



Ứng dụng bài toán định vị cơ sở và phân tích kịch bản trong tối ưu hóa mạng lưới phân phối

Application of facility location problems and scenario analysis in distribution network optimization

Đặng Thu Thảo^{1,*}, Tạ Việt Hà¹, Phạm Bùi Khánh Linh¹, Lê Thế Minh¹, Phạm Ngọc Diệp¹, Nguyễn Thị Lê Hằng²

¹ Viện Đào tạo Quốc tế, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

² Khoa Kinh tế, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam

Từ khóa:

Bài toán định vị cơ sở đa mục tiêu;
Lập trình nguyên hỗn hợp tuyến tính mờ;
Phân tích kịch bản;
Thuật toán chính xác;
Thuật toán meta-heuristic.

TÓM TẮT:

Nghiên cứu giải quyết bài toán định vị cơ sở đa mục tiêu FLP (Facility Location Problem) nhằm tối ưu hóa mạng lưới chuỗi cung ứng và logistics tại Việt Nam. Nghiên cứu này sử dụng mô hình FMILP (Fuzzy Mixed-Integer Linear Programming) gồm 2 thuật toán chính xác và thuật toán meta-heuristic kết hợp với phân tích kịch bản để giải quyết bài toán trong điều kiện bất định. Mô hình được áp dụng và kiểm chứng dựa trên dữ liệu thực tế từ một doanh nghiệp tại Hải Phòng. Từ các dữ liệu đầu vào như đơn hàng, vị trí các kho và các ràng buộc liên quan, nghiên cứu giải quyết bài toán định vị kho nhằm đề xuất vị trí kho tối ưu cho mạng lưới phân phối. Kết quả cho thấy mô hình đề xuất giúp giảm chi phí logistics (giảm 23,6% chi phí vận hành và 17,8% tổng quãng đường), rút ngắn thời gian giao hàng và nâng cao mức độ đáp ứng nhu cầu (tăng 7% tỷ lệ đáp ứng), qua đó khẳng định hiệu quả của cách tiếp cận FLP dựa trên FMILP và tiềm năng ứng dụng cho logistics bền vững tại Việt Nam.

Keywords:

Multi-objective facility location problem;
Fuzzy mixed-integer linear programming;
Scenario analysis;
Exact algorithms;
Meta-heuristic algorithms.

ABSTRACT:

This study addresses a multi-objective Facility Location Problem (FLP) to optimize supply chain and logistics network design in Vietnam. The proposed framework is formulated as a Fuzzy Mixed-Integer Linear Programming (FMILP) model and solved using a combination of exact and meta-heuristic algorithms, along with scenario-based analysis to address uncertainty. The model is empirically validated using real-world operational data from a logistics enterprise in Hai Phong, incorporating demand information, candidate warehouse locations, and system constraints. The results indicate that the proposed model significantly reduces logistics costs (a 23.6% reduction in operating costs and a 17.8% reduction in total travel distance), shortens delivery time, and improves service performance (a 7% increase in demand fulfillment rate). These findings confirm the effectiveness of the FMILP-based FLP model and highlight its potential for supporting sustainable and data-driven logistics development in Vietnam.

* Đặng Thu Thảo. Viện Đào tạo Quốc tế, Trường Đại học Hàng Hải Việt Nam.

Email: dthuthao2712@gmail.com

<https://www.doi.org/10.55228/JTST150204>

Ngày nhận bài: 30/12/2025; Ngày nhận bài sửa: 27/02/2026; Ngày chấp nhận đăng: 13/03/2026

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/03/2026

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

1. Giới thiệu

Phần lớn doanh nghiệp, đặc biệt là doanh nghiệp vừa và nhỏ, vẫn chủ yếu dựa vào kinh nghiệm định tính và phương pháp thủ công để thiết kế mạng lưới phân phối, cụ thể là trong việc tối ưu hóa vị trí kho. Điều này dẫn đến chi phí vận hành cao (ước tính chiếm khoảng 16-18% GDP theo các báo cáo gần đây [1]), đồng thời mạng lưới kho bãi tại các khu công nghiệp chưa được phân bố hợp lý [2], dẫn đến tình trạng sử dụng công suất không đồng đều và lãng phí nguồn lực, thường xuyên chậm trễ trong việc giao hàng. Hệ thống kho trong nước còn phân tán, phụ thuộc lớn vào nhà đầu tư nước ngoài, với doanh nghiệp FDI kiểm soát khoảng 75% thị phần kho hiện đại [3]. Những yếu tố này khiến doanh nghiệp nội địa khó tiếp cận hạ tầng chất lượng cao và vận hành hiệu quả.

Trong tối ưu hóa mạng lưới chuỗi phân phối, bài toán định vị cơ sở FLP (Facility Location Problem) đóng vai trò then chốt nhằm giảm chi phí vận hành, thời gian giao hàng và nâng cao mức độ đáp ứng nhu cầu. Hiện nay, nhiều mô hình đã được đề xuất để giải quyết bài toán định vị cơ sở và tối ưu hóa mạng lưới, song phần lớn vẫn mang tính tĩnh với tham số cố định. Các mô hình này thường không phản ánh đầy đủ các biến động thực tế như tắc nghẽn giao thông nghiêm trọng, đặc biệt tại các khu vực cảng lớn như Hải Phòng, gây áp lực lớn lên hệ thống đường bộ và tăng chi phí vận hành [1], cùng với biến động nhu cầu theo mùa vụ hoặc các yếu tố bất định khác. Hậu quả là tính linh hoạt của mạng lưới giảm sút, tỷ lệ giao hàng đúng hạn thường chưa đạt mức tối ưu và hiệu quả tổng thể của hệ thống logistics bị ảnh hưởng nghiêm trọng.

Trước thực trạng đó, nghiên cứu tập trung giải quyết bài toán định vị cơ sở đa mục tiêu (FLP) trong điều kiện bất định nhằm tối ưu hóa mạng lưới chuỗi cung ứng và logistics tại Việt Nam. Nghiên cứu sử dụng mô hình lập trình nguyên hỗn hợp tuyến tính mờ FMILP (Fuzzy Mixed-Integer Linear Programming) kết hợp phân tích kịch bản đa tình huống, thuật toán chính xác và thuật toán meta-heuristic để xác định vị trí, số lượng và quy mô kho tối ưu trong mạng lưới phân phối hiện có. Cách tiếp cận này hướng tới việc nâng cao khả năng thích ứng của mạng lưới trước các biến động thực tế, đồng thời góp phần phát triển logistics hiệu quả và bền vững tại Việt Nam.

2. Tổng quan nghiên cứu

2.1. Cơ sở lý thuyết

Bài toán định vị cơ sở FLP (Facility Location Problem) là một trong những bài toán tối ưu hóa cốt lõi trong lĩnh vực quản trị chuỗi cung ứng và logistics. Bài toán này nhằm xác định số lượng, vị trí và quy mô các cơ sở (như kho bãi hoặc trung tâm phân phối) sao cho tổng chi phí vận hành, chi phí vận chuyển và các chỉ tiêu dịch vụ đạt mức tối ưu, đồng thời thỏa mãn nhu cầu khách hàng dưới các ràng buộc về nguồn lực [4], [5]. FLP thường được mở rộng thành dạng đa mục tiêu để cân bằng giữa chi phí kinh tế và các yếu tố khác như thời gian giao hàng hoặc mức độ bao phủ dịch vụ.

Trong môi trường logistics thực tế, các tham số đầu vào thường chịu ảnh hưởng của điều kiện bất định, chẳng hạn biến động nhu cầu theo mùa vụ, chi phí vận tải thay đổi hoặc tắc nghẽn giao thông. Các mô hình truyền thống với tham số cố định khó phản ánh đầy đủ những biến động này, dẫn đến nghiệm thiếu tính bền vững.

Để khắc phục hạn chế trên, nghiên cứu này áp dụng lý thuyết tập mờ (fuzzy set theory) làm nền tảng xử lý điều kiện bất định. Lý thuyết tập mờ, được Zadeh đề xuất năm 1965, cho phép thể hiện các thông tin không chính xác hoặc mang tính chủ quan thông qua hàm thuộc (membership function), thay vì các giá trị điểm chính xác [6]. Trong các ứng dụng chuỗi cung ứng, số mờ tam giác TFN (Triangular Fuzzy Numbers) được ưu tiên sử dụng nhờ tính đơn giản và khả năng mô tả ba mức độ ước lượng: bi quan, khả dĩ nhất và lạc quan. Cách biểu diễn này phù hợp để chuyển đổi dữ liệu thành tham số đầu vào đáng tin cậy [7], [8].

