

Tối ưu hóa chi phí mạng lưới phân phối có thu hồi sản phẩm đã qua sử dụng dưới ràng buộc phát thải carbon: Trường hợp doanh nghiệp thương mại phân phối phụ tùng

Cost optimization of a distribution network with used-product returns under carbon emission constraints: A case study of a spare-parts trading company

> CN TRẦN NGUYỄN NHƯ PHƯƠNG, PGS.TS HỒ THỊ THU HÒA*, KS NGUYỄN THANH DANH

Trường Đại học Quốc tế - Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh

*Email: htthoa@hcmiu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này kế thừa mô hình tối ưu hóa chi phí mạng lưới phân phối bằng Quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MILP) do cùng nhóm tác giả phát triển và triển khai ứng dụng cho doanh nghiệp thương mại có chính sách thu hồi sản phẩm dưới ràng buộc phát thải carbon. Mô hình sử dụng dữ liệu thực tế của doanh nghiệp trong chu kỳ một năm, bao gồm vị trí và công suất các cơ sở, lộ trình vận chuyển, nhu cầu, chính sách thu hồi, tồn kho và các cấu phần chi phí. Bài toán được giải bằng Python kết hợp thư viện CPLEX, đồng thời được kiểm chứng bằng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm). Kết quả cho thấy vận tải là hoạt động chi phối, chiếm tỷ trọng lớn nhất cả về chi phí và phát thải carbon trong mạng lưới phân phối. Phân tích độ nhạy chỉ ra nhu cầu và tỷ lệ thu hồi là hai tham số có tác động thuận chiều đáng kể, qua đó quyết định đáng kể đến phương án tối ưu. Nghiên cứu đề xuất công cụ hỗ trợ ra quyết định nhằm tối ưu hóa chi phí đồng thời kiểm soát phát thải, góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế và đáp ứng định hướng phát triển bền vững trong thiết kế mạng lưới phân phối.

Từ khóa: Chuỗi cung ứng bền vững; mạng lưới phân phối; phát thải carbon; tối ưu hóa chi phí.

ABSTRACT

This study extends a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model for distribution network cost optimization previously developed by the same authors and applies it to a trading enterprise with used-product return policies under carbon-emission constraints. The model is parameterized using empirical one-year operational data, including facility locations and capacities, transport routes, demand, return policies, inventory parameters and cost components. The problem is solved in Python with the CPLEX library and validated using a Genetic Algorithm. Results indicate that transportation is the dominant contributor to both total cost and carbon emissions. Sensitivity analysis shows that demand and return rates exert substantial positive effects, thereby strongly influencing the optimal solution. The study provides a decision-support tool to minimize cost while controlling carbon emissions, contributing to the alignment of economic efficiency and sustainability objectives in distribution network design.

Keywords: Sustainable supply chain; distribution network; carbon emissions; cost optimization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tại Việt Nam, doanh nghiệp thương mại được xem là một trong những động lực tăng trưởng quan trọng, đồng thời đảm

nhệm vai trò kết nối giữa khu vực sản xuất và tiêu dùng [1]. Trong chuỗi cung ứng, nhóm doanh nghiệp này vận hành mạng lưới phân phối thuộc phân khúc hạ nguồn, bao quát các hoạt động đưa thành

phẩm đến khách hàng cuối, thực hiện trực tiếp từ nhà sản xuất hoặc thông qua các cấp trung gian. Do đó, đây là khu vực tập trung vận hành và phối hợp chặt chẽ 4 nhóm hoạt động cốt lõi gồm: Vận tải, quản trị tồn kho, vận hành kho bãi và xử lý hàng hóa [2, 3]. Trong bối cảnh chuyển dịch theo hướng phát triển bền vững, các hoạt động trên đều có liên quan đến phát thải khí nhà kính. Theo báo cáo của Cục Biến đổi khí hậu, riêng lĩnh vực vận tải đóng góp khoảng 15 - 20% tổng lượng phát thải khí nhà kính toàn quốc của Việt Nam trong năm 2025 [4]. Bên cạnh đó, tiêu thụ năng lượng tại cơ sở và xử lý chất thải phát sinh trong vận hành cũng tạo ra phát thải theo khung hướng dẫn của Nghị định thư Khí nhà kính (Green House Gas Protocol) [5].

