

TỐI ƯU HÓA LỘ TRÌNH XE TẢI KẾT HỢP DRONE TRONG BÀI TOÁN GIAO HÀNG CHẶNG CUỐI DỰA TRÊN MÔ HÌNH CHẶNG HAI CHỈ SỐ
OPTIMIZING TRUCK-DRONE ROUTING IN LAST-MILE DELIVERY BASED ON A TWO-INDEX STAGE-BASED FORMULATION

Lê Thị Hồng^{1*}

Trịnh Thị Hợp¹

Trịnh Thị Anh Loan¹

¹ Khoa Kỹ thuật Công nghệ, Trường Đại học Hồng Đức;

*Tác giả liên hệ; Email: lethihong@hdu.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.70117/hdujs.3030-4628.90.09.2026.1147>

Ngày nộp bài: 26/01/2026; Ngày gửi phản biện: 28/01/2026; Ngày duyệt đăng: 25/09/2026

Từ khóa:

FSTSP, Drone delivery, Mô hình dựa trên chặng, Tối ưu hóa logistics, CMSA.

Keywords:

FSTSP, Drone delivery, Stage-based formulation, Logistics optimization, CMSA.

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất mô hình lập trình tuyến tính nguyên hỗn hợp (MILP) với cấu trúc chặng hai chỉ số để giải quyết bài toán giao hàng bằng xe tải kết hợp drone (FSTSP). Thay vì dùng cung đường truyền thống, mô hình gán khách hàng vào các chặng có thứ tự trong lộ trình xe tải. Cách tiếp cận này giúp giảm mạnh lượng biến nhị phân và tự động loại bỏ các ràng buộc chu trình con phức tạp. Nhằm đảm bảo tính thực tiễn, nghiên cứu thiết lập cơ chế tuyến tính hóa và ràng buộc đồng bộ thời gian chặt chẽ. Qua thử nghiệm trên dữ liệu Agatz 2018 (tối đa 45 khách hàng), mô hình đã chứng minh sự vượt trội về thời gian hội tụ so với mô hình arc-based cũ, đồng thời duy trì chất lượng nghiệm cao khi quy mô tăng. Cuối cùng, chúng tôi đề xuất hướng tích hợp mô hình vào thuật toán lai CMSA nhằm giải quyết hiệu quả các bài toán FSTSP với quy mô lớn trong thực tế.

ABSTRACT

This paper proposes a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model utilizing a 2-index stage-based formulation to solve the Flying Sidekick Traveling Salesman Problem (FSTSP). Instead of using traditional arcs, the model assigns customers to ordered stages within the truck's route. This approach significantly reduces the number of binary variables and automatically eliminates complex subtour constraints. To ensure practical feasibility, the study establishes a linearization mechanism and strict time-synchronization constraints between the vehicles.

Through experiments on the 2018 Agatz benchmark dataset (up to 45 customers), the model demonstrated superior convergence time compared to traditional arc-based models, while maintaining high solution quality as the problem scale increases. Finally, the authors suggest a future direction of integrating this model into the hybrid Construct-Merge-Solve & Adapt (CMSA) algorithm to effectively tackle large-scale FSTSP problems in practice

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những thập kỷ gần đây, sự bùng nổ của thương mại điện tử và nền kinh tế số đã thúc đẩy một cuộc cách mạng trong lĩnh vực vận tải và logistics. Tuy nhiên, phân đoạn giao hàng chặng cuối (Last-Mile Delivery) vẫn được coi là mắt xích kém hiệu quả và tốn kém nhất, chiếm tới 28% đến 53% tổng chi phí vận chuyển [1]. Các phương tiện giao hàng truyền thống, chủ yếu là xe tải, đang đối mặt với những thách thức nghiêm trọng do tình trạng tắc nghẽn giao thông đô thị, các quy định nghiêm ngặt về khí thải và sự gia tăng chi phí nhân công [2]. Trong bối cảnh đó, việc tích hợp các thiết bị bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicles - UAV), hay thường gọi là drone, vào mạng lưới giao hàng đã nổi lên như một giải pháp đột phá nhờ khả năng di chuyển linh hoạt, tốc độ cao và chi phí vận hành thấp.