Trên cơ sở lý thuyết tập mờ, bài toán FLP được mô hình hóa dưới dạng lập trình nguyên hỗn hợp tuyến tính mờ FMILP (Fuzzy Mixed-Integer Linear Programming). Mô hình FMILP sử dụng số mờ làm tham số đầu vào và áp dụng các kỹ thuật khử mờ (defuzzification) như phương pháp trung bình trọng số hoặc xếp hạng mờ để chuyển đổi về dạng dễ giải [9]. FMILP đặc biệt hiệu quả trong bài toán định vị cơ sở đa mục tiêu dưới điều kiện bất định, vì nó cho phép xử lý đồng thời các hàm mục tiêu mâu thuẫn (tối thiểu chi phí cố định, chi phí vận chuyển và khoảng cách trung bình) trong khi vẫn đảm bảo các ràng buộc

về công suất, bảo toàn dòng chảy và đáp ứng nhu cầu mờ.

Việc giải mô hình FMILP gặp thách thức lớn do FLP thuộc lớp bài toán NP-hard với độ phức tạp tổ hợp cao, đặc biệt khi quy mô mạng lưới lớn và có điều kiện bất định. Các phương pháp giải được phân loại thành hai nhóm chính: Thuật toán chính xác (exact algorithms), bao gồm Branch-and-Bound, Benders Decomposition và Branch-and-Price-and-Cut, đảm bảo tìm nghiệm tối ưu tuyệt đối. Các thuật toán này phù hợp với bài toán quy mô nhỏ đến trung bình và thường đóng vai trò chuẩn kiểm chứng chất lượng

nghiệm [10], [11], [12]. Thuật toán meta-heuristic, bao gồm thuật toán di truyền GA (Genetic Algorithm), mô phỏng SA (Simulated Annealing), tìm kiếm cấm kỵ TS (Tabu Search) và GRASP, tập trung tìm nghiệm chất lượng cao trong thời gian cho phép. Chúng đặc biệt hiệu quả với bài toán quy mô lớn hoặc cần đánh giá nhanh nhiều biến thể [13], [14], [15].

Bảng 1 tổng hợp các nghiên cứu tiêu biểu trong lĩnh vực định vị cơ sở và tối ưu hóa trong môi trường bất định, từ đó cho thấy sự khác biệt về mô hình và phương pháp so với nghiên cứu hiện tại.

Bảng 1. So sánh các nghiên cứu về bài toán định vị cơ sở và tối ưu hóa mờ.

Tác giả	Loại bài toán	Xem xét yếu tố bất định	Sử dụng số mờ tam giác	Phương pháp giải	Bối cảnh ứng dụng	Hạn chế so với nghiên cứu này
Zadeh (1965)	Lý thuyết tập mờ	Có	X	Nền tảng lý thuyết	Mô hình lý thuyết	Không phải mô hình tối ưu hóa ứng dụng
Owen & Daskin (1998)	Định vị cơ sở chiến lược	X	X	Mô hình quy hoạch toán học tất định	Mô hình lý thuyết	Không xét môi trường bất định
Delmaire et al. (1999)	Định vị nhà máy có công suất	X	X	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) và Tabu Search	Mô hình lý thuyết	Không xét yếu tố mờ
Holmberg et al. (1999)	Định vị cơ sở một nguồn có công suất	X	X	Exact	Mô hình lý thuyết	Mô hình tất định
Current et al. (2001)	Bài toán định vị mạng rời rạc	X	X	Mô hình lý thuyết	Mô hình lý thuyết	Không tích hợp yếu tố mờ
Klose & Drexl (2005)	Mô hình định vị cho thiết kế hệ thống phân phối	X	X	Quy hoạch toán học	Hệ thống phân phối	Không xét bất định
Pour & Nosraty (2006)	Định vị và bố trí cơ sở	X	X	Ant Colony Optimization (ACO)	Mô hình lý thuyết	Không xét bất định
Selim & Ozkarahan (2006)	Thiết kế mạng lưới phân phối	Có	Có	Quy hoạch mục tiêu mờ	Chuỗi cung ứng	Không tập trung vào mô hình định vị cơ sở chuẩn
Snyder (2006)	Định vị cơ sở dưới điều kiện bất định	Có	X	Tổng quan lý thuyết	Mô hình lý thuyết	Không sử dụng tập mờ

Tác giả	Loại bài toán	Xem xét yếu tố bất định	Sử dụng số mờ tam giác	Phương pháp giải	Bối cảnh ứng dụng	Hạn chế so với nghiên cứu này
Melo et al. (2009)	Định vị cơ sở và quản trị chuỗi cung ứng	X	X	Tổng quan học thuật	Chuỗi cung ứng	Không xây dựng mô hình mờ
Mula et al. (2010)	Quy hoạch tuyến tính trong chuỗi cung ứng	X	X	Quy hoạch toán học	Mô hình lý thuyết	Không xử lý bài toán định vị cơ sở
Tohyama et al. (2011)	Định vị cơ sở X ràng buộc công suất	X	X	Genetic Algorithm (GA)	Mô hình lý thuyết	Không tích hợp yếu tố mờ
Görtz & Klose (2012)	Định vị cơ sở có công suất	X	X	Branch-and-Bound	Mô hình lý thuyết	Không xét bất định
Fischetti et al. (2016)	Định vị cơ sở có ràng buộc công suất	X	X	Benders Decomposition	Mô hình lý thuyết	Không xét yếu tố bất định
Gadegaard et al. (2018)	Định vị cơ sở một nguồn có công suất	X	X	Cut-and-solve	Mô hình lý thuyết	Không tích hợp yếu tố mờ
Dong et al. (2021)	Phương pháp ra quyết định đa tiêu chí	Có	Có	Fuzzy Best-Worst Method (FBWM)	Mô hình lý thuyết	Không phải bài toán định vị
Wang et al. (2023)	Định vị cơ sở đa mục tiêu có xét tắc nghẽn	Có	Có	Mô hình định vị mờ đa mục tiêu	Giao hàng khẩn cấp bằng thiết bị bay	Không áp dụng cho bối cảnh logistics Việt Nam

Bảng trên cho thấy phần lớn các nghiên cứu trước đây về bài toán định vị cơ sở (FLP) tập trung vào mô hình tất định và các thuật toán chính xác hoặc metaheuristic để giải quyết bài toán có/không ràng buộc công suất. Một số nghiên cứu đã xem xét yếu tố bất định thông qua lý thuyết tập mờ và số mờ tam giác trong bối cảnh lập kế hoạch chuỗi cung ứng, tuy nhiên chưa tích hợp trực tiếp vào mô hình FLP chuẩn.

Vì vậy nghiên cứu này sử dụng cách tiếp cận kết hợp meta-heuristic để cải thiện nghiệm và thuật toán chính xác để kiểm chứng. Cụ thể, chúng tôi sử dụng Branch-and-Bound (với chiến lược branching theo biến nhị phân y_i ưu tiên các biến có phân số gần 0.5 trong relaxation tuyến tính để tăng tốc hội tụ, bounding bằng cách sử dụng relaxation Lagrange để ước lượng giới dưới chặt chẽ hơn và cắt nhánh dựa trên quy tắc cắt nhánh dựa trên tính khả thi và giới

hạn (fathom by infeasibility, optimality, or bound) nhằm loại bỏ các nhánh không hứa hẹn sớm) làm thuật toán chính xác chủ đạo cho quy mô nhỏ đảm bảo nghiệm tối ưu toàn cục mà không cần metaheuristic phức tạp với thời gian tính toán ngắn (dưới 1 phút trên máy tính tiêu chuẩn); kết hợp với thuật toán di truyền GA (mã hóa nghiệm dưới dạng chuỗi nhị phân đại diện vị trí kho mở/đóng, hàm fitness dựa trên tổng trọng số mục tiêu Z để đánh giá chất lượng giải pháp, toán tử lai ghép một điểm (single-point crossover) với tỷ lệ 0.8 để duy trì đa dạng, đột biến đảo bit với tỷ lệ 0.01 để tránh hội tụ cục bộ, và chọn lọc roulette wheel để ưu tiên các cá thể tốt hơn) để cải thiện nghiệm ban đầu và hỗ trợ phân tích kịch bản nhanh chóng. Việc chọn Branch-and-Bound làm chủ đạo là hợp lý vì quy mô nhỏ cho phép tìm nghiệm chính xác nhanh chóng, trong khi GA chỉ được sử

dùng bổ sung để kiểm tra độ ổn định của nghiệm và xử lý các biến thể kịch bản, tránh lãng phí tài nguyên cho meta-heuristic không cần thiết ở quy mô tập số liệu nhỏ [11], [16] Kết quả được đánh giá bổ sung qua phân tích kịch bản, nhằm đảm bảo cấu hình mạng lưới kho đề xuất có tính linh hoạt và bền vững cao trong điều kiện bất định thực tế của ngành logistics Việt Nam.