Đối với mặt hàng phụ tùng, thu hồi sản phẩm đã qua sử dụng nhằm phục vụ tái sản xuất được xem là giải pháp giúp tiết kiệm nguyên vật liệu, giảm chi phí sản xuất và cắt giảm lượng chất thải, qua đó góp phần giảm dấu chân carbon của sản phẩm. Tuy nhiên, triển khai logistics ngược đặt ra yêu cầu đối với doanh nghiệp thương mại trong vai trò nhà phân phối phải tổ chức hệ thống thu gom, lưu trữ và vận chuyển sản phẩm cũ từ người sử dụng về các điểm xử lý hoặc nhà máy. Điều này làm gia tăng chi phí liên quan đến tồn kho, vận tải và quản trị vận hành, đồng thời phát sinh thêm phát thải carbon trong quá trình thu gom và vận chuyển. Vì vậy, thiết kế mạng lưới phân phối tích hợp cả dòng chảy xuôi và dòng chảy ngược cần được xem xét như một bài toán tối ưu tổng thể, trong đó mục tiêu chi phí được đặt dưới các ràng buộc kiểm soát phát thải carbon nhằm đảm bảo cân bằng giữa hiệu quả kinh tế và mục tiêu bền vững.

Khung mô hình tối ưu hóa sử dụng trong nghiên cứu này được kế thừa từ công trình trước của nhóm tác giả, trong đó cấu trúc mô hình (biến quyết định, hàm mục tiêu và hệ ràng buộc) đã được xây dựng và trình bày chi tiết [6]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu hiện tại mở rộng theo hướng ứng dụng thực nghiệm bằng cách tích hợp dữ liệu vận hành thực tế của doanh nghiệp và hiệu chỉnh các tham số đầu vào nhằm phản ánh đúng bối cảnh triển khai. Mục tiêu nghiên cứu là xác định phương án vận hành mạng lưới phân phối tối ưu thông qua quyết định lượng vận chuyển và mức tồn kho tại các điểm nút, đồng thời bảo đảm tuân thủ ràng buộc phát thải carbon, qua đó hỗ trợ doanh nghiệp cân bằng giữa hiệu quả chi phí và mục tiêu phát triển bền vững của toàn chuỗi cung ứng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Các nghiên cứu gần đây cho thấy mô hình tối ưu hóa tích hợp mục tiêu bền vững ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong thiết kế và vận hành chuỗi cung ứng, đặc biệt đối với chuỗi cung ứng khép kín có tích hợp logistics ngược nhằm nâng cao hiệu quả tài nguyên và giảm tác động môi trường [7-10]. Một số hướng tiếp cận tiêu biểu gồm mô hình đa mục tiêu theo ba trụ cột kinh tế - môi trường - xã hội [11], mô hình toán học mở trong thiết kế mạng lưới phân phối đa sản phẩm [12] và mô hình tối ưu chuỗi cung ứng khép kín đa kênh có xét bất định nhu cầu và biến động giá carbon [13].

Nghiên cứu này sử dụng mô hình Quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MILP) đã được nhóm tác giả công bố trước đây [6] và triển khai theo hướng ứng dụng thực nghiệm thông qua tích hợp dữ liệu vận hành thực tế, đồng thời hiệu chỉnh các tham số phù hợp với bối cảnh doanh nghiệp kinh doanh phụ tùng.

