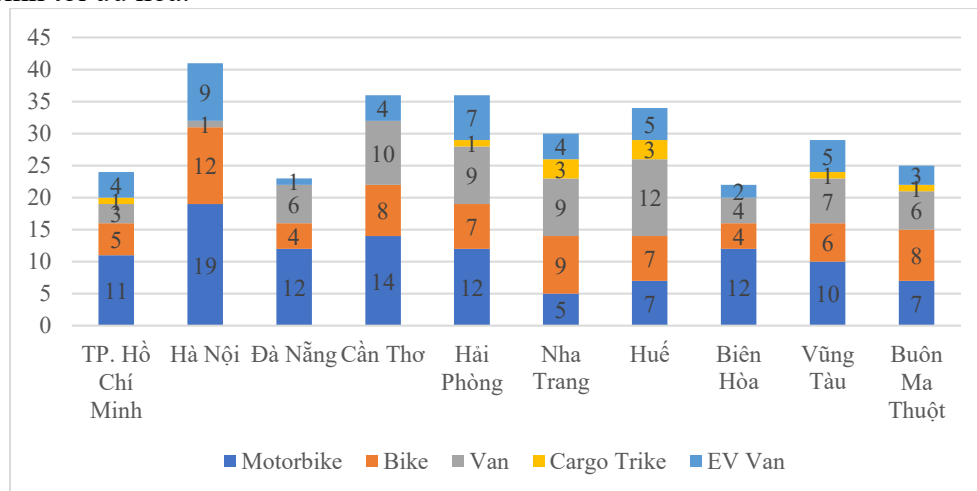
4.1 Dữ liệu nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng bộ dữ liệu do Viện Công nghệ Thông minh và Tương tác cung cấp, gồm ba thành phần cốt lõi trình bày trong Bảng 2: 50000 đơn hàng tập trung tại bốn đô thị lớn là Thành phố Hồ Chí Minh, Hà Nội, Đà Nẵng và Cần Thơ, đội xe dị chủng 300 phương tiện thuộc năm loại, và hệ thống 50 depot phân bố trên 10 khu vực.

Bảng 1. Phân bố khách hàng, đội xe và các kho

Khách hàng (Số đơn hàng)				
TP. Hồ Chí Minh 22414	Hà Nội 17602	Đà Nẵng 5991	Cần Thơ 3997	
Đội xe				
Motorbike 109	Bike 70	Van 67	EV Van 44	Cargo Trike 10
Depot				
TP. Hồ Chí Minh: 5 Hải Phòng: 5 Vũng Tàu: 5	Hà Nội: 5 Nha Trang: 5 Buôn Ma Thuột: 5	Đà Nẵng: 5 Huế: 5	Cần Thơ: 5 Biên Hòa: 5	

Sự khác biệt giữa các loại phương tiện là cơ sở của thành phần HF: chi phí kích hoạt trung bình theo loại lần lượt là 7.48 với Bike, 11.78 với Motorbike, 13.78 với Cargo Trike, 54.08 với EV Van và 60.71 với Van; chi phí biến đổi từ 0.06 đến 0.21 trên một phút chạy; giới hạn thời lượng ca của từng phương tiện từ 360 đến 720 phút. Hệ thống 50 depot trên 10 khu vực tạo bối cảnh MD rõ ràng, trong đó việc gán khách hàng cho depot và phân bổ phương tiện là một phần của quá trình tối ưu hóa.



Hình 1. Phân bố số lượng các xe theo từng khu vực kho

Hình 1 cho thấy motorbike và bike chiếm tỷ trọng lớn tại hầu hết khu vực, phù hợp với đặc điểm giao hàng chặng cuối, nơi phương tiện nhỏ có lợi thế tiếp cận nội đô còn phương tiện tải lớn phù hợp với tuyến gom đơn cao hoặc phạm vi rộng.