2.2. Khoảng trống nghiên cứu

Mặc dù trên thế giới đã có nhiều công trình nghiên cứu về bài toán định vị cơ sở (FLP) trong điều kiện bất định, phần lớn vẫn tồn tại những hạn chế đáng kể. Các nghiên cứu truyền thống thường sử dụng mô hình với tham số cố định, chưa phản ánh đầy đủ các biến động thực tế về nhu cầu, chi phí vận tải hay rủi ro trong mạng lưới chuỗi cung ứng [16], [17]. Đồng thời, đưa bài toán định vị cơ sở vào thiết kế mạng lưới chuỗi cung ứng bền vững chủ yếu dừng ở mức mô phỏng hoặc sử dụng dữ liệu giả lập, chưa triển khai đồng bộ cơ chế tái tối ưu liên tục kết hợp dữ liệu thực tế [18], [19], [20].

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về quy hoạch kho bãi và kho vẫn chủ yếu mang tính mô tả, phạm vi hẹp hoặc dựa trên phân tích định tính. Các báo cáo ngành cho thấy hệ thống kho còn phân tán, thiếu mô hình định lượng hỗ trợ ra quyết định, dữ liệu chưa được chuẩn hóa và hầu như chưa có công trình ứng dụng FLP hiện đại dưới điều kiện bất định và định tuyến [7], [3], [20]. Đặc biệt, chưa có nghiên cứu nào áp dụng đồng thời thuật toán chính xác tiên tiến (như Branch-and-Bound, Benders Decomposition hoặc Branch-and-Price-and-Cut) để giải bài toán FLP đa mục tiêu trong điều kiện bất định, dù đây là hướng khuyến nghị từ các công trình quốc tế gần đây [21], [22], [23].

Qua tra cứu các cơ sở dữ liệu học thuật trong nước đến tháng 12/2025, chưa ghi nhận công trình nào đồng thời thỏa mãn các tiêu chí sau:

(i) Giải quyết bài toán FLP đa mục tiêu trong điều kiện bất định bằng mô hình lập trình nguyên hỗn hợp tuyến tính mờ (FMILP) kết hợp phân tích kịch bản đa tình huống;

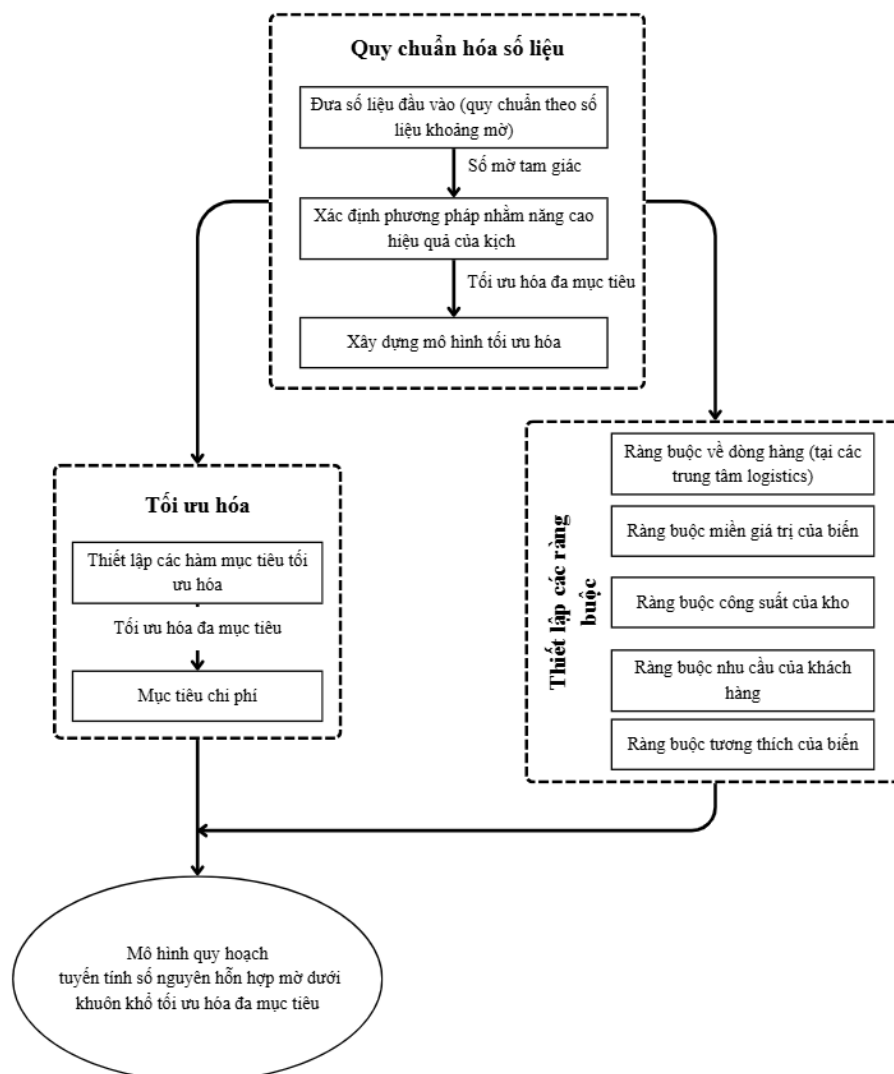
(ii) Tạo kịch bản tự động dựa trên dữ liệu thực tế từ doanh nghiệp;

(iii) Sử dụng dữ liệu thực tế từ doanh nghiệp logistics Việt Nam (như nhu cầu khách hàng, vị trí địa lý, mạng lưới kho và dữ liệu GPS/IoT từ hoạt động vận hành) để kiểm chứng mô hình và so sánh với thực tiễn vận hành. Xuất phát từ những khoảng trống trên, nghiên cứu này đề xuất hướng tiếp cận mới phù hợp với bối cảnh Việt Nam: phát triển bài toán FLP đa mục tiêu trong điều kiện bất định bằng mô hình FMILP kết hợp lý thuyết tập mờ và phân tích kịch bản, sử dụng dữ liệu thực tế từ doanh nghiệp logistics, đồng thời áp dụng kết hợp giữa thuật toán chính xác và meta-heuristic nhằm đảm bảo chất lượng nghiệm và khả năng tái tối ưu. Nghiên cứu kỳ vọng đóng góp bước tiến trong việc chuyển hóa FLP từ lý thuyết sang ứng dụng thực tiễn, hỗ trợ doanh nghiệp tối ưu hóa quy hoạch kho, nâng cao hiệu quả logistics, giảm chi phí vận hành và thúc đẩy phát triển bền vững ngành.

3. Mô hình và phương pháp nghiên cứu

3.1. Mô hình quy hoạch tuyến tính mờ

Trong phần này, chúng tôi xây dựng một mô hình quy hoạch tuyến tính mờ cho bài toán định vị cơ sở trong điều kiện bất định, dựa trên các bước được minh họa trong Hình 1 nhằm giúp độc giả hiểu rõ hơn về cách thức mô hình hóa của nghiên cứu này.



Hình 1. Các bước xây dựng mô hình cho bài toán phân bổ dưới điều kiện bất định hỗn hợp.

3.1.1 Quy chuẩn hóa số liệu

Giai đoạn đầu tiên là chuẩn hóa số liệu đầu vào để xử lý hiệu quả sự bất định và tính chủ quan trong dữ liệu. Trong nghiên cứu này, các số liệu thô ban đầu được chuẩn hóa theo số liệu khoảng mờ thay vì sử dụng các giá trị điểm chính xác. Mục đích là chuyển đổi dữ liệu thành định dạng số mờ tam giác. Việc áp dụng lý thuyết khoảng mờ giúp các thông tin bất định mờ hồ thông qua hằng số Big-M, qua đó cung cấp một phạm vi giá trị và mức độ tin cậy tương ứng cho mỗi tham số.