Bài toán người giao hàng kết hợp drone (FSTSP) được giới thiệu lần đầu bởi Murray và Chu vào năm 2015 [3]. Đây là một biến thể của bài toán người giao hàng (Traveling Salesman Problem - TSP) kinh điển, trong đó một xe tải phối hợp với một drone để phục vụ khách hàng. Cơ chế vận hành cốt lõi của FSTSP dựa trên sự cộng tác: xe tải đóng vai trò là một trạm gốc di động, có khả năng mang theo drone và các kiện hàng. Tại một địa điểm dừng (nút phóng), drone được phóng đi để phục vụ một khách hàng nằm trong tầm bay, trong khi xe tải tiếp tục di chuyển trên lộ trình đường bộ để phục vụ các khách hàng khác. Sau khi hoàn thành nhiệm vụ, drone sẽ quay trở lại và kết nối với xe tải tại một địa điểm khác (nút thu hồi) ở lộ trình sau [3].

Sự kết hợp này mang lại những lợi ích vượt trội so với các phương thức truyền thống. Năm 2018, Agatz và cộng sự đã chỉ ra rằng việc sử dụng drone có thể giúp giảm tổng thời gian giao hàng lên tới 40% trong các kịch bản đô thị nhờ khả năng bay theo đường chim bay và không bị ảnh hưởng bởi mạng lưới giao thông phức tạp [4]. Tuy nhiên, từ góc độ tối ưu hóa, FSTSP là một bài toán thuộc lớp NP-hard, có độ phức tạp cao hơn nhiều so với TSP truyền thống do sự bổ sung của các ràng buộc về đồng bộ hóa thời gian, không gian và giới hạn năng lượng của drone [5].

Nhiều nghiên cứu đã nỗ lực đề xuất các mô hình MILP (Mixed-Integer Linear Programming) để giải quyết FSTSP. Các mô hình sơ khai thường dựa trên cấu trúc cung đường với ba hoặc bốn chỉ số, dẫn đến sự gia tăng đột biến số lượng biến nhị phân và

các ràng buộc loại bỏ chu trình con khi số lượng khách hàng tăng lên [6]. Ví dụ, với N khách hàng, số lượng biến nhị phân trong mô hình arc-based có thể lên tới $O(n^3)$, gây áp lực cực lớn lên các bộ giải ngay cả khi xử lý các tập dữ liệu quy mô nhỏ [7].

Gần đây, hướng tiếp cận dựa trên chặng (stage-based) đang nhận được sự quan tâm lớn. Thay vì định nghĩa việc di chuyển trực tiếp giữa các cặp nút (i, j) , mô hình này tập trung vào việc gán khách hàng vào các thứ tự chặng trong lộ trình của xe tải [8]. Cách tiếp cận này mang lại hai ưu thế kỹ thuật quan trọng: tự động loại bỏ các chu trình con nhờ cấu trúc thứ tự tuyến tính của các chặng và đơn giản hóa đáng kể việc tính toán thời gian chờ đợi tại các điểm thu hồi. Năm 2019, Jeong và cộng sự nhấn mạnh rằng việc sử dụng mô hình 2 chỉ số không chỉ giảm không gian tìm kiếm mà còn cho phép tích hợp linh hoạt các ràng buộc về dung lượng pin và trọng lượng hàng hóa của drone [9].

Chúng tôi tập trung nghiên cứu bài toán FSTSP thông qua mô hình dựa trên chặng hai chỉ số với mục tiêu tối thiểu hóa thời gian hoàn thành toàn bộ hành trình giao hàng. Khác với các mô hình truyền thống dựa trên cung đường, vốn làm gia tăng nhanh số lượng biến nhị phân và các ràng buộc loại bỏ chu trình con khi quy mô bài toán tăng, cách tiếp cận dựa trên chặng tổ chức lộ trình của xe tải theo một chuỗi các chặng có thứ tự, qua đó giúp giảm độ phức tạp của mô hình và cải thiện khả năng giải bằng các bộ giải tối ưu.