Lớp dữ liệu mạng đường gồm 2500000 bản ghi (50 depot, mỗi depot kết nối 50000 đơn hàng), mỗi bản ghi lưu khoảng cách, thời gian di chuyển, mức độ giao thông và hạn chế lưu thông; đây là cơ sở mô hình hóa thành phần TD và cho phép bộ giải đánh giá nghiệm trong điều kiện giao thông thay đổi theo thời điểm.

4.2 Thiết kế thực nghiệm

Thực nghiệm đánh giá hiệu năng của IALNS-SA so với CWS, GRASP, HCLS và SA trên cùng dữ liệu đầu vào, hàm chi phí, hệ ràng buộc và quy trình đo lường, đồng thời kiểm chứng tính ổn định của kết quả bằng kiểm định thống kê; các bộ giải được triển khai trong cùng môi trường lập trình và chạy trên cùng một máy tính.

Bảng 2. Cơ cấu của mẫu thực nghiệm so với tổng thể dữ liệu

Hạng mục	Tổng thể	Tỷ lệ (%)	Mẫu	Tỷ lệ (%)
Khách hàng theo đô thị				
TP. Hồ Chí Minh	22414	44.8	88	44.0
Hà Nội	17602	35.2	78	39.0
Đà Nẵng	5991	12.0	23	11.5
Cần Thơ	3997	8.0	11	5.5
Kiểm định chi bình phương: $\chi^2 = 2.443, p = 0.486$				
Đội xe theo loại phương tiện				
Motorbike	109	36.3	37	37.0
Bike	70	23.3	23	23.0
Van	67	22.3	23	23.0
EV Van	44	14.7	15	15.0
Cargo Trike	10	3.3	2	2.0
Kiểm định chi bình phương: $\chi^2 = 0.578, p = 0.966$; mẫu phủ 10/10 khu vực kho				

Về cấu hình dữ liệu, thực nghiệm dùng lát cắt gồm 200 khách hàng và 100 phương tiện đầu tiên theo thứ tự mã định danh. Quy mô này cân đối giữa độ khó tổ hợp và chi phí đánh giá nghiệm: do mọi phép chèn phải tái mô phỏng lịch trình trên mạng đường phụ thuộc thời gian 2500000 bản ghi, 200 khách hàng cho phép mỗi bộ giải chạy lặp nhiều lần trong ngân sách khả dụng, còn 100 phương tiện lớn hơn nhiều so với nhu cầu thực tế của mọi lời giải thu được (tối đa 41 xe được kích hoạt), bảo đảm quyết định về cấu trúc đội xe không bị bó bởi nguồn cung. Do mã định danh được cấp độc lập với vị trí địa lý và loại phương tiện, lát cắt tương đương một mẫu ngẫu nhiên phân tầng tự nhiên: kiểm định chi bình phương trong Bảng 3 cho $p = 0.486$ với cơ cấu khách hàng theo đô thị và $p = 0.966$ với cơ cấu đội xe theo loại, tức không có bằng chứng mẫu lệch khỏi tổng thể; mẫu phủ đủ 10 trên 10 khu vực kho, và các đặc trưng nhu cầu bám sát tổng thể với khối lượng đơn trung bình 11.87 so với 12.65 kg, độ rộng cửa sổ thời gian 312.90 so với 315.68 phút, thời lượng phục vụ 8.93 so với 8.98 phút.

Về quy trình, mỗi bộ giải được chạy độc lập 10 lần với 10 hạt giống ngẫu nhiên dùng chung (7, 13, 21, 36, 42, 55, 68, 77, 89, 101) để cho phép so sánh theo cặp; mỗi lượt lưu nguyên văn dòng lệnh, nhật ký và kết quả nhằm bảo đảm khả năng tái lập, cả 50 lượt đều hoàn thành với nghiệm thỏa mãn toàn bộ ràng buộc cứng. Cấu hình chi tiết của từng bộ giải trong Bảng 4.