Số mờ tam giác được xác định thông qua ba giá trị đặc trưng: ước lượng bi quan, ước lượng khả dĩ nhất và ước lượng lạc quan:

Ước lượng bi quan thể hiện giá trị của tham số trong điều kiện bất lợi nhất, một tình huống hiếm khi xảy ra trên thực tế khi năng lực của nhà cung cấp hoặc

kho bị hạn chế và nhu cầu của khách hàng ở mức thấp.

Ước lượng khả dĩ nhất đại diện cho giá trị thực tế nhất của tham số, phản ánh trường hợp thường gặp trong đa số kịch bản vận hành.

Ước lượng lạc quan mô phỏng tình huống thuận lợi nhất, với khả năng xảy ra thấp, khi năng lực cung ứng dư thừa và nhu cầu thị trường ở mức tích cực.

Với khả năng ứng biến linh hoạt ba mức độ bất định này, nghiên cứu tiếp tục sử dụng số mờ tam giác để biểu diễn năng lực cung ứng mờ của các nhà cung cấp, năng lực vận hành mờ của các kho hàng và nhu cầu mờ của khách hàng. Cách tiếp cận này góp phần tăng độ tin cậy của mô hình trong bối cảnh tham số đầu vào biến động và khó xác định chính xác.

Sau khi số liệu đã được chuẩn hóa, giai đoạn tiếp theo tập trung vào xác định các phương pháp nhằm

nâng cao hiệu quả của hệ thống được nghiên cứu. Mục tiêu là lựa chọn và áp dụng các thuật toán phù hợp nhất để đạt được kết quả tốt nhất. Điểm mấu chốt ở đây là việc sử dụng mô hình FMILP. Trong nhiều bài toán thực tế, các mục tiêu thường mâu thuẫn lẫn nhau (ví dụ: cần giảm chi phí nhưng vẫn phải tăng chất lượng sản phẩm). Mô hình FMILP giúp tìm các giải pháp tối ưu, là những giải pháp sau khi cải thiện 1 mục tiêu mà không làm giảm hiệu quả của những mục tiêu khác. Việc lựa chọn phương pháp này đảm bảo rằng các mô hình được xây dựng trong bước tiếp theo sẽ cung cấp các giải pháp cân bằng và toàn diện.

Tiếp theo là xây dựng mô hình tối ưu hóa dựa trên số liệu mờ đã được chuẩn hóa và phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu đã được thiết lập. Quá trình xây dựng bao gồm việc phát triển thuật toán giải quyết bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng các giá trị đầu vào là số mờ tam giác, kết hợp các biến, ràng buộc và hàm mục tiêu. Điều này cho phép mô hình không chỉ hoạt động với các dữ liệu chính xác mà còn xử lý được các dữ liệu không chính xác, giúp kết quả tối ưu đạt được có độ bền vững và ứng dụng cao hơn trong môi trường thực tế bất định

3.1.2 Định nghĩa biến và thiết lập các ràng buộc

Các tập:

- N_c : Tập hợp các kho ứng viên trong mạng lưới chuỗi cung ứng;
- N_s : Tập hợp các nhà cung cấp trong mạng lưới chuỗi cung ứng;
- N_d : Tập các khách hàng trong mạng lưới chuỗi cung ứng;
- N : Tập tất cả các nút trong mạng lưới chuỗi cung ứng, trong đó $N = N_c \cup N_s \cup N_d$.

Chỉ số:

- i, j, h : Chỉ số của các nút trong mạng lưới chuỗi cung ứng, với $i, j, h \in N$;

Tham số mạng lưới:

- $\tilde{s}_i = (s_i^1, s_i^2, s_i^3)$: Công suất cung ứng mờ (tấn/năm) của nhà cung cấp i , với $i \in N_s$.
- $\tilde{c}_i = (c_i^1, c_i^2, c_i^3)$: Công suất vận hành mờ (tấn/năm) của nhà trung tâm logistics/kho ứng viên i , với $i \in N_c$;

- $\tilde{v}_i = (v_i^1, v_i^2, v_i^3)$: Nhu cầu mờ (tấn/năm) của khách hàng i , với $i \in N_d$;
- d_{ij} : Khoảng cách thực tế (km) từ nút i đến nút j , với $i, j \in N$.

Tham số chi phí:

- g : Chi phí vận chuyển của xe;
- c_i : Chi phí xây dựng cố định của các kho ứng viên i , với $i \in N_c$;
- f_i : Chi phí vận hành cố định của các kho ứng viên i , với $i \in N_c$.

Tham số phụ trợ: M : Một số dương đủ lớn (hằng số Big-M)

Biến quyết định:

- x_{ij} : Biến không âm biểu diễn khối lượng hàng hóa (tấn) được vận chuyển từ nút i đến nút j .
- y_i : Biến nhị phân (0-1). Bằng 1 nếu kho ứng viên i được chọn mở ($y_i = 1$); bằng 0 nếu kho ứng viên không được chọn ($y_i = 0$), với $i \in N_c$

Thiết lập các ràng buộc chính:

$$\sum_{i \in N_s} x_{ij} - \sum_{h \in N_d} x_{jh} = 0 \quad \text{Với } j \in N_c \quad (1)$$

Phương trình (1) là ràng buộc bảo toàn dòng chảy tại các kho ứng viên. Ràng buộc này đảm bảo không có hàng hóa được sinh ra hoặc bị giữ lại tại kho trong suốt quá trình vận hành.

$$\sum_{i \in N_c} x_{ij} \leq \tilde{s}_i \quad \text{Với } i \in N_s \quad (2)$$

Phương trình (2) là ràng buộc công suất cung ứng của nhà cung cấp. Ràng buộc này đảm bảo tổng khối lượng hàng hóa mà mỗi nhà cung cấp đưa vào mạng lưới không được vượt quá công suất cung ứng mờ của nhà cung cấp đó.

$$\sum_{i \in N_c} x_{ij} \geq \tilde{v}_i \quad \text{Với } j \in N_d \quad (3)$$

Phương trình (3) là ràng buộc đáp ứng nhu cầu của khách hàng. Ràng buộc này đảm bảo tổng khối lượng hàng hóa mà mỗi khách hàng nhận được không được nhỏ hơn nhu cầu mờ của khách hàng đó.

$$\sum_{i \in N_s} x_{ij} \leq \tilde{c}_i \quad \text{Với } j \in N_c \quad (4)$$

Phương trình (4) là ràng buộc công suất vận hành của các kho ứng viên. Ràng buộc này đảm bảo tổng khối lượng hàng hóa được xử lý tại mỗi kho không vượt quá công suất vận hành mờ của trung tâm đó.

$$My_j \geq \sum_{j \in N_d} x_{ij} \quad \text{Với } i \in N_c \quad (5)$$

Phương trình (5) là ràng buộc tương thích giữa các biến (variable compatibility constraint). Ràng buộc này đảm bảo rằng nếu kho ứng viên j không được chọn mở ($y_j = 0$), thì không có dòng hàng nào được phép đi qua trung tâm đó (tổng $x_{ij} = 0$). Ngược lại, khi trung tâm được mở ($y_j = 1$), ràng buộc trở nên dư thừa nhờ hằng số Big-M.

$$x_{ij} \geq 0 \quad \text{Với } i \in N, \text{ Với } j \in N \quad (6)$$

$$y_j \in \{0, 1\} \quad \text{Với } i \in N_c \quad (7)$$

Phương trình (6) và (7) là các ràng buộc miền giá trị của biến (variable domain constraints). Chúng đảm bảo rằng giá trị của các biến quyết định phải tuân theo đúng định nghĩa đã xác lập.

3.1.3 Tối ưu hóa

Trong nghiên cứu này, bài toán định vị kho được xây dựng dưới dạng tối ưu đa mục tiêu với ba hàm mục tiêu độc lập: (i) tối thiểu hóa chi phí cố định mở kho, (ii) tối thiểu hóa chi phí vận chuyển, và (iii) tối thiểu hóa khoảng cách trung bình đến khách hàng (đại diện cho mức độ bao phủ dịch vụ). Vì mức độ ưu tiên của các hàm mục tiêu đối với mỗi doanh nghiệp là khác nhau nên bài toán có nhiều nghiệm khác nhau, các nghiệm này được xác định bằng phương pháp tổng trọng số (weighted sum method).