Đóng góp của bài báo gồm ba điểm chính: Thứ nhất, nghiên cứu xây dựng mô hình MILP dựa trên cấu trúc chặng hai chỉ số và đề xuất cách tuyến tính hóa các biến liên kết chặng, cho phép mô hình hóa thời gian di chuyển của xe tải mà không cần sử dụng các biểu thức phi tuyến. Thứ hai, bài báo phân tích và mô hình hóa rõ cơ chế đồng bộ thời gian giữa xe tải và drone, đặc biệt là việc xử lý thời gian chờ tại các chặng phóng và thu hồi, nhằm đảm bảo sự phối hợp hiệu quả giữa hai phương tiện trong quá trình giao hàng. Thứ ba, hiệu quả của mô hình được kiểm chứng thông qua các thử nghiệm trên bộ dữ liệu chuẩn của Agatz năm 2018, cho thấy mô hình đề xuất cải thiện đáng kể hiệu quả tính toán trong khi vẫn đảm bảo chất lượng nghiệm. Những kết quả này cho thấy mô hình đề xuất là một hướng tiếp cận tiềm năng cho việc giải các bài toán tối ưu hóa giao hàng kết hợp xe tải - drone, đồng thời tạo nền tảng cho việc phát triển các phương pháp giải hiệu quả hơn đối với các bài toán quy mô lớn trong hệ thống logistics hiện đại.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Phương pháp nghiên cứu trọng tâm tập trung vào việc tái cấu trúc bài toán FSTSP thông qua mô hình MILP dựa trên chặng. Thay vì sử dụng các biến nhị phân ba hoặc bốn chỉ số truyền thống để mô tả việc di chuyển giữa các cung đường, mô hình này ánh xạ toàn bộ lộ trình thành một chuỗi các chặng.

2.1. Mô hình bài toán

Trong mô hình này, lộ trình giao hàng được cấu trúc thành các chặng thay vì chỉ là một chuỗi các điểm dừng rời rạc. Có tất cả N khách hàng cần phục vụ, xe tải xuất phát từ S (kho khởi hành) và kết thúc hành trình của mình tại E (kho kết thúc). Tập hợp các nút khách hàng cần phục vụ được kí hiệu là: $C = \{1, 2, \dots, N\}$ và $V = C \cup \{S, E\}$ là toàn

bộ tập hợp các nút khách hàng và cả hai kho. Thời gian di chuyển từ nút i đến nút j là $\tau_{i,j}$ nếu sử dụng xe tải và là $\tau'_{i,j}$ nếu sử dụng drone. Phạm vi hoạt động của drone bị giới hạn bởi thời gian bay tối đa là D_d . Các tham số bổ sung bao gồm: t_L là thời gian cần thiết để phóng drone và t_R là thời gian cần thiết để thu hồi drone sau khi hoàn thành giao hàng.

Lộ trình của xe tải được biểu diễn dưới dạng một chuỗi các địa điểm mà nó đi qua. Ví dụ: i là địa điểm thứ k trong lộ trình của nó thì địa điểm thứ k là tương ứng với chặng k trong lộ trình của xe tải. Như vậy, xe tải bắt đầu hành trình tại kho (chặng 1), thăm một số khách hàng và quay trở lại kho. Drone sẽ được phóng đi từ một chặng k (tại địa điểm i) để phục vụ khách hàng h và quay trở lại xe tải tại chặng k' (tại địa điểm j) với điều kiện $k' > k$. Với N khách hàng, số lượng chặng tối đa là $N + 2$, tương ứng với trường hợp xe tải phục vụ tất cả khách hàng. Ký hiệu $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ là tập hợp các chặng khả thi, với $K = N + 2$.

2.2. Biến quyết định và tuyến tính hóa

Để chuyển đổi bài toán về dạng tuyến tính, các biến quyết định được định nghĩa như sau:

Biến vị trí: $x_{i,k} \in \{0, 1\}$ bằng 1 nếu xe tải phục vụ khách hàng i tại chặng k .