Dữ liệu được thu thập từ mạng lưới phân phối của hai sản phẩm phụ tùng năm 2024 (có khả năng thay thế một phần nhu cầu; sản xuất tại hai nhà máy nên cấu trúc phân phối khác nhau), bao gồm: Nhu cầu (DE), khoảng cách vận chuyển (DI), tồn kho đầu kỳ (IL⁰), tỷ lệ tiêu hủy (DR), tỷ lệ thu hồi tối thiểu (RR), tồn kho an toàn

(SSR), công suất tồn kho tại trung tâm phân phối và kho (IC_{DC}, IC_W), chi phí vận chuyển - lưu kho - đóng gói - tiêu hủy (T, I, P, D), hệ số phát thải tương ứng (ET, EI, EP, ED), hạn ngạch carbon (CAP) và đơn giá carbon (EC).

Quy trình nghiên cứu gồm 4 bước: (1) Đưa dữ liệu vào mô hình MILP tối thiểu hóa tổng chi phí dưới ràng buộc phát thải; (2) giải mô hình bằng Python kết hợp thư viện CPLEX để xác định lượng vận chuyển tối ưu (Q) và tồn kho cuối kỳ (IL); (3) giải cùng bài toán bằng thuật toán di truyền (GA) nhằm đối chiếu, kiểm chứng nghiệm; (4) phân tích độ nhạy theo các tham số trọng yếu (nhu cầu, tỷ lệ thu hồi, tồn kho an toàn). Kết quả nhằm đề xuất phương án vận hành mạng lưới có chi phí tối ưu, đồng thời bảo đảm tuân thủ giới hạn phát thải carbon.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Trong mạng lưới phân phối của doanh nghiệp, phụ tùng được thu mua theo điều kiện Ex-works (Incoterms 2020), vận chuyển từ nhà máy sản xuất đến cảng xuất khẩu bằng xe tải, sau đó đóng container hàng lẻ để vận tải đường biển. Tại Việt Nam, hàng hóa tiếp tục được vận chuyển từ cảng Cát Lái đến trung tâm phân phối tại Bình Dương và sau đó đến các kho khu vực bằng đường bộ. Hoạt động giao hàng và thu hồi phụ tùng đã qua sử dụng từ khách hàng được thực hiện bởi đội xe bán tải nội bộ có tải trọng 850 kg.

Sản phẩm được lưu trữ và phân phối theo các quy cách đóng gói như thùng carton, kiện gỗ, pallet và container khô. Đối với các lô hàng do nhà sản xuất giao theo kiện lớn, doanh nghiệp thực hiện đóng gói lại thành đơn vị riêng lẻ tại trung tâm phân phối trước khi giao đến kho hoặc khách hàng. Phụ tùng thu hồi có thể được lưu kho và xuất trả trong cùng kỳ hoặc các kỳ tiếp theo tùy kế hoạch vận hành. Các tham số đầu vào của mô hình được trình bày tại Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Tham số đầu vào

Tham số	Sản phẩm mới A	Sản phẩm mới E	Sản phẩm trả về AA	Sản phẩm trả về EE
Trọng lượng (KG)	23,42	22,97	19,91	19,52
Thể tích (CBM)	2,31	2,08	2,31	2,08
Nhà sản xuất	m ₁	m ₂	m ₁	m ₂
Tỷ lệ hoàn trả	75%			
Tỷ lệ hủy hàng	0,0042	0,0058		
Mức tồn kho an toàn	15%			
Yêu cầu đóng gói	Không	Có	Có	Có
Tồn kho đầu kỳ tại trung tâm phân phối (cái)	115	27	133	45
Tồn kho đầu kỳ tại kho 1 (cái)	42	19	17	21
Tồn kho đầu kỳ tại kho 2 (cái)	56	35	28	37
Nhu cầu sản phẩm mới (cái)	2.835	872		
Công suất của trung tâm phân phối (CBM)	6.000		4.500	

