

Nghiên cứu thuật toán lai ghép tối ưu hoá quản lý cung ứng công trường: Ứng dụng thực nghiệm cho công trình cao tầng ở Việt Nam

Nguyễn Anh Đức¹, Phạm Đức Thắng^{2*}, Trần Quốc Bằng², Trần Đức Học²

¹Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

²Trường Đại học Bách Khoa thành phố Hồ Chí Minh, Đại học Quốc gia thành phố Hồ Chí Minh

TỪ KHOÁ

Quản lý cung ứng tồn kho
Cao tầng
Quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MILP)
Thuật toán di truyền
Thuật toán lai ghép

TÓM TẮT

Quản lý tồn kho trên công trường xây dựng có ảnh hưởng lớn đến chi phí và tiến độ dự án, nhưng tối ưu hóa chiến lược đặt hàng vật liệu vẫn gặp nhiều khó khăn do sự xung đột giữa chi phí và độ phức tạp tính toán. Nghiên cứu này giải quyết vấn đề tối ưu tồn kho trong một dự án xây dựng nhà cao tầng tại Hà Nội, Việt Nam, bằng ba phương pháp: phương pháp chính xác (Exact) sử dụng mô hình quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MILP), giải thuật di truyền (GA), và phương pháp lai ghép (Hybrid) kết hợp GA và MILP. Các phương pháp được áp dụng vào một công trình cao 25 tầng, với tiến độ thi công phần thân là 24 tuần, xét đến các vật liệu chính như xi măng, thép, gạch, cát và đá. Kết quả cho thấy phương pháp Exact đạt chi phí tồn kho thấp nhất nhưng mất nhiều thời gian tính toán, không khả thi với các dự án quy mô lớn. Giải thuật GA nhanh chóng nhưng ít tối ưu. Phương pháp Hybrid kết hợp giữa GA và MILP đạt được sự cân bằng tốt giữa tốc độ và chất lượng giải pháp, phù hợp với thực tế quản lý xây dựng khi thời gian bị hạn chế. Nghiên cứu khẳng định giá trị của phương pháp Hybrid trong quản lý tồn kho và mở ra hướng nghiên cứu mới cho các công cụ ra quyết định thời gian thực trong quản lý dự án.

KEYWORDS

Inventory management
High-rise
Mixed-Integer Linear Programming (MILP)
Genetic algorithm
Hybrid algorithm

ABSTRACT

Effective inventory management on construction sites significantly influences both project costs and timelines. However, optimizing material ordering strategies remains challenging due to the conflict between cost and computational complexity. This study addresses inventory optimization in a high-rise building project in Hanoi, Vietnam, using three approaches: the exact method (Exact) with mixed integer linear programming (MILP), genetic algorithm (GA), and a hybrid method (Hybrid) combining GA and MILP. These methods are applied to a 25-story building with a 24-week superstructure construction schedule, considering key materials like cement, steel, bricks, sand, and stone. The results indicate that the Exact method minimizes inventory costs but requires a lengthy computation time, making it impractical for larger projects. While the GA algorithm is faster, it produces less optimal results. The Hybrid method, combining GA and MILP, strikes an effective balance between speed and solution quality, making it highly suitable for construction management where time constraints exist. This study highlights the practical value of the Hybrid method in inventory management and paves the way for future research into real-time decision-making tools for project management.

1. Mở đầu

Trong các dự án xây dựng, đặc biệt ở những khu vực đô thị phát triển nhanh như tại Việt Nam, việc quản lý và tối ưu hóa tồn kho vật liệu là một thách thức quan trọng trong việc cân bằng chi phí, tiến độ và chất lượng công trình. Xu hướng phát triển mạnh mẽ của hạ tầng đô thị tại Việt Nam đang yêu cầu các công trình cao tầng, dự án giao thông và khu công nghiệp có quy mô lớn và độ phức tạp cao. Trong bối cảnh đó, nhu cầu sử dụng các vật liệu xây dựng truyền thống như xi măng, thép, gạch, cát, đá ngày càng lớn và có sự biến động mạnh mẽ theo tiến độ thi công. Tồn kho vật liệu không chỉ là vấn đề đơn giản về tích trữ

nhằm đáp ứng nhu cầu, mà còn phải đối mặt với các áp lực lớn về chi phí, không gian lưu trữ và an toàn trong khu vực tập kết vật liệu, tiến độ thi công, cũng như điều kiện giao thông vận chuyển. Những yếu tố này bao gồm chi phí mua sắm vật liệu, chi phí đặt hàng, chi phí lưu kho, chi phí hao hụt do điều kiện thời tiết và môi trường. Đồng thời, không gian lưu trữ vật liệu thường bị hạn chế và phải đảm bảo an toàn khi tập kết, trong khi tiến độ thi công yêu cầu cung cấp lượng vật liệu lớn vào các tuần cao điểm, và việc thiếu hụt vật liệu có thể gây chậm tiến độ. Điều kiện giao thông cũng ảnh hưởng lớn, với các yếu tố như tắc đường, cấm giờ, hay khoảng cách vận chuyển dài làm tăng thời gian đáp ứng không ổn định [1].