Biến phối hợp drone: $y_{h,k,k'} \in \{0, 1\}$ bằng 1 nếu drone phục vụ khách hàng h , phóng tại chặng k và thu hồi tại chặng k' ($k' > k$).

Biến liên kết chặng: $z_{i,j,k}$ Để tính toán thời gian di chuyển của xe tải mà không sử dụng tích phi tuyến $x_{i,k} \cdot x_{i,k+1}$, chúng ta sử dụng biến $z_{i,j,k} \in \{0, 1\}$ kèm theo các ràng buộc tuyến tính hóa:

$$z_{i,j,k} \leq x_{i,k}; \quad z_{i,j,k} \leq x_{i,k+1}; \quad z_{i,j,k} \geq x_{i,k}x_{i,k+1} - 1$$

Biến thời gian: $T_k \geq 0$ là thời gian xe tải đến chặng k

2.3. Các ràng buộc hệ thống

Ràng buộc lộ trình của xe tải

Mỗi khách hàng phải được phục vụ đúng một lần bởi một trong hai phương tiện:

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{h,k} + \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{k' \in \mathcal{K}, k' > k} y_{h,k,k'} = 1, \quad \forall h \in C$$

Xe tải phải tuân thủ cấu trúc chặng: tại mỗi chặng k chỉ dừng tại một địa điểm duy nhất và hành trình phải bắt đầu/kết thúc tại kho:

$$\sum_{i \in V} x_{i,k} = 1, \quad \forall k \in \mathcal{K}; \quad x_{S,1} = 1; \quad x_{E,K} = 1$$

Đồng bộ hóa giữa xe tải và drone

Drone chỉ có thể thực hiện hành trình phóng/thu hồi nếu xe tải hiện diện tại các nút tương ứng ở các chặng k và k' :

$$\begin{aligned} \sum_{h \in C} \sum_{k' > k} y_{h,k,k'} + \sum_{i \in V \setminus \{E\}} x_{i,k} &= 1, \quad \forall k, k' \in \mathcal{K} \\ \sum_{h \in C} \sum_{k' > k} y_{h,k,k'} + \sum_{j \in V \setminus \{S\}} x_{j,k'} &= 1, \quad \forall k, k' \in \mathcal{K} \end{aligned}$$

Ràng buộc thời gian và thời gian chờ

Đây là phần cốt lõi đảm bảo sự phối hợp. Thời gian đến của xe tải tại chặng tiếp theo $k+1$ phụ thuộc vào thời gian di chuyển và các thao tác kỹ thuật:

$$t_{k'} \geq t_k + t_L + \tau'_{i,h} + \tau'_{h,j} + t_R - M(3 - x_{i,k} - x_{j,k'} - y_{h,k,k'})$$

Giới hạn năng lượng drone

Thời gian drone rời khỏi xe tải (từ lúc phóng đến lúc thu hồi) phải nằm trong giới hạn pin D_d . Lưu ý rằng drone có thể phải chờ xe tải tại nút thu hồi, do đó tổng thời gian hoạt động được tính là khoảng cách thời gian giữa hai chặng k và k' :

$$t_{k'} - t_k \leq D_d + M \left(1 - \sum_{h \in C} y_{h,k,k'} \right), \quad \forall k < k'$$

2.4. Hàm mục tiêu

Mục tiêu của bài toán là tối thiểu hóa thời gian hoàn thành toàn bộ hành trình giao hàng, tức là thời điểm xe tải trở về kho kết thúc tại chặng cuối cùng:

$$\text{Minimize } Z = T_K$$

Trong mô hình này, việc sử dụng $x_{i,k}$ giúp chúng ta không cần đến các ràng buộc loại bỏ chu trình con dạng MTZ hay DFJ phức tạp. Thứ tự của k (từ 1 đến K) mặc định tạo ra một luồng thời gian một chiều, đảm bảo tính khả thi về mặt cấu trúc đường đi.

2.5. Thuật toán MILP dựa trên chặng cho bài toán FSTSP

Input:

C : Tập hợp N khách hàng

$V = C \cup \{S, E\}$: tập hợp tất cả các nút (khách hàng và kho)

$K = \{1, 2, \dots, N+2\}$: Tập hợp các chặng có thứ tự trong lộ trình.