Tham số	Sản phẩm mới A	Sản phẩm mới E	Sản phẩm trả về AA	Sản phẩm trả về EE
Công suất của kho 1 (CBM)	2.000		1.200	
Công suất của kho 2 (CBM)	2.000		1.200	
Giới hạn carbon (kg. CO2-eq/cái)	0,54			
Mức phí phát thải carbon (\$/kg. CO2-eq)	0,15			

Bảng 2. Khoảng cách giữa các cơ sở trong mạng lưới

Điểm đi	Ký hiệu	Điểm đến	Ký hiệu	Khoảng cách (km)
Nhà máy sản xuất	m_1	Trung tâm phân phối	DC	4.891
	m_2		DC	5.181
Trung tâm phân phối	DC	Kho	w_1	930
			w_2	1.719
Kho	w_1	Khách hàng	c_1	120
	w_2		c_2	140
Trung tâm phân phối	DC	Khách hàng	c_3	105

Mô hình MILP được giải bằng Python kết hợp thư viện CPLEX cho tổng chi phí vận hành tối ưu đạt 1.266.763,31 USD. Cơ cấu chi phí cho thấy vận tải là thành phần chiếm tỷ trọng lớn nhất (86,73%), trong đó vận tải xuôi chiếm 51,26% và vận tải ngược chiếm 35,48%. Chi phí lưu kho đứng thứ hai với 9,41%, trong khi các hoạt động đóng gói và tiêu hủy chiếm tỷ trọng không đáng kể. Tổng lượng phát thải carbon của phương án tối ưu đạt 1.688,43 kg.CO₂-eq,

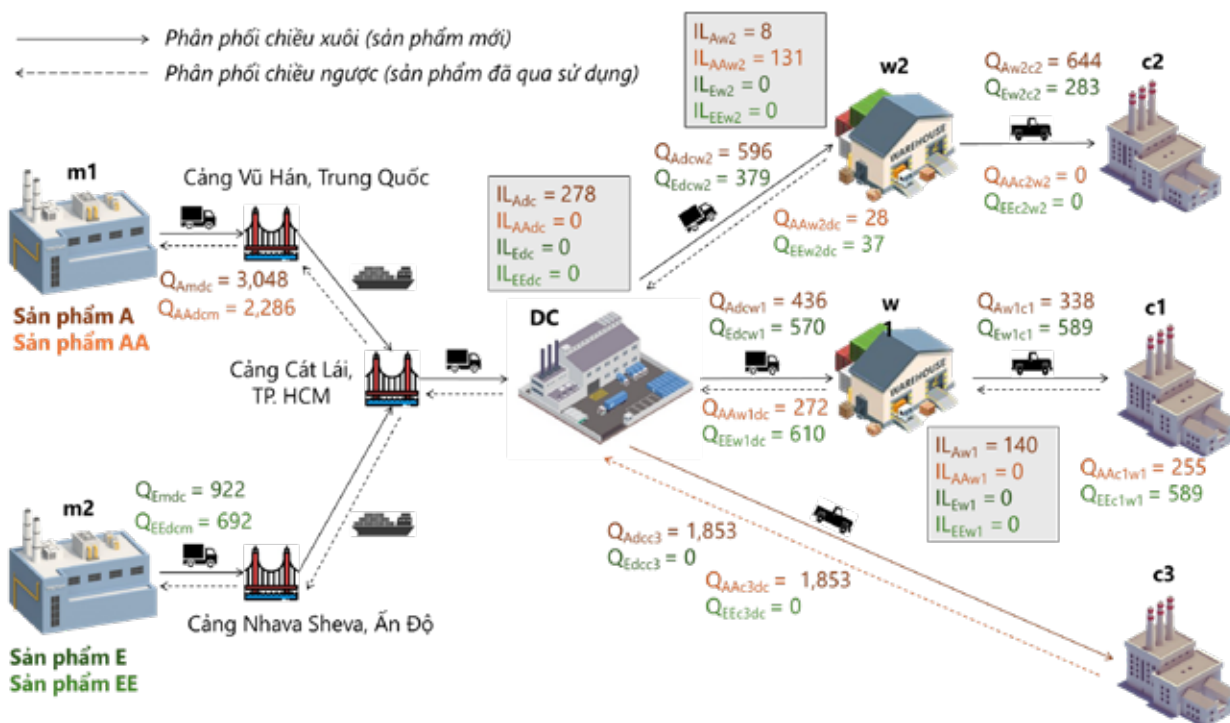
trong đó vận tải tiếp tục là nguồn phát thải chủ yếu (96,97%). Ngược lại, phát thải từ lưu kho, đóng gói lại và tiêu hủy cộng gộp chiếm dưới 4%, cho thấy tác động môi trường tập trung chủ yếu ở hoạt động vận chuyển. Kết quả chi tiết được tổng hợp tại Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả tối ưu của mô hình