*Liên hệ tác giả: thang.bmkt@hcmut.edu.vn

Nhận ngày 23/04/2025, sửa xong ngày 05/05/2025, chấp nhận đăng ngày 06/05/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2025.939>

Tại các nước đang phát triển, trong đó có Việt Nam, chi phí vật liệu trong các dự án xây dựng cao tầng có thể chiếm tới 50–60% tổng chi phí dự án [2]. Vì vậy, bất kỳ cải tiến nào trong công tác quản lý tồn kho và đặt hàng vật liệu đều có thể mang lại hiệu quả kinh tế đáng kể. Tuy nhiên, thực tế cho thấy các doanh nghiệp xây dựng trong nước chủ yếu áp dụng các phương pháp quản lý thủ công, dựa vào dự đoán kinh nghiệm của kỹ sư hiện trường. Điều này dẫn đến tình trạng đặt thừa hoặc thiếu vật liệu, gây phát sinh nhiều chi phí và rủi ro không lường trước được. Trên bình diện quốc tế, nghiên cứu về tối ưu hóa quản lý tồn kho đã phát triển từ lâu, với nhiều mô hình nền tảng như EOQ, MILP, và tồn kho ngẫu nhiên [3]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu chỉ tập trung vào các ngành sản xuất hoặc cung ứng chung, ít quan tâm đến những đặc thù của ngành xây dựng, như không gian kho hạn chế, tiến độ thi công thay đổi theo giai đoạn và ảnh hưởng lớn của thời gian giao hàng. Trong những năm gần đây, sự phát triển của các thuật toán metaheuristic, như thuật toán di truyền (GA) và thuật toán bầy đàn (PSO), cũng như các mô hình lai ghép kết hợp giữa solver chính xác và heuristic, đã mở ra những hướng giải quyết mới cho các bài toán có quy mô và độ phức tạp cao trong ngành xây dựng [4].

Từ thực tiễn trên, nghiên cứu này tập trung vào việc đề xuất và triển khai một mô hình tối ưu hóa quản lý tồn kho đa vật liệu, đa giai đoạn, có thể áp dụng cho các dự án xây dựng cao tầng tại Việt Nam. Các mục tiêu cụ thể của nghiên cứu bao gồm: xây dựng mô hình toán học dạng Mixed Integer Linear Programming (MILP) nhằm phản ánh đầy đủ các ràng buộc và chi phí quản lý vật liệu, phát triển và so sánh các phương pháp giải quyết vấn đề, gồm: (1) phương pháp chính xác (Exact) sử dụng solver mã nguồn mở, (2) thuật toán metaheuristic (GA), và (3) mô hình lai ghép (Hybrid) kết hợp các ưu điểm của cả hai phương pháp. Nghiên cứu cũng sẽ ứng dụng và đánh giá hiệu quả của mô hình trên dữ liệu thực tế được đơn giản hóa, phản ánh nhu cầu vật liệu và điều kiện kho bãi tại một công trình cao tầng ở một đô thị tại Việt Nam.

Phần còn lại của bài báo được cấu trúc như sau: phần 2 cung cấp tổng quan về các mô hình tối ưu hóa tồn kho, đặc biệt nhấn mạnh đến ngành xây dựng; phần 3 mô tả mô hình toán học và quy trình xây dựng thuật toán (từ solver exact đến metaheuristic và lai ghép); phần 4 trình bày kết quả thực nghiệm, phân tích so sánh các phương pháp, và thảo luận về ý nghĩa của nghiên cứu đối với ngành xây dựng tại Việt Nam; cuối cùng, phần kết luận đưa ra các tổng kết và đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. Tổng quan về các mô hình tối ưu quản lý cung ứng công trường

Quản lý tồn kho vật liệu đóng vai trò cực kỳ quan trọng trong ngành xây dựng, vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến chi phí, tiến độ và hiệu quả tổng thể của các dự án. Khác với các ngành sản xuất truyền thống, trong xây dựng, công tác quản lý tồn kho phải đối mặt với nhiều yếu tố phức tạp và khó kiểm soát. Các yếu tố này bao gồm sự biến động mạnh mẽ của nhu cầu vật liệu, đặc biệt là trong những giai đoạn thi công cao điểm, điều kiện vận chuyển không ổn định như tắc nghẽn giao thông,