Bảng 3. Cấu hình thực nghiệm của các bộ giải

Hạng mục	Thiết lập
Quy mô bài toán	200 khách hàng và 100 phương tiện đầu tiên theo thứ tự mã định danh
Hạt giống ngẫu nhiên	10 giá trị: 7, 13, 21, 36, 42, 55, 68, 77, 89, 101; dùng chung cho cả năm bộ giải
Hệ số phạt	$\rho_T = 200, \rho_Q = 400, \rho_H = 800$
Giới hạn thời	H_k theo từng phương tiện từ dữ liệu, trong khoảng 360 đến 720 phút; giá trị

lượng tuyến	480 phút chỉ dùng dự phòng khi thiếu dữ liệu
IALNS-SA	100 vòng lặp, t_{max} 2000 giây; $T_0 = 200$, $\alpha = 0.996$; tỷ lệ phá hủy 10-25%, hệ số nhiễu chèn 0.02; khởi tạo gom tuyến tiết kiệm phương tiện
SA	20000 lần thử biến đổi (đảo đoạn, hoán vị trong tuyến, di dời giữa tuyến); $T_0 = 199$, $\alpha = 0.995$
HCLS	100 lần khởi động lại, tối đa 50 lượt quét tìm kiếm cục bộ mỗi lần
GRASP	100 vòng xây dựng với hệ số danh sách ứng viên hạn chế 0.25, 50 lượt tìm kiếm cục bộ mỗi vòng
CWS	Khởi tạo tiết kiệm Clarke và Wright, 100 vòng cải thiện, t_{max} 2000 giây, cùng hệ số phạt
Môi trường	AMD Ryzen 7 9800X3D (8 nhân, 4.70 GHz), 48 GB DDR5 4800 MT/s, Windows 11, Python 3.14

4.3 Kết quả thống kê qua nhiều lần chạy

Bảng 5 tổng hợp kết quả của 50 lượt chạy dưới dạng trung bình kèm độ lệch chuẩn, cùng giá trị tổng chi phí tốt nhất của từng bộ giải. Trên 10 lần chạy, IALNS-SA đạt tổng chi phí trung bình 298.03 với độ lệch chuẩn 50.62, kích hoạt trung bình 12.6 phương tiện và cho tổng thời lượng tuyến trung bình 4288.75 phút. Các phương pháp đối chứng lần lượt đạt tổng chi phí trung bình 488.77 (GRASP), 492.41 (HCLS), 713.06 (SA) và 766.22 (CWS), tương ứng mức cải thiện của IALNS-SA từ 38.8 đến 60.9 phần trăm; số phương tiện giảm từ 43.4 đến 67.6 phần trăm và tổng thời lượng tuyến giảm từ 41.1 đến 50.4 phần trăm. Đáng chú ý, lượt chạy kém nhất của IALNS-SA (391.35) vẫn cho tổng chi phí thấp hơn lượt chạy tốt nhất của mọi phương pháp đối chứng (444.90 của GRASP), cho thấy ưu thế của phương pháp đề xuất không phụ thuộc vào việc lựa chọn hạt giống ngẫu nhiên.

Bảng 4. Kết quả thống kê của các bộ giải trên 10 lần chạy

Bộ giải	Số xe sử dụng	Tổng chi phí	Chi phí tốt nhất	Tổng quãng đường (km) (a)	Thời lượng tuyến (phút)	Thời gian giải (giây)
CWS	39.1 ± 1.6	766.22 ± 44.58	689.38	62937.71 ± 5601.99	8744.78 ± 655.51	37.47 ± 0.51
GRASP	22.4 ± 1.1	488.77 ± 27.01	444.90	12954.20 ± 2310.19	8190.88 ± 560.58	750.26 ± 38.66
HCLS	23.0 ± 1.6	492.41 ± 16.87	472.27	7994.14 ± 1972.02	7328.05 ± 638.88	676.62 ± 39.06
SA	29.2 ± 0.6	713.06 ± 31.57	624.21	12165.59 ± 16653.54 (b)	7724.66 ± 806.65	91.66 ± 7.13
IALNS-SA	12.6 ± 3.6	298.03 ± 50.62	237.56	16954.93 ± 4306.68	4288.75 ± 721.32	1980.11 ± 108.23