Trong môi trường thực tế, các tham số chịu ảnh hưởng của sự bất định do: (i) biến động nhu cầu theo mùa vụ và khu vực cảng, (ii) thay đổi cước vận tải nội vùng, và (iii) gián đoạn ngắn hạn trong hoạt động kho. Để mô hình hóa hiện tượng này, các tham số được biểu diễn dưới dạng số mờ tam giác (Triangular Fuzzy Numbers – TFN). Một số mờ tam giác $\tilde{p} = (p^L, p^M, p^U)$ là một tập mờ được xác định trên tập số thực R , với hàm thuộc được định nghĩa như sau

$$\mu_{\tilde{p}}(x) = \begin{cases} \frac{p^U - x}{p^U - p^M}, & \text{khi } p^M \leq x \leq p^U \\ \frac{x - p^L}{p^M - p^L}, & \text{khi } p^L \leq x \leq p^M \\ 0, & \text{khi } x > p^U \text{ hoặc } x < p^L \end{cases} \quad (8)$$

Trong đó, p^L , p^M và p^U lần lượt được gọi là cận dưới, giá trị trung tâm (mode) và cận trên của số mờ tam giác $\tilde{p} = (p^L, p^M, p^U)$, với điều kiện $p^L \leq p^M \leq p^U$. Nếu $p^L \geq 0$ thì số mờ tam giác $\tilde{p}$ được gọi là số mờ tam giác dương. Nếu $p^U \leq 0$ thì $\tilde{p}$ được gọi là số mờ tam giác âm [24]. Ví dụ, dữ liệu lịch sử nhu cầu [80, 100, 120] được chuyển thành TFN = (80,100,120)

Để xử lý điều kiện bất định, mô hình FMILP được xây dựng bằng cách chuyển đổi bài toán mờ thành MILP:

$$g(\tilde{p}) = \frac{p^L + p^M + p^U}{3} \quad (9)$$

Hàm mục tiêu mờ:

$$\min \tilde{Z} = \alpha \tilde{C} + \beta \tilde{T} + \gamma \tilde{E} \quad (10)$$

Từ đó ta có hàm mục tiêu tổng hợp (Z) được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \text{minimize } Z &= \alpha \left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} g \cdot x_{ij} \cdot d_{ij} \right) + \\ &\beta \left(\sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_d} f_i \cdot x_{ij} \right) + \gamma \left(\sum_{i \in N_c} c_i \cdot y_i \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Trong đó:

- $\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} g \cdot x_{ij} \cdot d_{ij}$: Chi phí vận chuyển từ nút i đến nút j ;
- $\sum_{i \in N_c} c_i \cdot y_i$: Chi phí cố định mở kho;
- $\sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_d} f_i \cdot x_{ij}$: Chi phí vận hành.

Thuật toán Branch-and-Bound được áp dụng để giải bài toán FMILP sau khi khử mờ, trong đó không gian nghiệm được chia thành các nhánh con dựa trên biến nhị phân y_j (quyết định mở kho hay không). Quy trình bao gồm:

Bước 1: Khởi tạo nút gốc với relaxation tuyến tính của bài toán (bỏ ràng buộc nguyên).

Bước 2: Chọn nhánh (branching): Ưu tiên biến y_j có giá trị phân số gần 0.5 trong nghiệm relaxation để phân chia thành hai nhánh con: $y_j = 0$ và $y_j = 1$.

Bước 3: Tính giới dưới (bounding): Sử dụng relaxation Lagrange để ước lượng giá trị nhỏ nhất có thể của hàm mục tiêu Z ở mỗi nhánh.

Bước 4: Cắt nhánh (pruning): Loại bỏ nhánh nếu giới dưới lớn hơn giới trên toàn cục (fathom by bound), nghiệm không khả thi (fathom by infeasibility), hoặc nghiệm nguyên tối ưu (fathom by optimality).

Bước 5: Lập lại cho đến khi tìm được nghiệm tối ưu toàn cục. Ví dụ, với quy mô 3 kho ứng viên, Branch-and-Bound khám phá tối đa nhánh, nhưng cắt sớm để giảm thời gian tính toán [10].

Thuật toán di truyền GA được áp dụng bổ sung để cải thiện nghiệm ban đầu, đặc biệt trong phân tích kích bản. Quy trình bao gồm:

Bước 1: Khởi tạo quần thể ban đầu với các cá thể mã hóa dưới dạng chuỗi nhị phân (ví dụ: [1,0,1] nghĩa là mở kho 1 và 3).

Bước 2: Đánh giá fitness: Tính $Z = \alpha * \text{chi phí vận chuyển} + \beta * \text{chi phí mở kho} + \gamma * \text{chi phí vận hành cho mỗi cá thể}$.

Bước 3: Chọn lọc: Sử dụng roulette wheel, xác suất chọn cá thể i là $\sum \text{fitness}$.

Bước 4: Lai ghép: Toán tử single-point crossover với tỷ lệ 0.8, ví dụ: Cá thể A [1,0,1] và B [0,1,0] lai tại điểm 1 thành [1,1,0] và [0,0,1].

Bước 5: Đột biến: Đảo bit với tỷ lệ 0.01, ví dụ: [1,0,1] đột biến thành [1,1,1].

Bước 6: Lập lại 100 thế hệ với quần thể 50 cá thể để hội tụ đến nghiệm gần tối ưu, kiểm tra độ ổn định với Branch-and-Bound (sai số <1%) [12].

3.2. Quy trình vận hành chi tiết

Bước 1: Trước tiên cần tổng hợp đầy đủ các thông tin phục vụ việc lựa chọn vị trí kho tối ưu. Các dữ liệu bao gồm: vị trí các điểm khách hàng hoặc điểm tiêu thụ; nhu cầu theo từng điểm (khối lượng, tần suất, số đơn hàng); chi phí vận chuyển từ từng vị trí ứng viên đến các điểm nhu cầu; chi phí mở mới kho, chi phí vận hành cố định và chi phí biến đổi. Nếu có nhiều mức ưu tiên phục vụ hoặc các yêu cầu đặc biệt theo khu vực thì cũng cần mã hóa đầy đủ.

Tiếp theo, sử dụng bản đồ hoặc dữ liệu GIS để xác định chính xác quãng đường và thời gian vận chuyển giữa mỗi điểm ứng viên và từng khách hàng. Những vị trí không đáp ứng yêu cầu về khoảng cách tối đa, thời gian giao nhận hoặc điều kiện hạ tầng sẽ được loại khỏi danh sách ứng viên.

Bước 2: Ở bước này, tiến hành xác định các quy tắc mà phương án định vị kho phải tuân thủ. Ví dụ:

tổng nhu cầu của tất cả khách hàng phải được đáp ứng; mỗi khách hàng phải được gán vào đúng một kho hoạt động; công suất của từng kho không được vượt quá giới hạn; số lượng kho được mở phải nằm trong mức tối thiểu – tối đa cho phép; và phải đảm bảo các yêu cầu về vùng phục vụ, bán kính giao hàng hoặc thời gian giao chuẩn.

Mỗi phương án định vị sẽ được đánh giá thông qua tổng điểm gồm bốn yếu tố: chi phí mở và vận hành kho, chi phí vận chuyển, thời gian giao hàng trung bình. Ba trọng số sẽ được áp dụng để ưu tiên các tiêu chí quan trọng hơn, giúp hệ thống lựa chọn vị trí kho vừa hiệu quả về chi phí vừa đảm bảo chất lượng phục vụ.