cấm giờ, hoặc khoảng cách vận chuyển dài. Ngoài ra, không gian kho bãi trên công trường cũng thường rất hạn chế, điều này càng làm tăng độ khó trong việc lưu trữ và bảo quản vật liệu một cách hiệu quả [5]. Hơn nữa, thời gian đặt hàng và giao nhận vật liệu cũng thường không ổn định, ảnh hưởng đến khả năng cung cấp kịp thời. Chính vì những đặc điểm đặc thù này, ngành xây dựng đã thúc đẩy nghiên cứu và ứng dụng các mô hình tối ưu hóa quản lý tồn kho chuyên biệt, nhằm không chỉ giảm thiểu chi phí mà còn nâng cao hiệu quả công việc, đảm bảo tiến độ thi công và đáp ứng yêu cầu chất lượng công trình. Những nghiên cứu này giúp giải quyết các thách thức quản lý vật liệu trong xây dựng và cải thiện hiệu quả tổng thể của các dự án [6].

Các mô hình tối ưu quản lý tồn kho truyền thống, như Economic Order Quantity (EOQ) [7], Economic Production Quantity (EPQ) [6] và mô hình tồn kho đa kỳ (multi-period inventory model) [8], đã được phát triển từ rất lâu và chủ yếu tập trung vào việc tối ưu hóa tổng chi phí tồn kho, bao gồm chi phí đặt hàng, chi phí lưu trữ và chi phí thiếu hụt vật tư. Mô hình EOQ, ví dụ, được áp dụng rộng rãi trong công nghiệp sản xuất nhờ vào khả năng tối ưu chi phí hiệu quả. Tuy nhiên, khi áp dụng vào ngành xây dựng, mô hình này thường gặp khó khăn do đặc thù về không gian kho hạn chế và nhu cầu vật liệu thay đổi nhanh chóng theo tiến độ thi công [9]. Nhận thức được điều này, một số nghiên cứu gần đây đã tìm cách cải tiến mô hình EOQ, tích hợp các yếu tố bất định như thời gian cung ứng ngẫu nhiên, sự biến động giá cả và điều kiện giao hàng thực tế trong các công trình xây dựng [10, 11]. Cụ thể, các mô hình EOQ cải tiến đã được đề xuất, trong đó xem xét lead-time (thời gian đáp ứng) ngẫu nhiên (stochastic) và hạn chế không gian kho bãi, giúp tối ưu hóa việc quản lý các vật liệu quan trọng như thép và xi măng, và đã được áp dụng hiệu quả trong nhiều dự án xây dựng [12, 13].

Trong ngành xây dựng, do đặc thù luôn phải cân bằng giữa nhiều mục tiêu như chi phí, thời gian, chất lượng và tính bền vững, các mô hình tối ưu hóa tồn kho đa mục tiêu ngày càng được quan tâm nghiên cứu [14]. Mao, J., et al. [15] đã phát triển mô hình tối ưu tồn kho tích hợp giữa chi phí và tác động môi trường (carbon footprint) trong các dự án xây dựng hạ tầng, sử dụng kỹ thuật tối ưu hóa nguyên kết hợp với mô hình MILP (Mixed Integer Linear Programming). Một nghiên cứu khác của Yojana, R. M., et al. [16] sử dụng phương pháp Goal Programming để cân bằng đồng thời chi phí, thời gian đặt hàng và rủi ro thiếu hụt vật liệu trong các dự án xây dựng tại đô thị. Hướng nghiên cứu này cũng mở rộng sang các mô hình tối ưu tồn kho kết hợp giữa quản lý chuỗi cung ứng và tối ưu hóa tồn kho. Cụ thể, Koutsokosta, A. and Katsavounis, S. [17] phát triển mô hình quản lý tồn kho kết hợp vận tải, sử dụng MILP để giảm thiểu tổng chi phí tồn kho và vận chuyển trong các dự án xây dựng lớn. Các nghiên cứu này chỉ ra rằng việc sử dụng các kỹ thuật lập trình tối ưu đa mục tiêu không chỉ giúp cải thiện khả năng ra quyết định mà còn nâng cao hiệu quả quản lý tồn kho trong các dự án xây dựng có quy mô lớn và độ phức tạp cao [18].

Các kỹ thuật tối ưu heuristic và metaheuristic như Genetic Algorithm (GA) – thuật toán di truyền, Particle Swarm Optimization (PSO) – thuật toán bầy đàn, hay Simulated Annealing (SA) – tối luyện