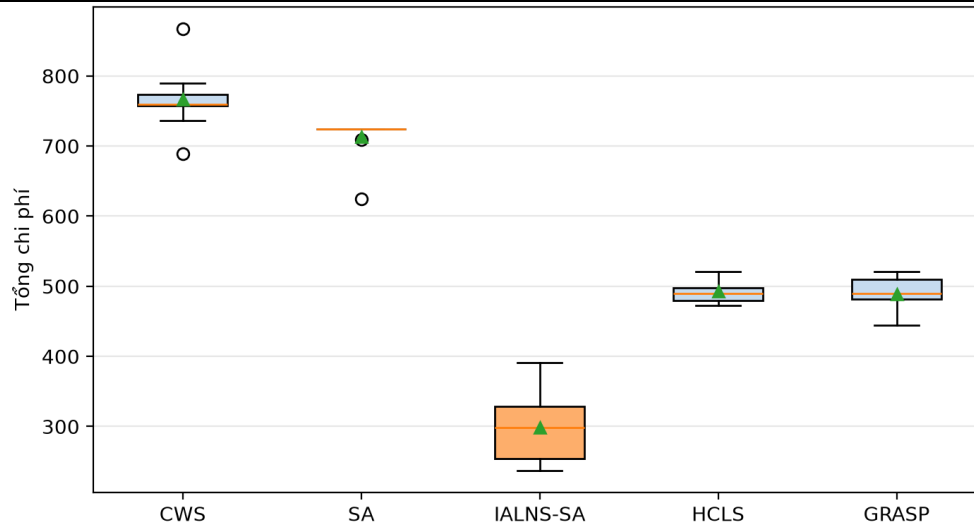
Ghi chú: (a) Tổng quãng đường là chỉ tiêu quy chiếu, được tổng hợp theo khoảng cách đường chim bay giữa các điểm dừng liên tiếp; hàm mục tiêu của bài toán dựa trên chi phí kích hoạt và thời gian di chuyển phụ thuộc thời điểm, nên quãng đường quy chiếu và tổng chi phí không đồng biến. (b) Phân bố quãng đường của SA có tính lưỡng cực: tám lượt cho cùng giá trị 4286.82 km, hai lượt còn lại đạt chi phí thấp hơn bằng cấu trúc tuyến dài hơn nhiều lần, khiến độ lệch chuẩn lớn hơn trung bình; xem thảo luận ở Mục 4.4.

Để kiểm chứng ý nghĩa thống kê của các chênh lệch, nghiên cứu áp dụng kiểm định hạng có dấu Wilcoxon theo cặp giữa IALNS-SA và từng phương pháp đối chứng trên các cặp lượt chạy cùng hạt giống, với hiệu chỉnh Holm cho so sánh bội, theo khuyến nghị về so sánh thuật toán trên nhiều tập kết quả của Demšar (2006). Kết quả trong Bảng 6 cho thấy IALNS-SA thắng ở toàn bộ 10 trên 10 cặp so sánh với từng đối chứng về tổng chi phí và p sau hiệu chỉnh bằng 0.0078 ở cả bốn cặp, tức ưu thế có ý nghĩa thống kê ở mức 5%. Kết luận tương tự cũng đạt được khi kiểm định trên số phương tiện sử dụng và tổng thời lượng tuyến, với cùng mức p sau hiệu chỉnh và tỷ số thắng hòa thua 10 trên 0 trên 0 ở toàn bộ các cặp. Kiểm định Friedman trên cả năm bộ giải và 10 lần chạy chung bác bỏ giả thuyết các thuật toán có hiệu năng tương đương với

$\chi^2 = 37.36$ và $p < 0.001$, củng cố kết luận về sự khác biệt có hệ thống giữa các bộ giải. Hình 2 trực quan hóa phân bố tổng chi phí của từng bộ giải qua 10 hạt giống.