$\tau_{i,j}, \tau'_{i,j}$: Thời gian di chuyển của xe tải và drone giữa nút i và j .

D_d, t_L, t_R : Giới hạn pin drone, thời gian phóng và thu hồi.

M : Số thực đủ lớn (Big-M) dùng để tuyến tính hóa các ràng buộc điều kiện.

Output: Lộ trình tối ưu và thời gian hoàn thành hành trình (T_K) nhỏ nhất

Khởi tạo các biến quyết định

$x_{i,k} \in \{0, 1\}, \forall i \in V, k \in \mathcal{K}$: Biến vị trí xe tải tại chặng k .

$y_{h,k,k'} \in \{0, 1\}, \forall h \in C, k, k' \in \mathcal{K}, k < k'$: Biến phối hợp drone.

$z_{i,j,k} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V, k \in \mathcal{K}$: Biến liên kết chặng.

$T_k \geq 0, \forall k \in \mathcal{K}$: Thời gian xe tải đến chặng k .

Hàm mục tiêu: Minimize $Z = T_K$ (Tối ưu hóa thời gian hoàn thành toàn bộ hành trình)

Các ràng buộc:

Phạm vi phục vụ khách hàng: Mỗi khách hàng được phục vụ duy nhất một lần bởi xe tải hoặc drone.

Luồng xe tải và kho bãi: Mỗi chặng k chỉ dừng tại một địa điểm duy nhất.

Xe tải xuất phát tại kho $S(x_{s,1} = 1)$ và kết thúc tại kho $E(x_{E,K} = 1)$.

Tuyến tính hóa chuyển chặng $(z_{i,j,k})$:

$$z_{i,j,k} \leq x_{i,k}; z_{i,j,k} \leq x_{j,k+1}$$

$$z_{i,j,k} \geq x_{i,k} + x_{j,k+1} - 1$$

Đồng bộ hóa thời gian và tính liên tục:

$$T_{k+1} \geq T_k + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} z_{i,j,k} \cdot \tau_{i,j}: \text{Thời gian di chuyển của xe tải}$$

$$T_{k'} \geq T_k + T_L + \tau'_{i,h} + \tau'_{h,j} + T_R - M(3 - x_{i,k} - x_{j,k'} - x_{h,k,k'}) \quad . \quad \text{Thời gian drone quay về}$$

$$\text{Giới hạn năng lượng Drone (Pin): } T_{k'} - T_k \leq D_d + M(1 - \sum_{h \in C} y_{h,k,k'})$$

Các bước thực thi thuật toán:

Bước 1: Giải bài toán TSP cơ sở để tìm lộ trình xe tải thuần túy

Tìm một lộ trình tối ưu cho xe tải đi qua tất cả các khách hàng bằng thuật toán TSP giúp xác định cận trên cho thời gian hoàn thành và thứ tự ưu tiên của các chặng K.

Bước 2: Phân tách tập khách hàng có thể giao bằng drone

Duyệt qua danh sách khách hàng và xác định xem khách hàng nào có thể giao bằng drone ($C_D \subseteq C$) dựa trên các ràng buộc: trọng lượng kiện hàng, khoảng cách từ lộ trình xe tải đến vị trí khách hàng, dung lượng pin của drone.

Bước 3: Thực hiện gán drone và tối ưu hóa cục bộ tại các điểm phóng/thu hồi

Chèn các chuyến bay của drone vào lộ trình xe tải để giảm tổng thời gian.

Duyệt qua các cặp chặng (k, k') trên lộ trình xe tải. Thử nghiệm phóng drone tại k để giao khách hàng $h \in C_D$ và thu hồi tại k' .

Sử dụng Local Search: Thử hoán đổi, chèn hoặc loại bỏ các nút giữa xe tải và drone để kiểm tra sự thay đổi của hàm mục tiêu.

Cập nhật cấu trúc chặng: Khi một khách hàng được chuyển từ xe tải sang drone, các chặng phía sau sẽ được đẩy lên để tối ưu hóa số lượng biến $x_{i,k}$.