Hoạt động	Chi phí (USD)	Tỷ trọng chi phí	Phát thải carbon (kg.CO2-eq)	Tỷ trọng phát thải
Vận tải xuôi	649.334,63	51,26%	977,90	57,92%
Lưu kho	119.253,57	9,41%	659,36	39,05%
Đóng gói	46.544,20	3,67%	26,70	1,58%
Vận tải ngược	449.386,30	35,48%	13,72	0,81%
Tiêu hủy hàng	1.991,35	0,16%	10,75	0,64%
Phát thải carbon	253,26	0,02%		
Tổng chi phí	1.266.763,31	100,00%	1.688,43	100,00%

Mạng lưới phân phối đề xuất (Hình 1) cho thấy tồn kho phụ tùng thu hồi được đưa về mức 0 tại các điểm nút nhằm tối thiểu hóa chi phí lưu kho. Về phân bổ vận chuyển, mô hình ưu tiên phân phối theo lợi thế chi phí khu vực: Phụ tùng A tập trung cung ứng cho miền Nam (c3), trong khi phụ tùng E được phân phối cho miền Trung (c1) và miền Bắc (c2). Kết quả này phản ánh sự cần thiết của việc phối hợp giữa chiến lược bán hàng và tối ưu hóa phân phối để nâng cao hiệu quả chi phí toàn mạng lưới.