Bảng 5. Kiểm định hạng có dấu Wilcoxon theo cặp trên tổng chi phí (n = 10 cặp)

So sánh	Chênh lệch trung bình	Mức cải thiện (%)	Thắng/Hòa/Thua	p gốc	p Holm
IALNS-SA và CWS	468.20	60.9	10/0/0	0.00195	0.0078
IALNS-SA và SA	415.03	58.1	10/0/0	0.00195	0.0078
IALNS-SA và HCLS	194.38	39.5	10/0/0	0.00195	0.0078
IALNS-SA và GRASP	190.75	38.8	10/0/0	0.00195	0.0078



Hình 2. Phân bố tổng chi phí của các bộ giải qua 10 lần chạy

4.4 Thảo luận

Phân tích dữ liệu vận hành của 50 lượt chạy chỉ ra bốn nguyên nhân chính tạo nên khoảng cách hiệu năng ở Mục 4.3.

Thứ nhất, đòn bẩy chi phí lớn nhất nằm ở cấu trúc đội xe. Chi phí kích hoạt một Van gấp hơn tám lần một Bike (60.71 so với 7.48) trong khi chi phí biến đổi chỉ 0.06 đến 0.21 trên một phút chạy, nên tổng chi phí bị chi phối bởi số lượng và chủng loại phương tiện được kích hoạt. IALNS-SA chỉ dùng trung bình 12.6 phương tiện so với 22.4 đến 39.1 của các đối chứng nhờ phá hủy quy mô lớn (10 đến 25 phần trăm số khách hàng mỗi vòng lặp) kết hợp chèn kiểu regret, cho phép giải phóng trọn từng tuyến và dồn khách hàng sang phương tiện chi phí thấp, điều các phép biến đổi cục bộ đơn lẻ không làm được; vì vậy dù tổng quãng đường quy chiếu lớn hơn một số đối chứng, chi phí vẫn thấp nhất, đúng bản chất hàm mục tiêu dựa trên chi phí kích hoạt và thời gian di chuyển.

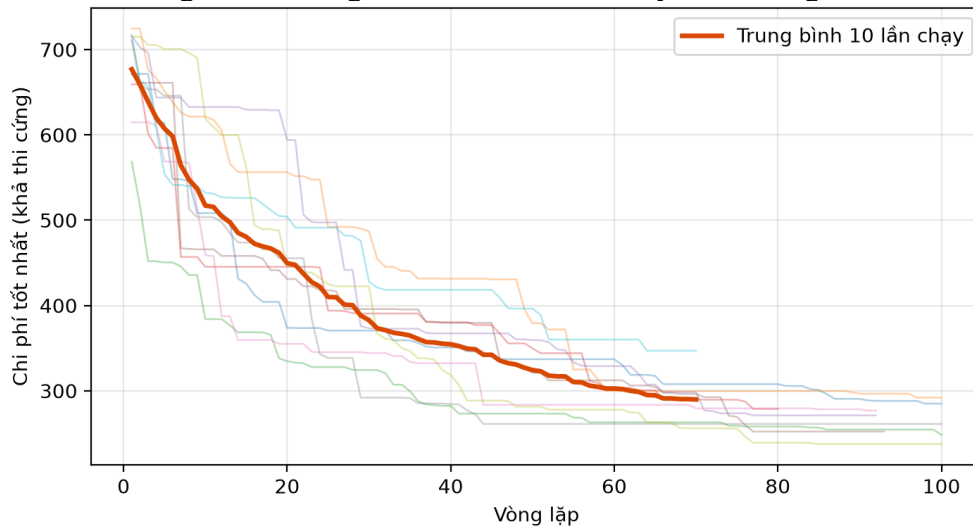
Bảng 6. Mức sử dụng và đóng góp của từng toán tử trong IALNS-SA