mô phỏng, ngày càng được sử dụng phổ biến để khắc phục những hạn chế của các mô hình tối ưu chính xác trong các bài toán có kích thước lớn và phức tạp [19]. Đặc biệt, GA là một trong những thuật toán được áp dụng rộng rãi trong ngành xây dựng nhờ khả năng tìm kiếm lời giải nhanh chóng và hiệu quả cho các bài toán tồn kho có quy mô lớn và đa chiều. Chẳng hạn, nghiên cứu của Said, H. and El-Rayes, K. [13] đã áp dụng GA để tối ưu hóa lịch đặt hàng vật liệu xây dựng cho các dự án lớn, chứng minh rằng GA có hiệu quả cao trong việc giảm tổng chi phí tồn kho, đồng thời xem xét các yếu tố như thời gian đặt hàng, chi phí vận chuyển, và các hạn chế về kho bãi. Một nghiên cứu tương tự của Son, P. V. H., et al. [10] sử dụng thuật toán chuẩn chuẩn (dragonfly) và thuật toán PSO để tối ưu quản lý tồn kho vật liệu chính trong các dự án xây dựng công trình lớn, cho thấy phương pháp này rất hiệu quả trong việc giải quyết các bài toán tồn kho chịu nhiều biến động và ràng buộc. Các nghiên cứu này khẳng định hiệu quả của các thuật toán heuristic và metaheuristic trong việc tối ưu hóa quản lý tồn kho trong ngành xây dựng.

Trong những năm gần đây, xu hướng sử dụng các mô hình lai ghép (Hybrid) trong tối ưu hóa tồn kho xây dựng đã trở nên phổ biến, nhờ khả năng tận dụng ưu điểm của cả hai phương pháp chính xác và heuristic/metaheuristic. Các mô hình lai ghép này thường bắt đầu bằng việc sử dụng giải pháp heuristic/metaheuristic để tạo ra nghiệm ban đầu, sau đó áp dụng các kỹ thuật chính xác như MILP để cải thiện nghiệm, hoặc ngược lại [20, 21]. Ví dụ, nghiên cứu của de Paula Vidal, G. H., et al. [22] phát triển mô hình lai ghép kết hợp GA, mờ (fuzzy), và mạng thần kinh nhân tạo nhằm tối ưu hóa quản lý cung ứng và tồn kho, cho thấy rằng mô hình lai ghép mang lại hiệu quả cao hơn rõ rệt so với việc chỉ áp dụng một phương pháp đơn lẻ. Một nghiên cứu gần đây của Bhowmik, O. and Parvez, S. [23] sử dụng kỹ thuật kết hợp giữa mô phỏng Monte Carlo và MILP để tối ưu hóa thiết kế chuỗi cung ứng, giúp cân bằng hiệu quả giữa chi phí tồn kho và khả năng đáp ứng nhanh với các thay đổi thực tế. Những nghiên cứu này chỉ ra rằng mô hình lai ghép không chỉ tối ưu hóa hiệu quả chi phí mà còn giúp giải quyết tốt hơn các vấn đề phức tạp trong việc quản lý tồn kho trong ngành xây dựng.

Trong những năm gần đây, các nghiên cứu về tối ưu tồn kho trong xây dựng đã có xu hướng tích hợp nhiều yếu tố phức tạp hơn, như rủi ro, sự bất định về cung ứng, tính bền vững môi trường và các ràng buộc thực tế đặc thù của địa phương [24]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện tại vẫn gặp phải nhiều hạn chế khi mở rộng các mô hình phức tạp ra các dự án có quy mô lớn, chủ yếu do vấn đề thời gian tính toán và khả năng xử lý của các phương pháp chính xác [25]. Đặc biệt, tại Việt Nam và nhiều quốc gia đang phát triển, việc áp dụng các mô hình tối ưu hóa tiên tiến vẫn còn hạn chế, chủ yếu do thiếu nghiên cứu thực nghiệm và việc triển khai chưa đủ rõ ràng. Chính vì vậy, nghiên cứu này tập trung vào việc phát triển và đánh giá các phương pháp tối ưu hóa quản lý tồn kho phù hợp với đặc thù ngành xây dựng, kết hợp các mô hình heuristic, chính xác và lai ghép, nhằm mang lại các giải pháp thực tế, khả thi và hiệu quả cao hơn cho công tác quản lý dự án xây dựng tại Việt Nam.

3. Phát triển toán học và xây dựng thuật toán

3.1. Mô hình MILP cho bài toán quản lý tồn kho

Mixed-Integer Linear Programming (MILP) là một phương pháp tối ưu toán học được sử dụng để tìm ra nghiệm tối ưu cho các bài toán có hàm mục tiêu và các ràng buộc dưới dạng tuyến tính, trong đó một hoặc một số biến số được yêu cầu là số nguyên [26]. MILP là một dạng mở rộng của Linear Programming (LP), được phát triển chính thức từ những năm 1950 thông qua nghiên cứu của Gomory (1958), người đã giới thiệu phương pháp cắt Gomory để giải quyết các bài toán này [27]. Ngày nay, MILP được áp dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như lập kế hoạch sản xuất, logistic và quản lý chuỗi cung ứng, nhờ khả năng mô hình hóa linh hoạt các quyết định dạng rời rạc và liên tục trong thực tế. Phương pháp này cho phép giải quyết các bài toán tối ưu phức tạp trong các tình huống thực tế, nơi mà các quyết định phải được đưa ra với sự kết hợp giữa các yếu tố liên tục và rời rạc, giúp cải thiện hiệu quả và tối ưu hóa quá trình ra quyết định.