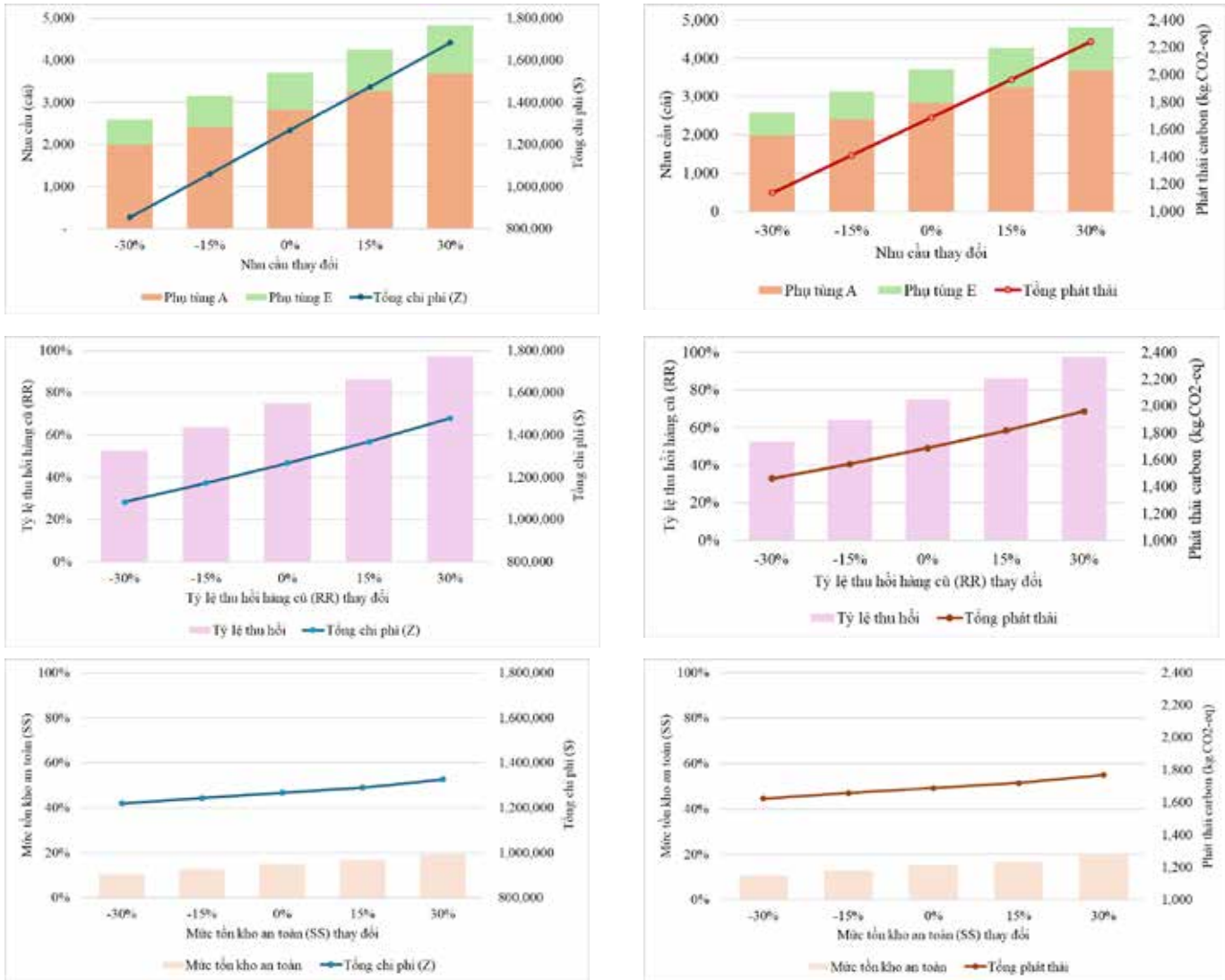
Đối với logistics ngược, hàng thu hồi được ưu tiên thu gom tại các khu vực có chi phí vận chuyển thấp hơn, chủ yếu từ miền Nam (c3) và miền Trung (c1), qua đó hạn chế chi phí và phát thải từ vận tải ngược.



Hình 1. Mạng lưới phân phối tối ưu được đề xuất

Để đánh giá độ tin cậy của nghiệm tối ưu, bài toán được giải lại bằng Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA). Thuật toán được lập trình trên Python với các tham số chính: Quy mô quần thể 120 - 180, chọn lọc đấu loại 4 - 8, tỷ lệ đột biến 0,05 - 0,25, độ lệch chuẩn đột biến 40, số thế hệ tối đa 1.500 và ngưỡng dừng 50 thế hệ không cải thiện. Kết quả tốt nhất của GA đạt tổng chi phí 1.282.623,97 USD và phát thải 1.745,20 kg CO₂-eq sau 65 giây tính toán. So với nghiệm MILP, chi phí và phát thải cao hơn lần lượt 1,24% và 3,25%, đồng thời thời gian giải dài hơn đáng kể. Điều này khẳng định độ tin cậy của nghiệm MILP và cho thấy phương pháp này phù hợp hơn với bài toán quy hoạch mạng lưới quy mô tương tự.