Nhóm	Toán tử	Số lần được chọn	Tỷ lệ chấp nhận (%)	Số lần tạo nghiệm tốt nhất mới	Tỷ lệ (%)
Phá hủy	Cluster	167	98.8	90	53.9
Phá hủy	Worst	128	96.1	62	48.4
Phá hủy	Historical Action Pair	134	96.3	60	44.8
Phá hủy	Service Time	117	96.6	27	23.1
Phá hủy	Shaw	87	93.1	19	21.8
Phá hủy	Related Distance	99	99.0	21	21.2
Phá hủy	Historical Request Pair	92	97.8	16	17.4

Nhóm	Toán tử	Số lần được chọn	Tỷ lệ chấp nhận (%)	Số lần tạo nghiệm tốt nhất mới	Tỷ lệ (%)
Phá hủy	Random	103	98.1	16	15.5
Sửa chữa	Regret 3	238	98.7	88	37.0
Sửa chữa	Regret 2	228	99.6	78	34.2
Sửa chữa	Regret 4	246	99.2	83	33.7
Sửa chữa	Greedy Insertion	215	90.2	62	28.8

Thứ hai, cơ chế thích nghi và các toán tử mới đóng góp thực chất. Gộp 927 vòng lặp của 10 lượt chạy (Bảng 7), ba toán tử phá hủy hiệu quả nhất là Cluster, Worst và Historical Action Pair với tỷ lệ tạo nghiệm tốt nhất mới lần lượt 53.9, 48.4 và 44.8 phần trăm, so với 15.5 phần trăm của toán tử ngẫu nhiên; bánh xe roulette cũng dồn tần suất lựa chọn về đúng nhóm này (Cluster chiếm 18.0 phần trăm số vòng so với mức 12.5 phần trăm nếu chọn đều). Việc toán tử lịch sử cặp cung đứng trong nhóm dẫn đầu là bằng chứng định lượng cho thấy thông tin tích lũy từ quá trình tìm kiếm thực sự định hướng phá hủy vào các cấu trúc kém hiệu quả. Ở pha sửa chữa, nhóm Regret đạt 33.7 đến 37.0 phần trăm so với 28.8 phần trăm của chèn tham lam, nhất quán với Voigt (2025).

Thứ ba, hành vi của SA đối chứng cho thấy phép biến đổi cục bộ đơn lẻ không đủ cho lớp bài toán này: với 20000 lần thử, SA kẹt tại nghiệm khởi tạo có chi phí 724.60 ở 8 trên 10 lượt; hai lượt thoát được (624.21 và 709.57) đều bằng cách chuyển tải sang loại xe có chi phí kích hoạt thấp hơn dù quãng đường dài hơn nhiều lần, đúng cơ chế đòn bẫy đội xe và đồng thời giải thích tính lưỡng cực của cột quãng đường trong Bảng 5. Thí nghiệm kiểm chứng với hệ số làm nguội 0.9996 cho kết quả không đổi, loại trừ giả thuyết làm nguội quá nhanh; nguyên nhân nằm ở thiết kế lân cận, khi nghiệm khởi tạo theo kho gần nhất là một cực trị địa phương rất mạnh đối với các phép đảo đoạn, hoán vị, di dời chỉ chấp nhận láng giềng khả thi cứng. IALNS-SA vượt rào cản này nhờ lân cận đủ lớn và quỹ đạo tìm kiếm mềm đi xuyên vùng bán khả thi trong khi nghiệm tốt nhất vẫn được bảo chứng khả thi cứng, nhờ đó cả 50 lượt chạy đều cho nghiệm triển khai được.