Xét T giai đoạn (mỗi giai đoạn tương ứng một tuần hoặc một mốc thời gian), và I loại vật liệu (xi măng, thép, gạch, cát, đá,...). Ký hiệu chi tiết như sau:

- Tập chỉ số:
 - $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ – giai đoạn thời gian (tuần).
 - $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ – loại vật liệu.
- Tham số:
 - $D_{i,t}$: Nhu cầu (sử dụng) vật liệu i tại giai đoạn t .
 - C_i : Đơn giá mua vật liệu i .
 - OC_i : Chi phí cố định mỗi lần đặt hàng vật liệu i .
 - h_i : Chi phí lưu kho (holding cost) cho vật liệu i .
 - CAP_i : Giới hạn sức chứa kho (có thể áp dụng chung hoặc riêng CAP_i).
 - $Lead_i$: Thời gian giao hàng (lead time) cho vật liệu i .
- Biến quyết định:
 - $x_{i,t}$: Lượng vật liệu i đặt mua tại giai đoạn t .
 - $y_{i,t} \in \{0, 1\}$: Biến nhị phân, bằng 1 nếu có đặt hàng vật liệu i ở giai đoạn t .
 - $s_{i,t} \geq 0$: Lượng tồn kho vật liệu i cuối giai đoạn t .
- Hàm mục tiêu:

Tối thiểu hóa tổng chi phí, gồm: (i) chi phí mua vật liệu, (ii) chi phí cố định đặt hàng, (iii) chi phí lưu kho:

$$\min \left[\underbrace{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I C_i x_{i,t}}_{\text{Chi phí mua}} + \underbrace{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I OC_i y_{i,t}}_{\text{Chi phí cố định}} + \underbrace{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I h_i s_{i,t}}_{\text{Chi phí lưu kho}} \right] \quad (1)$$

- Ràng buộc tồn kho và sức chứa:

Cân bằng tồn kho:

$$s_{i,t} = s_{i,t-1} + x_{i,t} - D_{i,t}, \quad \forall i, t = 1, \dots, T \quad (2)$$

với giả định $s_{i,0}$ là tồn đầu kỳ (thường có thể = 0).

Nếu có $Lead_i$, ta phải điều chỉnh $x_{i,t}$ ảnh hưởng đến $s_{i,t+Lead_i}$, ...
Không âm:

$$s_{i,t} \geq 0, \quad \forall i, t \quad (3)$$

Sức chứa kho (chung):

$$\sum_{i=1}^I s_{i,t} \leq CAP, \quad \forall t \quad (4)$$

hoặc (riêng từng vật liệu) $s_{i,t} \leq CAP_i$

- Ràng buộc đặt hàng (biến nhị phân):

Để tính chi phí đặt hàng cố định, ta dùng biến M:

$$x_{i,t} \leq M y_{i,t}, \quad \forall i, t \quad (5)$$

với M lớn (chẳng hạn $M \geq \text{nhu cầu tối đa}$). Nếu $x_{i,t} > 0$ thì buộc $y_{i,t} = 1$ dẫn đến OC_i xuất hiện trong hàm mục tiêu.

3.2. Tính phức tạp và bình luận mô hình

Mô hình trên là một Mixed Integer Linear Program (MILP) với $x_{i,t}, s_{i,t}$ (biến liên tục/nguyên không âm) và $y_{i,t}$ (biến nhị phân). Khi T và I lớn, bài toán thuộc loại NP-hard, thời gian giải tăng nhanh.

Khả năng mở rộng: Thêm ràng buộc vận chuyển, giờ cấm, chi phí carbon, hay mô hình nhiều kho. Thêm tính bất định để xây dựng mô hình ngẫu nhiên (stochastic).

3.3. Cơ sở cho các phương pháp giải

Sau khi xác lập mô hình MILP, ta có thể:

- Giải chính xác bằng các solver MILP (CBC, GLPK, Gurobi, CPLEX). Solver sẽ cho nghiệm tối ưu hoặc cận trên/cận dưới, tuy nhiên có thể tốn rất nhiều thời gian khi bài toán lớn.

- Heuristic / Metaheuristic (ví dụ: GA, PSO, ...) để tìm nghiệm khả thi nhanh hơn, nhưng không đảm bảo tối ưu tuyệt đối.

- Mô hình lai ghép (hybrid): Kết hợp exact + heuristic để vừa có tốc độ, vừa có chất lượng nghiệm tốt hơn so với chỉ metaheuristic.

Phần kế tiếp (3.4, 3.5) sẽ trình bày cấu trúc của các giải pháp: (i) Exact method, (ii) Giải thuật di truyền (GA), và (iii) Hybrid.