Phân tích độ nhạy được thực hiện đối với ba tham số trọng yếu gồm: Nhu cầu, tỷ lệ thu hồi tối thiểu (RR) và mức tồn kho an toàn (SSR). Mỗi tham số được điều chỉnh theo năm kịch bản: Giảm 30%, giảm 15%, mức cơ sở, tăng 15% và tăng 30% (các tham số còn lại giữ nguyên). Kết quả tại Hình 2 cho thấy sự gia tăng của các tham số đều làm tăng tổng chi phí và phát thải carbon. Trong đó, nhu cầu có mức tác động mạnh nhất do kéo theo gia tăng sản lượng vận chuyển và tồn kho. Tỷ lệ thu hồi ảnh hưởng đáng kể đến chi phí và phát thải logistics ngược. Ngược lại, tồn kho an toàn có mức tác động thấp nhất, hàm ý các quyết định tồn kho ít nhạy hơn so với quản trị nhu cầu và chính sách thu hồi.



Hình 2. Tổng hợp kết quả phân tích độ nhạy

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng mô hình Quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MILP) để xác định phương án vận hành tối ưu cho mạng lưới phân phối phụ tùng trong bối cảnh có ràng buộc phát thải carbon. Kết quả cho thấy vận tải là thành phần chi phối cả về chi phí và phát thải. Do đó, các giải pháp ưu tiên gồm: Lựa chọn phương tiện và nhà vận chuyển có mức phát thải thấp, tăng hệ số chất tải (tăng số lượng sản phẩm/chuyến) và giảm số chuyến vận chuyển. Để thực hiện hiệu quả, doanh nghiệp cần xây dựng chiến lược phân bổ sản phẩm theo khu vực nhằm tạo đủ quy mô vận chuyển, từ đó có thể điều chỉnh phương án tuyến/điểm trung chuyển (ví dụ: lựa chọn cảng đích gần khu vực mục tiêu hơn và chuyển hàng trực tiếp đến kho khu vực), đồng thời nâng cao quản trị nhu cầu theo từng nhóm sản phẩm. Khi dự báo nhu cầu tin cậy hơn, doanh nghiệp có cơ sở để giảm mức tồn kho an toàn và thời gian lưu kho, qua đó giảm chi phí liên quan.

Phân tích độ nhạy chỉ ra rằng khi nhu cầu, tỷ lệ thu hồi và mức tồn kho an toàn gia tăng, tổng chi phí và phát thải carbon đều tăng theo

chiều thuận; trong đó nhu cầu là yếu tố tác động mạnh nhất. Vì tỷ lệ thu hồi chi phối trực tiếp quy mô logistics ngược, doanh nghiệp cần thương lượng với nhà sản xuất để thiết lập mức thu hồi hợp lý, đồng thời gắn với cơ chế khuyến khích phù hợp (hoàn phí cao hơn hoặc giá bán thấp hơn) nhằm thúc đẩy thu hồi sản phẩm đã qua sử dụng.

Về ý nghĩa thực tiễn, kết quả nghiên cứu cho thấy tối ưu hóa mạng lưới phân phối có thể mang lại đồng thời ba nhóm lợi ích. Trước hết, ở góc độ kinh tế, phương án tối ưu giúp giảm tổng chi phí vận hành, qua đó tạo dư địa để doanh nghiệp giảm giá thành hoặc gia tăng lợi nhuận nhằm tái đầu tư. Ở góc độ xã hội, kết quả gợi mở nhu cầu nâng cấp hệ thống quản trị vận tải tích hợp với quản lý kho bãi để theo dõi tồn kho theo thời gian thực và lập kế hoạch hiệu quả hơn, từ đó nâng cao năng lực nhân sự và giảm các tác vụ thủ công. Ở góc độ môi trường, việc cải thiện thiết kế và vận hành mạng lưới phân phối góp phần cắt giảm phát thải carbon, thu hẹp dấu chân carbon và giảm tiêu thụ năng lượng, tài nguyên. Trong bối cảnh Việt Nam đang xây dựng cơ chế trao đổi hạn ngạch phát thải (cap-and-trade), mô hình trong nghiên cứu có thể được sử dụng như một công cụ mô phỏng nhằm lượng hóa mối quan hệ giữa phát thải, chi phí và mục tiêu bền vững. Theo đó, hạn ngạch carbon được xem như ngưỡng ràng buộc và chi phí phát thải phản ánh chi phí mua phần hạn ngạch vượt mức.