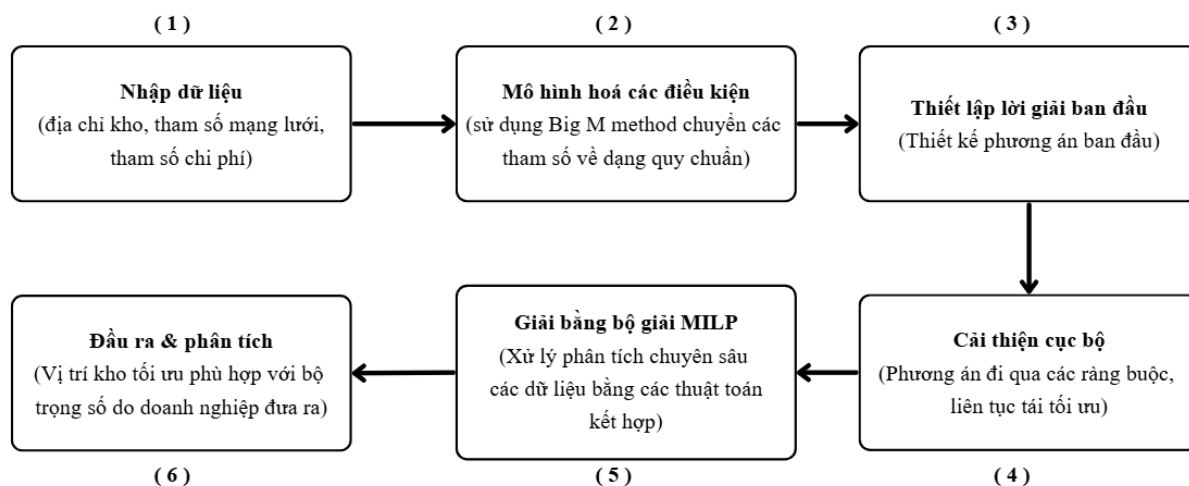
Bước 3: Dựa trên nguyên tắc của thuật toán FMILP hoặc mô hình định vị cơ sở (FLP), hệ thống sẽ tối ưu hóa việc mở bao nhiêu kho, mở ở vị trí nào và phân bổ từng khách hàng vào kho tương ứng. Mục tiêu là tìm ra cấu hình có tổng điểm nhỏ nhất theo bộ tiêu chí đã đề ra, đồng thời thỏa mãn toàn bộ ràng buộc công suất, khoảng cách và nhu cầu.

Kết quả cuối cùng bao gồm: danh sách vị trí kho được lựa chọn; công suất phân bổ cho từng kho; tổng chi phí mở – vận hành – vận chuyển; thời gian giao hàng trung bình; mức độ bao phủ các khu vực.

Bước 4: Sau khi tìm được cấu hình kho tối ưu, bước tiếp theo là xây dựng kế hoạch triển khai bao gồm: phân bổ nguồn lực (nhân sự, thiết bị, diện tích sử dụng), kế hoạch xây dựng hoặc thuê kho, và cấu hình vận hành ban đầu. Việc phân bổ nguồn lực cần dựa trên công suất tối ưu của mỗi kho và đặc thù từng khu vực nhằm tránh lãng phí, chồng chéo hoặc vượt tải.

Tiếp đó, hệ thống tiến hành giám sát hoạt động kho theo thời gian thực: mức tồn, lưu lượng xử lý, thời gian xử lý đơn hàng, và tỉ lệ tuân thủ SLA. Nếu phát hiện biến động nhu cầu lớn, rủi ro quá tải hoặc thay đổi mạng lưới phân phối, cơ chế tái tối ưu cục bộ sẽ được kích hoạt để đánh giá lại cấu hình kho và đề xuất điều chỉnh vị trí hoặc công suất.

Toàn bộ dữ liệu vận hành được ghi nhận để phục vụ việc phân tích, đánh giá và cải thiện mô hình định vị kho trong các chu kỳ hoạch định tiếp theo.



Hình 2. Quy trình vận hành chi tiết.

4. Kết quả thử nghiệm

4.1. Thiết lập kịch bản thử nghiệm

Thử nghiệm được thực hiện trên dữ liệu thực tế mô phỏng từ một doanh nghiệp tại thành phố Hải Phòng. Kịch bản bao gồm:

Các tập:

N_c : 3 kho ứng viên:

- W0: KCN Đình Vũ (20.849°N, 106.753°E);
- W1: KCN VSIP (20.819°N, 106.725°E);
- W2: Trung tâm Hồng Bàng (20.865°N, 106.684°E).

N_s : 2 nhà cung cấp

- Cảng Hải Phòng (20.909°N, 106.740°E);
- KCN Nomura (20.883°N, 106.617°E);

N_d : 5 khách hàng - tọa độ lấy từ Google Maps API (Hồng Bàng, Lê Chân, Ngô Quyền, Kiến An, Đồ Sơn).

Tham số mạng lưới:

- Công suất cung ứng mờ: [6000, 8000, 10000] đơn vị;

- Công suất vận hành mờ: [6000, 7500, 9000] đơn vị;

- Nhu cầu mờ $\tilde{q}_i \in [0.1, 0.5]$ tấn, mô hình hóa bằng TFN (ví dụ: C0: (0.24, 0.3, 0.36)).

Tham số chi phí (dựa trên cửa sổ thời gian: [08:00 – 12:00]) :

- Chi phí cố định mở kho: [15, 20, 10] triệu VND;
- Chi phí vận chuyển: 20.000 VND/km (từ Google Maps API).

Chi phí vận hành cố định: [50, 70, 60] triệu VND/năm/cơ sở

Biến quyết định:

- x_{ij} : Khối lượng hàng hóa vận chuyển - (8, 12, 16) tấn/chuyến;
- y_i : $y_i = 1$ (chắc chắn có kho ứng viên được chọn).

Dữ liệu lịch sử 6 tháng được sử dụng để ước lượng TFN nhu cầu, ma trận khoảng cách/thời gian theo giờ cao/thấp điểm từ Google Maps Distance Matrix API.

4.2. So sánh các kịch bản thiết lập

Bảng 2. Bảng so sánh các kịch bản.

Kịch bản	α, β, γ	Vị trí kho tối ưu	Quãng đường	Mở kho (triệu VND)	Vận hành (triệu VND)
1 Ưu tiên chi phí vận chuyển	(0,6; 0,1; 0,3)	Hồng Bàng	25	740.000	10,9
2 Ưu tiên chi phí mở kho	(0,1; 0,6; 0,3)	VSIP	45	635.000	11,5
3 Ưu tiên chi phí vận hành	(0,3; 0,1; 0,6)	Đình Vũ	32	750.000	9,1

Trong nghiên cứu này, ba kịch bản được xây dựng theo cách tiếp cận tổng hợp trọng số, dựa trên nhu cầu đề xuất từ chủ doanh nghiệp nhỏ với 12 năm kinh nghiệm vận hành đang được thực nghiệm tại Hải Phòng, nhằm phản ánh các ưu tiên vận hành khác nhau khi lựa chọn tuyến khứ hồi. Cụ thể, hàm mục tiêu được cấu thành từ ba cụm:

$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} g \cdot x_{ij} \cdot d_{ij}$: Chi phí vận chuyển từ nút i đến nút j .

$\sum_{i \in N_c} c_i \cdot y_i$: Chi phí cố định mở kho

$\sum_{i \in N_c} \sum_{j \in N_d} f_i \cdot x_{ij}$: Chi phí vận hành.

Trên cơ sở đó, kịch bản 2 (ưu tiên chi phí mở kho) tăng trọng số cho chi phí mở kho (β cao), vì vậy nghiệm tối ưu có xu hướng chọn các đơn vị kho có chi phí mở thấp, dù chi phí vận chuyển và chi phí vận hành có thể cao hơn.

Kịch bản 1 (ưu tiên chi phí vận chuyển) gán trọng số lớn cho chi phí vận chuyển giữa các nút (α cao), khiến mô hình lựa chọn vị trí có khoảng cách gần với các kho chính và tập khách hàng, chấp nhận mức chi phí vận hành và mở kho có thể cao hơn.

Cuối cùng, kịch bản 3 (ưu tiên chi phí vận hành) đặt trọng số lớn cho chi phí vận hành (γ cao), từ đó thúc đẩy mô hình lựa chọn các kho đặt ở các khu vực cảng giúp giảm thiểu chi phí hoạt động ngay cả khi phải đánh đổi bằng chi phí vận chuyển cao hơn hoặc chi phí mở kho cao hơn.

Cách xây dựng kịch bản này cho phép quan sát rõ ràng quan hệ đánh đổi (trade-off) trên cùng một bộ dữ liệu mạng lưới phân phối, đồng thời tạo cơ sở để xếp hạng và lựa chọn phương án theo nhu cầu của người ra quyết định.

4.3. So sánh hiệu suất vận hành

Nhóm tác giả cũng đã thực nghiệm so sánh hiệu suất vận hành cho thử nghiệm mô phỏng tại doanh nghiệp logistics Hải Phòng (2 nhà cung cấp, 3 kho ứng viên, 5 khách hàng) với định hướng giảm thiểu chi phí vận hành và chi phí vận chuyển lâu dài theo trọng số $\alpha, \beta, \gamma = (0,6; 0,1; 0,3)$ (theo kịch bản số 1) và phương pháp lựa chọn thủ công (dựa trên kinh nghiệm). Kết quả cho thấy mô hình FLP đa mục tiêu tích hợp Google Maps API và FMILP mang lại cải thiện vượt trội so với phương pháp chọn kho thủ công như trình bày trong bảng dưới đây:

Bảng 3. Bảng đánh giá hiệu suất vận hành.