3.4. Phương pháp Exact: Sử dụng solver mã nguồn mở

- Ý tưởng chung:

Ta mô hình hóa bài toán (theo mục 3.1) vào một solver MILP (CBC, GLPK, ...). Solver sẽ:

- Xây dựng cây nhánh cận (branch-and-bound)
- Kết hợp cắt (Gomory, MIP cutting planes)
- Dừng sau một time_limit nhất định (ví dụ 1800s, 3600s) hoặc khi tìm thấy nghiệm tối ưu.

- Lợi thế và hạn chế:

- Ưu điểm: Lời giải (hoặc cận trên) tối ưu trong không gian MILP (nếu solver đủ thời gian).

- Nhược điểm: Dễ quá tải tính toán khi $T \times I$ lớn, dẫn đến thời gian chạy lâu hoặc dừng sớm.

- Áp dụng:

Thường solver exact được dùng như lời giải chuẩn để: (i) So sánh với heuristic, (ii) Làm cơ sở cận dưới, (iii) Tinh chỉnh nghiệm heuristic (trong mô hình lai).

3.5. Giải pháp Metaheuristic: Genetic Algorithm (GA)

Để tránh tình trạng solver exact tốn nhiều thời gian, ta cân nhắc một metaheuristic, ví dụ thuật toán di truyền. GA – thuật toán di truyền – là một thuật toán tìm kiếm dựa trên cơ chế tiến hóa và chọn lọc tự nhiên, lần đầu tiên được giới thiệu bởi Holland vào năm 1975 [28]. GA vận hành dựa trên nguyên lý tiến hóa sinh học, sử dụng các toán tử di truyền như lai ghép (crossover), đột biến (mutation), và chọn lọc (selection) để tạo ra các giải pháp mới. Thuật toán này thường được sử dụng để giải quyết các bài toán phức tạp có không gian nghiệm lớn, không liên tục, hoặc thiếu các tính chất thuận lợi cho các phương pháp toán học truyền thống. GA đã được ứng dụng thành công trong các lĩnh vực như tối ưu hóa lịch trình, quản lý tồn kho, quản lý dự án, và thiết kế kỹ thuật.

- Cấu trúc lời giải:

Mã hóa $x_{i,t}$ cho mọi i, t thành một “cá thể” (chromosome).

- Độ phù hợp:

$$\text{cost}(x) = \sum_{i,t} C_i x_{i,t} + \sum_{i,t} (OC_i \cdot 1_{x_{i,t} > 0}) + \sum_{i,t} h_i s_{i,t}(x) \quad (6)$$

(Trong đó $s_{i,t}$ được suy ra từ cân bằng tồn kho, có thể phải chỉnh sửa lời giải nếu $s_{i,t} < 0$ hoặc vượt sức chứa.)

- Toán tử:

- Selection: tournament, roulette...

- Crossover: trộn 2 cá thể (theo tuần hoặc theo vật liệu).

- Mutation: thay đổi ngẫu nhiên một phần vector x .

• Chỉnh sửa: chỉnh lại lượng đặt hàng nếu tồn kho âm hoặc vượt CAP.

• Lập: Tiến hóa qua nhiều thế hệ, dừng khi đủ vòng lặp/không cải thiện.

- Đặc điểm:

- Ưu điểm: GA thường chạy nhanh hơn solver exact trên instance lớn, cho lời giải khả thi chấp nhận được.

- Hạn chế: Không đảm bảo tối ưu, có thể bị kẹt local optimum, cần tinh chỉnh tham số (quần thể, mutation...).

3.6. Mô hình lai ghép (Hybrid)

Kết hợp solver exact và GA để khai thác ưu điểm của cả hai.

“Khởi tạo = GA → Tinh chỉnh = Solver”. Chạy GA sinh một lời giải tốt (hoặc một quần thể). Lấy lời giải tốt nhất làm “MIP start” cho solver exact. Solver tiếp tục ràng buộc MILP để cải thiện (nếu kịp thời gian).

3.7. Tóm lược xây dựng thuật toán

- Mã giả GA:

Algorithm GA:

1. Khởi tạo quần thể P gồm N cá thể (mã hóa $x[i, t]$)
2. Tính fitness mỗi cá thể (chi phí + phạt nếu vi phạm).
3. Lặp (gen = 1..MaxGen):
 - 3.1 Chọn lọc (Selection) - tournament
 - 3.2 Lai ghép (Crossover) - ghép cặp
 - 3.3 Đột biến (Mutation)
 - 3.4 Repair (đảm bảo không âm, không quá CAP)

3.5 Tính fitness

3.6 Cập nhật quần thể

4. Trả về cá thể tốt nhất

- Mã giả Hybrid:

Algorithm Hybrid:

1. best_sol_ga = GA_Inventory(...)
2. Lập mip_start_dict = best_sol_ga
3. Gọi solver MILP (time_limit = X) với MIP start
4. Lấy lời giải hybrid (có thể = best_sol_ga, hoặc tốt hơn)
5. Kết thúc.