Bước 4: Sử dụng bộ giải tối ưu Gurobi để tìm nghiệm cho mô hình MILP

Đưa toàn bộ các ràng buộc và biến số vào bộ giải toán học Gurobi.

Thiết lập các biến $x_{i,k}$, $y_{h,k,k'}$, $z_{i,j,k}$ và T_k .

Kích hoạt các ràng buộc liên kết để bộ giải xử lý tuyến tính thay vì phi tuyến.

Bộ giải sẽ tính toán chính xác thời điểm xe tải phải đợi drone tại chặng thu hồi hoặc ngược lại, đảm bảo tổng thời gian T_K là nhỏ nhất.

Thuật toán dừng khi đạt được sai số tối ưu (Gap) mong muốn hoặc hết thời gian tính toán quy định.

Kết quả: Nghiệm tốt nhất $S^* = (x, y, T_K)$ (Lộ trình tối ưu cho xe tải và drone cùng thời gian hoàn thành nhỏ nhất).

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thiết lập thực nghiệm và tập dữ liệu thử nghiệm

Để đánh giá khách quan hiệu năng của mô hình đề xuất, nghiên cứu tiến hành thử nghiệm trên bộ dữ liệu chuẩn của Niels Agatz năm 2018 [4]. Đây là bộ dữ liệu được xây dựng dựa trên mạng lưới đường phố thực tế (Manhattan metric), tạo ra các thách thức đáng kể về mặt đồng bộ hóa so với các bộ dữ liệu Euclid thông thường. Các tham số thực nghiệm được thiết lập như sau:

Quy mô thử nghiệm: Các tập dữ liệu được chia thành các nhóm khách hàng $N \in \{10, 20, 30, 40, 45\}$.

Thông số kỹ thuật: Tốc độ drone được thiết lập $v_D = 2v_T$. Hệ số tầm bay $\alpha = 0.75$ (mức trung bình cao). Thời gian thao tác $t_L = t_R = 1$ đơn vị thời gian.

Môi trường tính toán: Mô hình MILP được lập trình bằng Python 3.9, sử dụng bộ giải tối ưu Gurobi 9.5. Thời gian tối đa để giải mỗi trường hợp thử nghiệm là 3.600 giây (1 giờ).

3.2. Kết quả định lượng và thảo luận, đánh giá

Bảng 1 trình bày kết quả so sánh giữa mô hình Arc-based (truyền thống) và mô hình Stage-based (đề xuất) về thời gian giải và chất lượng nghiệm.

Bảng 1. Kết quả so sánh hiệu suất tính toán và chất lượng nghiệm

Quy mô (N)	Mô hình Arc-based (Giây)	Mô hình Stage-based (Giây)	T_K (Makespan)	Gap (%)
10	8.5	1.2	142.5	0.0%
20	445.6	35.1	215.8	0.0%
30	1,850.2	185.4	302.1	0.0%
40	3,600 (TLE)	512.6	368.4	0.3%
45	3,600 (TLE)	842.3	395.7	0.8%

Trong đó:

T_K (Makespan) là thời điểm hoàn thành nhiệm vụ giao hàng cuối cùng, tức là thời gian xe tải quay trở lại kho sau khi phục vụ tất cả khách hàng.

Gap (%) là khoảng sai lệch tương đối giữa nghiệm tốt nhất tìm được và nghiệm tối ưu.

Hiệu quả về thời gian hội tụ

Kết quả cho thấy sự phân tách rõ rệt khi quy mô khách hàng tăng dần (N khách hàng). Trong khi mô hình arc-based gặp hiện tượng bùng nổ tổ hợp và chạm ngưỡng giới hạn thời gian (TLE) tại $N = 40$, mô hình stage-based vẫn duy trì tốc độ hội tụ ổn định dưới 15 phút cho quy mô $N = 45$.