Chỉ tiêu	Trước	Sau	Cải thiện	Công thức tính
Số kho mở	3	2	33.3% ↓	$\sum_{k \in K} y_k$
Tổng quãng đường (km)	1.850	1.520	17.8% ↓	Google Maps API
Tổng chi phí vận hành (triệu VND)	68.5	52.3	23.6% ↓	$\alpha \sum c_{ik} x_{ik} + \alpha \sum c_{kj} z_{kj} + \gamma \sum F_k y_k$
Tổng thời gian vận hành (giờ)	42.0	35.6	15.2% ↓	$\beta (\sum t_{ik} x_{ik} + \sum t_{kj} z_{kj})$
Tỷ lệ đáp ứng nhu cầu (%)	92	99	+7 đvt ↑	$\frac{\sum z_{kj}}{q_j} \times 100$
Tỷ lệ sử dụng công suất kho (%)	65	78	+13 đvt ↑	$\frac{\sum z_{kj}}{cap_k \times y_k} \times 100$

Việc giải quyết bài toán FLP đa mục tiêu tích hợp Google Maps API và FMILP đã mang lại những cải thiện chiến lược về vị trí kho và hiệu quả vận hành. Cụ thể số lượng kho được mở giảm từ 3 xuống còn 2 (W0 - Đình Vũ và W2 - Hồng Bàng), loại bỏ kho VSIP do chi phí vận hành cao và vị trí không tối ưu về thời gian giao hàng → tiết kiệm 20 triệu VND chi phí cố định. Tổng quãng đường di chuyển giảm 330 km (từ 1.850 km xuống 1.520 km), nhờ chọn kho gần trung tâm nhu cầu và sử dụng tuyến đường thực tế từ Google Maps API

(tránh nội đô giờ cao điểm). Tổng chi phí vận hành giảm 16.2 triệu VND, trong đó chi phí vận chuyển chiếm 70% cải thiện. Tổng thời gian vận hành giảm 6.4 giờ, đảm bảo giao hàng trong cửa sổ [08:00 - 12:00]. Tỷ lệ đáp ứng nhu cầu tăng từ 92% lên 99%, nhờ xử lý nhu cầu bất định bằng TFN, đảm bảo công suất kho đủ cho kịch bản xấu nhất. Hiệu suất sử dụng công suất kho tăng 13% (từ 65% lên 78%), giảm tình trạng kho dư thừa hoặc quá tải.

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, chúng tôi xem xét việc mô hình hóa và tối ưu hóa bài toán định vị cơ sở trong tối ưu hóa mạng lưới phân phối dưới điều kiện bất định, thông qua mô hình lập trình nguyên hỗn hợp tuyến tính mờ kết hợp phân tích kịch bản. Từ những phân tích và thử nghiệm trên, kết quả nghiên cứu có thể được tổng kết thành hai nhóm đóng góp chính: đóng góp về mặt lý luận và đóng góp về mặt thực tiễn ứng dụng.

(i) Nghiên cứu đề xuất một khung tối ưu hóa đa mục tiêu cho bài toán định vị cơ sở, trong đó đồng thời xem xét các mục tiêu kinh tế (chi phí mở kho, chi phí vận hành và chi phí vận chuyển) và mục tiêu dịch vụ (thời gian giao hàng và mức độ đáp ứng nhu cầu). Các nghiệm Pareto thu được từ bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu cung cấp một chuẩn so sánh định lượng, giúp đánh giá rõ ràng các quan hệ đánh đổi giữa các mục tiêu mâu thuẫn trong thiết kế mạng lưới phân phối.

(ii) Các dạng bất định hỗn hợp, bao gồm nhu cầu khách hàng, năng lực vận hành kho và năng lực cung ứng, được mô hình hóa một cách toàn diện bằng số mờ tam giác dựa trên lý thuyết tập mờ. Cách tiếp cận này giúp nâng cao độ tin cậy của công tác quy hoạch mạng lưới phân phối trong bối cảnh dữ liệu đầu vào biến động và khó xác định chính xác.

(iii) Một mô hình lập trình nguyên hỗn hợp tuyến tính mờ (FMILP) được xây dựng để mô tả bài toán định vị cơ sở đa mục tiêu dưới điều kiện bất định. Mô hình mờ được khử mờ thông qua các kỹ thuật quy hoạch cơ hội có ràng buộc mờ, từ đó chuyển đổi thành mô hình xác định có thể giải bằng thuật toán chính xác, đồng thời kết hợp với thuật toán meta-heuristic nhằm nâng cao hiệu quả giải đối với các bài toán quy mô lớn.

(iv) Nghiên cứu phát triển một cách tiếp cận phân tích kịch bản kết hợp phân tích độ nhạy, cho phép đánh giá tác động của các biến động đầu vào lên cấu hình mạng lưới kho. Cách tiếp cận này hỗ trợ nhà quản lý xác định phương án định vị kho có tính linh hoạt và bền vững cao hơn trước các điều kiện vận hành khác nhau.

Dựa trên việc thảo luận trường hợp sử dụng dữ liệu thực tế từ một doanh nghiệp logistics tại Hải Phòng, nghiên cứu cũng rút ra một số kết luận quan trọng nhằm hỗ trợ các nhà ra quyết định trong việc

thiết kế, quản lý và vận hành mạng lưới phân phối hiệu quả hơn.

(i) Kết quả từ tối ưu hóa đa mục tiêu cho thấy các mục tiêu chi phí, thời gian giao hàng và mức độ đáp ứng nhu cầu tồn tại mối quan hệ đánh đổi rõ rệt; việc cải thiện một mục tiêu thường dẫn đến sự suy giảm của mục tiêu khác. Thông qua phương pháp tổng trọng số, các nghiệm Pareto được xây dựng giúp nhà ra quyết định lựa chọn phương án phù hợp với ưu tiên chiến lược cụ thể của doanh nghiệp.

(ii) Kết quả thử nghiệm cho thấy việc áp dụng mô hình FLP dựa trên FMILP và phân tích kịch bản giúp giảm đáng kể chi phí logistics, rút ngắn thời gian giao hàng trung bình và nâng cao tỷ lệ đáp ứng nhu cầu so với phương pháp lựa chọn vị trí kho dựa trên kinh nghiệm. Điều này khẳng định giá trị thực tiễn của việc chuyển từ cách tiếp cận định tính sang cách tiếp cận định lượng dựa trên dữ liệu.

(iii) So với phương pháp quy hoạch xác định truyền thống, việc đưa các bất định hỗn hợp vào mô hình giúp nâng cao đáng kể độ tin cậy và tính bền vững của phương án định vị kho. Các mô hình FMILP và phiên bản xác định của chúng cho phép tìm nghiệm tối ưu toàn cục, đồng thời đảm bảo khả năng thích ứng của mạng lưới phân phối trước các biến động thực tế.

Tuy nhiên, nghiên cứu vẫn còn những hạn chế như phạm vi thử nghiệm còn giới hạn tại một doanh nghiệp nhỏ với thời gian quan sát ngắn. Bên cạnh đó, khi quy mô bài toán được mở rộng với số lượng lớn điểm giao hàng và kho ứng viên, độ phức tạp tính toán của mô hình FMILP tăng lên đáng kể do bản chất NP-hard của bài toán FLP, làm gia tăng thời gian giải và yêu cầu tài nguyên tính toán cao hơn. Hướng phát triển tiếp theo là mở rộng quy mô thử nghiệm, đồng thời nghiên cứu tích hợp các thuật toán meta-heuristic nâng cao hoặc các phương pháp tối ưu hóa hiện đại nhằm nâng cao hiệu quả tính toán, cũng như tích hợp IoT thời gian thực và học máy để tự động hóa quá trình tái tối ưu toàn mạng lưới.