Hình 3. Quá trình hội tụ của IALNS-SA

Thứ tư, Hình 3 cho thấy phần lớn cải thiện đạt được trong khoảng 40 vòng lặp đầu (chi phí tốt nhất trung bình giảm từ xấp xỉ 680 xuống dưới 360) rồi chuyển sang giai đoạn tinh chỉnh, nên bộ giải có thể dừng sớm mà vẫn giữ phần lớn lợi ích. Đổi lại, thời gian giải trung bình 1980.11 giây là cao nhất trong năm bộ giải do mỗi vòng lặp phải tái mô phỏng lịch trình phụ thuộc thời gian cho hàng nghìn phép thử chèn trên mạng đường 2500000 bản ghi; phương pháp

vì vậy phù hợp với lập kế hoạch trước ngày vận hành hơn là điều phối thời gian thực, và tăng tốc pha đánh giá bằng bộ nhớ đệm truy vấn thời gian di chuyển là hướng cải tiến trực tiếp.

4.5 Hạn chế

Thực nghiệm còn ba hạn chế. Một là, cấu hình đặt đồng thời 100 vòng lặp và trần 2000 giây cho IALNS-SA, và trần thời gian có hiệu lực trước ở một phần các lượt: 5 lượt đủ 100 vòng (hạt giống 7, 13, 21, 77, 89), 3 lượt dừng ở 92 đến 93 vòng, 1 lượt ở 80 vòng và 1 lượt ở 70 vòng. Vì vậy độ lệch chuẩn tổng chi phí 50.62 của IALNS-SA, cao nhất trong năm bộ giải, có một phần bắt nguồn từ ngân sách không đồng đều chứ không thuần túy từ tính ngẫu nhiên của thuật toán: hệ số tương quan giữa số vòng hoàn thành và tổng chi phí là âm 0.658, hai lượt bị cắt sớm nhất chính là hai lượt chi phí cao nhất (391.35 và 327.38), còn hai nghiệm tốt nhất (237.56 và 248.38) đều thuộc nhóm chạy đủ vòng. Do việc cắt ngắn chỉ làm giảm chất lượng nghiệm của chính phương pháp đề xuất, ưu thế ghi nhận trong nghiên cứu là một ước lượng thận trọng. Hai là, thời gian giải được đo trong điều kiện chạy song song có tải nền, nên chỉ dùng để so sánh tương đối giữa các bộ giải trong cùng chiến dịch. Ba là, chỉ tiêu tổng quãng đường mang tính quy chiếu đường chim bay như đã chú thích tại Bảng 5, và toàn bộ kết quả gắn với một cấu hình 200 khách hàng; cần kiểm định trên nhiều quy mô và lát cắt dữ liệu để đánh giá đầy đủ khả năng khái quát.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã xây dựng và kiểm định bộ giải IALNS-SA cho bài toán MD-HF-TDVRPTW với các cơ chế chuyên biệt cho môi trường đa kho, đội xe dị chủng, thời gian phụ thuộc thời điểm và cửa sổ thời gian: tám toán tử phá hủy gồm hai toán tử lịch sử ở mức cặp và Shaw mở rộng tương thích phương tiện, đánh giá kép tìm kiếm mềm và bảo chứng khả thi cứng, hai bước ổn định hóa nghiệm mỗi vòng lặp, canh thời điểm xuất phát tại kho cùng cập nhật trọng số liên tục. Trên cấu hình 200 khách hàng và 100 phương tiện với 10 lần chạy độc lập cho mỗi bộ giải, IALNS-SA đạt tổng chi phí trung bình 298.03 với độ lệch chuẩn 50.62, giảm 38.8 đến 60.9 phần trăm so với GRASP, HCLS, SA và CWS, chỉ kích hoạt trung bình 12.6 phương tiện và cho thời lượng tuyến thấp nhất; ưu thế có ý nghĩa thống kê theo kiểm định Wilcoxon với hiệu chỉnh Holm ($p = 0.0078$ với cả bốn đối chứng, thắng 10 trên 10 cặp) và kiểm định Friedman ($p < 0.001$). Phân tích cơ chế cho thấy nguồn gốc của ưu thế nằm ở khả năng khai thác đòn bẩy chi phí của đội xe dị chủng, đóng góp thực chất của các toán tử phá hủy mới và cơ chế thích nghi, cùng khả năng vượt cực trị địa phương mà phương pháp đối chứng SA bị kẹt ở 8 trên 10 lượt chạy.