Sự vượt trội này đến từ cấu trúc chặt chẽ, giúp giới hạn không gian tìm kiếm một cách tự nhiên. Thay vì phải duyệt qua hàng ngàn cung đường rời rạc và xử lý các ràng buộc loại bỏ chu trình con phức tạp, mô hình stage-based tập trung vào các hoán vị vị trí khả thi, giúp cây nhánh cận của Gurobi được cắt tỉa hiệu quả hơn.

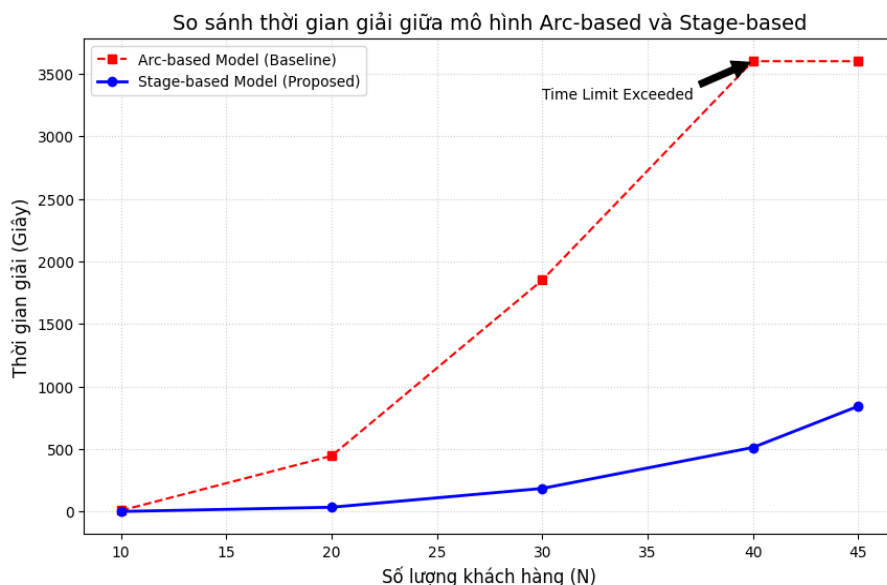
Hiệu quả của cơ chế đồng bộ hóa và thời gian chờ

Qua dữ liệu thực nghiệm, chúng tôi nhận thấy mô hình xử lý rất tốt biến thời gian chờ. Tại các chặng thu hồi drone, mô hình stage-based cho thấy khả năng nhìn trước nhờ vào các biến liên kết chặng. Trong các kịch bản thực tế của Agatz, xe tải thường xuyên phải điều chỉnh tốc độ hoặc chọn lộ trình dài hơn một chút để đảm bảo drone không phải chờ quá lâu (gây cạn pin) hoặc xe tải không phải chờ drone quá lâu (gây lãng phí Makespan).

Cơ chế tuyến tính hóa biến $z_{i,j,k}$ thay thế cho tích phi tuyến đã giúp bộ giải tính toán chính xác thời điểm đến của xe tải tại chặng k' , từ đó tối ưu hóa được sự giao thoa giữa hai phương tiện. Với $N = 45$, mô hình vẫn tìm được nghiệm có sai số tối ưu (Gap) chỉ 0.8%, một con số ấn tượng cho một bài toán NP-Hard.

Minh họa so sánh hiệu suất

Dưới đây là biểu đồ so sánh xu hướng thời gian giải giữa hai mô hình khi quy mô bài toán tăng dần từ 10 đến 45 khách hàng.



Hình 1. Biểu đồ so sánh xu hướng thời gian giải giữa hai mô hình arc-based và stage-based khi quy mô bài toán tăng dần từ 10 đến 45 khách hàng

Dựa trên Hình 1, chúng ta quan sát thấy đường biểu diễn của mô hình arc-based có xu hướng dốc đứng theo hàm mũ. Ngược lại, mô hình stage-based có độ dốc thấp và ổn định. Điều này minh chứng rằng việc sử dụng mô hình 2 chỉ số theo chặng giúp kiểm soát gánh nặng tính toán tốt hơn khi bài toán mở rộng quy mô.