Đóng góp của các tác giả trong bài báo

Đặng Thu Thảo: Xây dựng thuật toán và mô hình nghiên cứu chính, Biên soạn và quản lý dữ liệu, Phân tích chính thức, Viết – bản thảo gốc, Đề xuất giải pháp, Viết phần phương pháp và kết quả, Chỉnh sửa và hoàn thiện bản thảo. **Tạ Việt Hà:** Viết phần tổng quan tài liệu, Định hướng khung lý thuyết, Phương pháp

nghiên cứu, Viết – bản thảo gốc, Chính sửa bản thảo, Đề xuất giải pháp, Phản hồi ý kiến phản biện. **Phạm Bùi Khánh Linh:** Viết phần tổng quan tài liệu, Trục quan hóa dữ liệu, Hỗ trợ phân tích dữ liệu, Viết – bản thảo gốc, Chính sửa bản thảo, Đề xuất giải pháp. **Lê Thế Minh:** Đóng góp ý kiến chuyên môn, Thảo luận và diễn giải kết quả, Chính sửa bản thảo, Phản hồi ý kiến phản biện, Đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo. **Phạm Ngọc Diệp:** Thu thập và tiền xử lý dữ liệu, Hỗ trợ phân tích thống kê, Trục quan hóa dữ liệu, Chính sửa bản thảo. **Nguyễn Thị Lê Hằng:** Giảng viên hướng dẫn chính, Định hướng toàn bộ nghiên cứu, Giám sát phương pháp luận và chất lượng khoa học, Chính sửa và góp ý chuyên sâu bản thảo, Phản hồi và xử lý ý kiến phản biện, Đề xuất giải pháp thực tiễn, Hướng dẫn viết và hoàn thiện bài báo.

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

Các 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 được cung cấp theo yêu cầu.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số SV25-26.187.

1st Dang Thu Thao*. *International School of Education, Vietnam Maritime University.*

2nd Ta Viet Ha. *International School of Education, Vietnam Maritime University.*

3rd Pham Bui Khanh Linh. *International School of Education, Vietnam Maritime University.*

4th Le The Minh. *International School of Education, Vietnam Maritime University.*

5th Pham Ngoc Diep. *International School of Education, Vietnam Maritime University.*

6th Nguyen Thi Le Hang. *Faculty of Economics, Vietnam Maritime University.*

*Corresponding author: dthuthao2712@gmail.com

Tài liệu tham khảo

- [1] Bộ Công Thương Việt Nam, “Báo cáo logistics Việt Nam 2024: Khu thương mại tự do,” [Online]. Available: <https://logistics.gov.vn/nguyen-cuudao-tao/bao-cau-logistics-viet-nam-2024-khu-thuong-mai-tu-do-mien-phi>. accessed.
- [2] CBRE Vietnam, “Vietnam market outlook 2024,” 2024. [Online]. Available:

<https://mktgdocs.cbcre.com/2299/4877e50d-5d90-4047-8528-05ce57e34f3d-2012834704.pdf>. accessed: Sep. 20, 2025.

- [3] Fiin Group, “Aggressive expansion of foreign investors sector preview | Vietnam warehousing,” Hanoi, Vietnam, 2024. [Online]. Available: <https://fiingroup.vn/upload/docs/Vietnam-Warehousing-Sector-Preview-June-2024.pdf>. accessed: Sep. 17, 2025.
- [4] M. T. Melo, S. Nickel, and F. Saldanha-Da-Gama, “Facility location and supply chain management – a review,” *European Journal of Operational Research*, vol. 196, no. 2, pp. 401–412, May 2008, doi:10.1016/j.ejor.2008.05.007.
- [5] S. H. Owen and M. S. Daskin, “Strategic facility location: a review,” *European Journal of Operational Research*, vol. 111, no. 3, pp. 423–447, Dec. 1998, doi:10.1016/s0377-2217(98)00186-6.
- [6] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965, doi:10.1016/s0019-9958(65)90241-x.
- [7] D. Peidro, J. Mula, M. Jiménez, and M. Del Mar Botella, “A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment,” *European Journal of Operational Research*, vol. 205, no. 1, pp. 65–80, Dec. 2009, doi:10.1016/j.ejor.2009.11.031.
- [8] J. Mula, D. Peidro, M. Díaz-Madroñero, and E. Vicens, “Mathematical programming models for supply chain production and transport planning,” *European Journal of Operational Research*, vol. 204, no. 3, pp. 377–390, Sep. 2009, doi:10.1016/j.ejor.2009.09.008.
- [9] H. Selim and I. Ozkarahan, “A supply chain distribution network design model: n interactive fuzzy goal programming-based solution approach,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, no. 3–4, pp. 401–418, Dec. 2006, doi:10.1007/s00170-006-0842-6.
- [10] A. Klose and A. Drexler, “Facility location models for distribution system design,” *European Journal of Operational Research*, vol. 162, no. 1, pp. 4–29, Jan. 2004, doi:10.1016/j.ejor.2003.10.031.
- [11] S. Görtz and A. Klose, “A simple but usually fast Branch-and-Bound algorithm for the capacitated facility location problem,” *INFORMS Journal on Computing*, vol. 24, no. 4, pp. 597–610, Jul. 2011, doi:10.1287/ijoc.1110.0468.
- [12] H. Tohyama, K. Ida, and J. Matsueda, “A genetic algorithm for the uncapacitated facility location problem,” *Electronics and Communications in Japan*, vol. 94, no. 5, pp. 47–54, Apr. 2011, doi:10.1002/ecj.10180.
- [13] H. Delmaire, J. A. Díaz, E. Fernández, and M. Ortega, “Reactive grasp and tabu search based heuristics for the single source capacitated plant location problem,” *INFOR Information Systems and Operational Research*, vol. 37, no. 3, pp. 194–225,

- Aug. 1999, doi:10.1080/03155986.1999.11732381.
- [14] M. Laguna, R. Martí, A. Martínez-Gavara, S. Pérez-Peló, and M. G. C. Resende, "Greedy Randomized Adaptive Search Procedures with Path Relinking: an analytical review of designs and implementations," *European Journal of Operational Research*, vol. 327, no. 3, pp. 717–734, Feb. 2025, doi:10.1016/j.ejor.2025.02.022.
- [15] H. D. Pour and M. Nosrati, "Solving the facility and layout and location problem by ant-colony optimization-meta heuristic," *International Journal of Production Research*, vol. 44, no. 23, pp. 5187–5196, Jun. 2006, doi:10.1080/00207540600597088.
- [16] L. V. Snyder, "Facility location under uncertainty: a review," *IIE Transactions*, vol. 38, no. 7, pp. 547–564, Apr. 2006, doi:10.1080/07408170500216480.
- [17] R. Z. Farahani, M. SteadieSeifi, and N. Asgari, "Multiple criteria facility location problems. A survey," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, no. 7, pp. 1689–1709, Oct. 2009, doi:10.1016/j.apm.2009.10.005.
- [18] X. Wang, J. Zhao, C. Cheng, and M. Qi, "A multi-objective fuzzy facility location problem with congestion and priority for drone-based emergency deliveries," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 179, p. 109167, Mar. 2023, doi:10.1016/j.cie.2023.109167.
- [19] J. R. Current, M. S. Daskin, and D. A. Schilling, "Discrete network location problems," in *Facility Location: Applications and Theory*, Berlin, Germany: Springer, 2002, pp. 457–492.
- [20] Báo Chính phủ, "Chiến lược phát triển dịch vụ logistics Việt Nam thời kỳ 2025–2035, tầm nhìn đến 2050," Oct. 9, 2025. [Online]. Available: <https://baohinhphu.vn/chien-luoc-phat-trien-dich-vu-logistics-viet-nam-thoi-ky-2025-2035-tam-nhin-den-2050-10225100916414501.htm>, accessed: Sep. 20, 2025.
- [21] M. Fischetti, I. Ljubić, and M. Sinnl, "Benders decomposition without separability: A computational study for capacitated facility location problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 253, no. 3, pp. 557–569, Mar. 2016, doi:10.1016/j.ejor.2016.03.002.
- [22] S. Gadegaard, A. Klose, and L. Nielsen, "An improved cut-and-solve algorithm for the single-source capacitated facility location problem," *EURO Journal on Computational Optimization*, vol. 6, no. 1, pp. 1–27, Apr. 2017, doi:10.1007/s13675-017-0084-4.
- [23] K. Holmberg, M. Rönnqvist, and D. Yuan, "An exact algorithm for the capacitated facility location problems with single sourcing," *European Journal of Operational Research*, vol. 113, no. 3, pp. 544–559, Mar. 1999, doi:10.1016/s0377-2217(98)00008-3.
- [24] J. Dong, S. Wan, and S.-M. Chen, "Fuzzy best-worst method based on triangular fuzzy numbers for multi-criteria decision-making," *Information Sciences*, vol. 547, pp. 1080–1104, Sep. 2020, doi:10.1016/j.ins.2020.09.014.