Về đóng góp học thuật, nghiên cứu cung cấp một khuôn khổ tối ưu hóa MILP cho mạng lưới phân phối khép kín có xét đồng thời vận tải hai chiều, tồn kho, đóng gói, tiêu hủy và phát thải carbon. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện mới tập trung vào phân khúc phân phối và logistics ngược, chưa tích hợp các quyết định thượng nguồn như thu mua và sản xuất, nên phạm vi phản ánh chưa bao quát toàn bộ chuỗi cung ứng. Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình có thể được mở rộng theo hướng thích ứng với các nhóm hàng có yêu cầu đặc thù về bảo quản và vận chuyển; tích hợp các phương pháp tối ưu hóa dưới bất định (ngẫu nhiên) để xử lý biến động nhu cầu và chi phí carbon; xem xét các cơ chế kiểm soát carbon khác nhau, đồng thời bổ sung mục tiêu tối đa hóa lợi nhuận nhằm nâng cao tính linh hoạt và khả năng ứng dụng trong thực tiễn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Cục Thống kê. Báo cáo tình hình kinh tế - xã hội quý IV và năm 2025, 2026.
- [2] M. Watson and S. Lewis. *Supply Chain Network Design: Applying Optimization and Analytics to the Global Supply Chain*, 2nd ed. San Francisco, CA, USA: Berrett-Koehler Publishers, 2023.
- [3] H. Voordijk. Physical distribution costs in construction supply chains: A systems approach. *International Journal of Logistics Systems and Management*, vol. 7, no. 4, pp. 456-471, 2010.
- [4] Cục Biến đổi khí hậu. Văn bản hợp nhất 10/VBHN-BTNMT năm 2025 hợp nhất Nghị định quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn. Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2025.
- [5] World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. *A Corporate Accounting and Reporting Standard*, Revised ed., 2004.
- [6] T. N. N. Phương, H. T. T. Hòa, N. T. Danh. Nghiên cứu mô hình tối ưu chi phí mạng lưới phân phối trong chuỗi cung ứng bền vững với ràng buộc phát thải carbon. *Tạp chí Xây dựng*, no. 03, 2026, ISSN: 2734-9888.
- [7] E. Mardan, K. Govindan, H. Mina and S. M. Gholami-Zanjani. An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production*, vol. 235, 2019.
- [8] Z. Mohtashami, A. Aghsami, and F. Jolai. A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, vol. 242, Art. no. 118452, 2020.
- [9] X. Fang, L. Nie, and H. Mu. Research progress on logistics network optimization under low carbon constraints, in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*,

vol. 615, no. 1, Art. no. 012060, 2020.

[10] Z. Zhang, K. Matsubae and K. Nakajima. Impact of remanufacturing on the reduction of metal losses through the life cycles of vehicle engines. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 170, Art. no. 105614, 2021.

[11] S. M. Jaigirdar, S. Das, A. R. Chowdhury, S. Ahmed and R. K. Chakraborty. Multi-objective multi-echelon distribution planning for perishable goods supply chain: A case study. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, pp. 1-19, 2022.

[12] A. Boskabadi, M. Mirmozaffari, R. Yazdani and A. Farahani. Design of a distribution network in a multi-product, multi-period green supply chain system under demand uncertainty. *Sustainable Operations and Computers*, vol. 3, pp. 226-237, 2022.

[13] Y. Gao, S. Lu, H. Cheng and X. Liu. Data-driven robust optimization of dual-channel closed-loop supply chain network design considering uncertain demand and carbon cap-and-trade policy. *Computers and Industrial Engineering*, vol. 187, Art. no. 109811, 2024.