3.8. Dự đoán kết quả

Để giải mô hình MILP, có ba hướng: exact (solver), metaheuristic (GA), hybrid.

- Exact: chi phí tốt nhất nhưng thời gian giải có thể rất lâu (nhiều khi dừng sớm).
- GA: thường nhanh hơn, dễ áp dụng kể cả với dự án phức tạp, chắc chắn tìm ra nghiệm, nhưng chất lượng có thể chưa tối ưu.
- Hybrid: kết hợp GA + solver, giúp rút ngắn thời gian solver hoặc cải thiện nghiệm GA.

Tiếp theo, nghiên cứu sẽ thực hiện trên một dự án để so sánh chi phí, thời gian, cũng như hành vi đặt hàng/tồn kho cụ thể.

4. Áp dụng thực nghiệm và thảo luận

Các phương pháp Exact, GA, Hybrid được áp dụng tính toán trên một dự án thực tế tại Hà Nội. Quy mô dự án là một công trình cao 25 tầng, có tiến độ dự kiến thi công phần thân thô là 24 tuần. Nhu cầu sử dụng các vật liệu chính được cung cấp bởi ban chỉ huy công trình. Trong đó, mặc dù việc xây dựng công trình sử dụng bê tông thương phẩm, nghiên cứu này đã chuyển thành bê tông trộn tại chỗ cho phù hợp với mục đích nghiên cứu. Bảng 1 miêu tả trích lược nhu cầu vật liệu của công trình.

Bảng 1. Nhu cầu các vật liệu chính theo các mốc thời gian.

Tuần	Xi măng (t)	Thép (t)	Gạch (1000 viên)	Cát (m ³)	Đá dăm (m ³)
1	40	20	10	25	30
2	55	25	15	30	35
3	60	30	20	35	40
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...
22	60	25	20	35	40
23	40	20	15	25	30
24	30	15	12	20	25

Ngoài ra, ban chỉ huy công trường cũng cung cấp cho nghiên cứu các thông tin khác về công trường và thị trường cần thiết cho quá trình

tính toán (Bảng 2).

Bảng 2. Các thông số cung ứng của công trường.

Vật liệu	Xi măng	Thép	Cát	Đá	Gạch
Giá mua (VND/đơn vị)	1.650.000	16.200	320.000	360.000	1.000
Chi phí đặt hàng (VND/đơn hàng)	2.000.000	3.400.000	920.000	1.160.000	680.000
Chi phí lưu kho (VND/đơn vị/tuần)	24.000	120.000	2.400	3.600	1.200
Thời gian giao hàng (tuần)	1	2	0.5	0.5	1.5
Tồn kho ban đầu (đơn vị)	200	100	500	300	1.000
Tồn kho an toàn (đơn vị)	50	20	100	60	200
Sức chứa tối đa (đơn vị)	1.000	500	2.000	1.500	5.000

Để xem xét khả năng tính toán của các phương pháp, hai yếu tố sẽ được đo lường, bao gồm chất lượng lời giải (chi phí gián tiếp – tổng chi phí vật liệu trừ đi chi phí trực tiếp của vật liệu) và thời gian xử lý (CPU time). Tính toán được thực hiện bằng phần mềm viết bằng Python trên một máy tính Macbook Pro M1, 16GB RAM, hệ điều hành MacOS Sequoia 15.3.1.

4.1. Các thiết lập tính toán

Phương pháp Exact (MILP Solver) được thiết lập với thời gian tối đa là 3600 giây và mục tiêu là thu được lời giải tiệm cận tối ưu, kèm theo cận dưới. Trong khi đó, giải thuật di truyền (GA) sử dụng quần thể kích thước 100 và chạy trong 100 thế hệ, với các nỗ lực tính toán sẽ dừng lại khi kết thúc số thế hệ hoặc khi không có sự cải thiện lời giải trong 20 vòng lặp. Phương pháp lai (Hybrid) gồm hai giai đoạn: Giai đoạn 1 sử dụng GA rút gọn để lấy nghiệm tốt nhất, sau đó trong giai đoạn 2, nghiệm từ GA sẽ được sử dụng làm khởi tạo cho solver, và solver sẽ tiếp tục chạy để giải phần còn lại của bài toán.