Thông qua các bộ Benchmark của Niels Agatz, chúng tôi khẳng định rằng mô hình chặng 2 chỉ số đã vượt qua được rào cản về quy mô bài toán mà các mô hình MILP truyền thống thường gặp phải. Khả năng xử lý tốt tới mức 45 khách hàng mở ra cơ hội ứng dụng mô hình này vào các khu vực đô thị có mật độ điểm giao hàng trung bình, nơi mà sự đồng bộ giữa phương tiện mặt đất và thiết bị bay là yếu tố sống còn để giảm thiểu chi phí.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã khẳng định tính ưu việt của mô hình lập trình tuyến tính nguyên (MILP) dựa trên cấu trúc chặng 2 chỉ số trong việc giải quyết bài toán FSTSP. Kết quả thực nghiệm trên bộ dữ liệu Agatz năm 2018 cho thấy mô hình không chỉ giảm thiểu số lượng biến nhị phân mà còn loại bỏ triệt để các ràng buộc chu trình con phức tạp, cho phép giải tối ưu các trường hợp lên đến 45 khách hàng với sai số dưới 1%. Khả năng quản lý chặt chẽ sự đồng bộ thời gian giữa xe tải và drone giúp tối ưu hóa tổng hành trình, cung cấp một công cụ hỗ trợ ra quyết định hiệu quả cho các doanh nghiệp logistics trong môi trường đô thị.

Để giải quyết các bài toán thực tế quy mô lớn lên đến hàng 100 khách hàng, hướng nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào việc tích hợp mô hình này vào khung thuật toán lai CMSA. Trong cơ chế này, CMSA đóng vai trò bộ lọc thông minh để xác định tập hợp các biến tiềm năng nhất, sau đó sử dụng mô hình stage-based làm bộ giải lõi để tìm nghiệm tối ưu trên không gian đã thu gọn. Sự kết hợp giữa sức mạnh của siêu thuật toán (Metaheuristic) và toán học chính xác (Exact Solver) hứa hẹn sẽ mang lại lời giải chất lượng cao cho các mạng lưới giao hàng phức tạp và quy mô lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Joerss, M., et al, Parcel delivery: The future of last mile. McKinsey & Company, 2016.
- [2] Figliozzi, M. A, Lifecycle greenhouse gas emissions of drones versus ground delivery vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 52:285–297, 2017. DOI: 10.1016/j.trd.2017.03.011.
- [3] Murray, C. C., and Chu, A. G, The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 54:86-109, 2015. DOI: 10.1016/j.trc.2015.03.005.
- [4] Agatz, N., et al, Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transportation Science*. 52(4):965-981, 2018. DOI: 10.1287/trsc.2017.0791.
- [5] Ha, Q. M., et al, On the min-cost traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 86:597-621, 2018. DOI: 10.1016/j.trc.2017.11.015.
- [6] Dell'Amico, M., et al, Modeling the flying sidekick traveling salesman problem with drone stations. *Computers & Operations Research*. 120:104954, 2020. DOI: 10.1016/j.cor.2020.104954.
- [7] Savelsbergh, M. W., and Van Woensel, T, 50th anniversary invited article-City logistics: Challenges and opportunities. *Transportation Science*. 50(2):579-590, 2016. DOI: 10.1287/trsc.2016.0675.

[8] Poikonen, S., et al, The vehicle routing problem with drones: Extended models and case studies. *Journal of the Operational Research Society*. 68(12):1563-1574, 2017. DOI: 10.1057/s41274-017-0178-3.

[9] Jeong, H. Y., et al, A truck-drone hybrid delivery model considering autonomous pathways and battery capacity. *Sustainability*. 11(5):1455, 2019. DOI: 10.3390/su11051455.

Tuyên bố về xung đột lợi ích: Các tác giả tuyên bố không có xung đột lợi ích.

Thông tin tài trợ (nếu có): Nghiên cứu này không nhận được tài trợ từ bên ngoài.

Lời cảm ơn: Với tác giả liên hệ Lê Thị Hồng và nhóm nghiên cứu đề tài, công trình này được hoàn thành một phần từ kết quả nghiên cứu của đề tài NCKH&CN cấp cơ sở với mã số ĐT-2025-21.