Hạn chế chính của nghiên cứu gồm ngân sách vòng lặp chưa đồng đều giữa các lượt chạy, thời gian giải của phương pháp đề xuất còn cao, và mô hình chưa xét bất định hay các mục tiêu ngoài chi phí. Các hướng tiếp theo vì vậy bao gồm cấp đủ ngân sách vòng lặp và tăng tốc pha đánh giá phụ thuộc thời gian, kiểm định trên nhiều quy mô và lát cắt dữ liệu, mở rộng tối ưu đa mục tiêu, mô hình hóa bất định và tích hợp các ràng buộc vận hành thực tế chi tiết hơn.

Lời cảm ơn: Các tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn đối với sự hỗ trợ về dữ liệu từ Viện Công nghệ Thông minh và Tương tác, Trường Công nghệ và Thiết kế, Đại học Kinh tế Thành phố Hồ Chí Minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Adamo, T., Gendreau, M., Ghiani, G., & Guerriero, E. (2024). A review of recent advances in time-dependent vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 319(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.06.016>
- Alinaghian, M., Jamshidian, M., & Tirkolaee, E. B. (2022). The time-dependent multi-depot fleet size and mix green vehicle routing problem: Improved adaptive large neighbourhood search. *Optimization*, 71(11), 3165–3193. <https://doi.org/10.1080/02331934.2021.2010078>

- Boysen, N., Fedtke, S., & Schwerdfeger, S. (2021). Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*, 43(1), 1-58. <https://doi.org/10.1007/s00291-020-00607-8>
- Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuysse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007>
- Demšar, J. (2006). Statistical comparisons of classifiers over multiple data sets. *Journal of Machine Learning Research*, 7, 1-30. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1248547.1248548>
- Ichoua, S., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2003). Vehicle dispatching with time-dependent travel times. *European Journal of Operational Research*, 144(2), 379-396. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00147-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00147-9)
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., Jr., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2016). Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.07.020>
- Ma, H., & Yang, T. (2025). Improved adaptive large neighborhood search combined with simulated annealing (IALNS-SA) algorithm for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows. *Electronics*, 14(12), Article 2375. <https://doi.org/10.3390/electronics14122375>
- Ropke, S., & Pisinger, D. (2006). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 40(4), 455-472. <https://doi.org/10.1287/trsc.1050.0135>
- Shaw, P. (1998). Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In M. Maher & J.-F. Puget (Eds.), *Principles and practice of constraint programming—CP98* (pp. 417-431). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-49481-2_30
- Solomon, M. M. (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35(2), 254-265. <https://doi.org/10.1287/opre.35.2.254>
- Tang, C., Wei, Q., Zhang, D., Sun, J., Perboli, G., Guo, Z., & Li, K. (2025). An improved adaptive large neighborhood search algorithm to solve a bi-level medical waste location-routing problem with infection control. *Waste Management*, 197, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.02.016>
- Voigt, S. (2025). A review and ranking of operators in adaptive large neighborhood search for vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 322(2), 357-375. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.05.033>
- Wang, Y., Wei, Z., Luo, S., Zhou, J., & Zhen, L. (2024). Collaboration and resource sharing in the multidepot time-dependent vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 192, Article 103798. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103798>