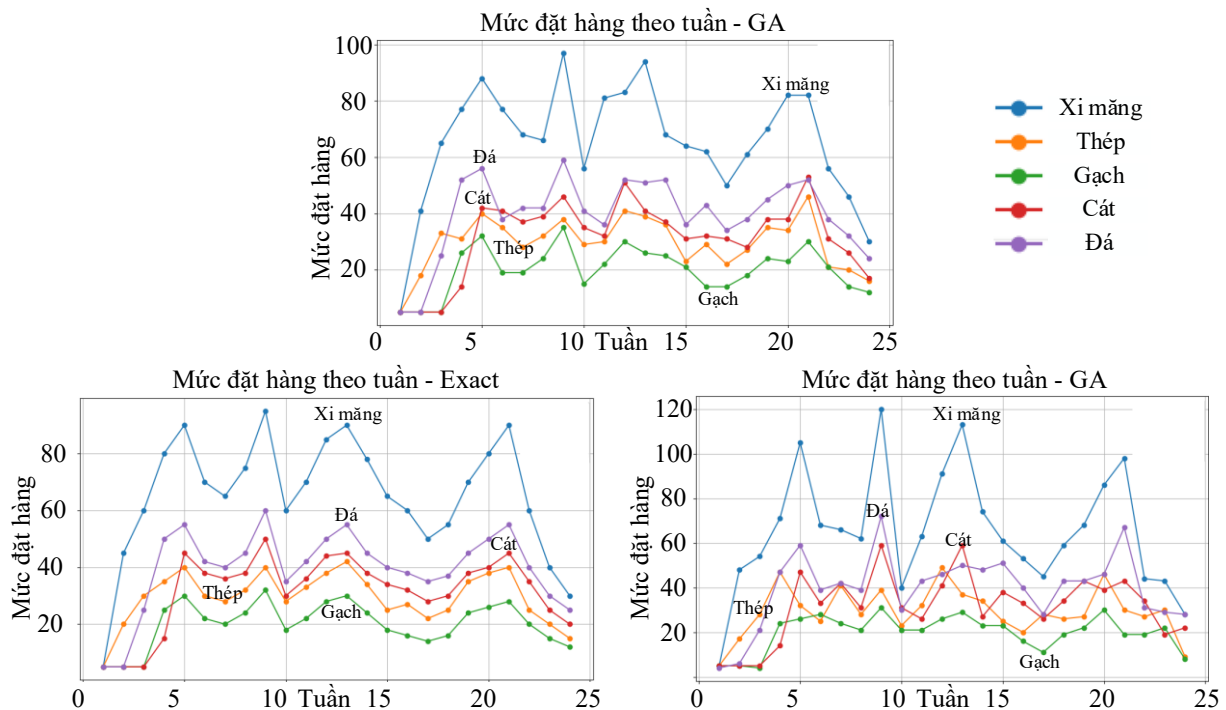
4.2. So sánh tổng quan kết quả

Bảng 3. Kết quả tính toán của các phương pháp.

Phương pháp	Chi phí gián tiếp (tỷ VNĐ)	Thời gian tính toán (s)
Exact	13.902	1650
GA	14.521	605
Hybrid	14.109	915

Bảng 3 tóm lược chi phí đạt được và thời gian xử lý của ba phương pháp. Exact cho chi phí gián tiếp thấp nhất (13.902 tỷ), nhờ bản chất phương pháp MILP có thể tìm (hoặc xấp xỉ) nghiệm tối ưu. Tuy nhiên, phương pháp này cần thời gian dài (~1650 giây). Cần lưu ý rằng, khi dự án phức tạp hơn (số loại vật liệu nhiều hơn, thời gian dài hơn, hoặc các chi phí biến đổi do thị trường...) có thể MILP sẽ mất

nhều thời gian hơn, hoặc thậm chí không thể giải ra nghiệm. Phương pháp GA chạy ra kết quả nhanh nhất (~605 giây) nhưng chi phí cao nhất (14.521 tỷ). Cuối cùng, phương pháp Hybrid cho ra kết quả ở mức tương đối, xét cả về chi phí và thời gian tính toán (mặc dù lâu hơn GA nhưng nhanh hơn Exact rõ rệt). Hình 1 thể hiện khối lượng đặt hàng theo tuần của năm loại vật liệu chính, ứng với ba phương pháp.



Hình 1. Biểu đồ đặt hàng theo tuần ứng với kết quả của các phương pháp.

Để hiểu rõ hơn ứng xử của các phương pháp tối ưu, các tác giả đi sâu vào phân tích hai vật liệu đại diện là xi măng và thép. Đây là hai loại vật liệu phổ biến và có chi phí cao trong xây dựng, nên hành vi đặt hàng thường có ảnh hưởng lớn đến tổng chi phí.

- So sánh hành vi của các phương pháp đối với vật liệu xi măng:
 - Exact: Lượng đặt hàng mỗi lần nhỏ, rải ở nhiều tuần. Tồn kho nhập nhò ít (không dồn nhiều), do Exact có cách tiếp cận tránh trữ kho lâu. Tuy nhiên, chi phí cố định cộng dồn tăng. Dù vậy, kết quả chi phí tổng (mua + cố định + lưu kho) đạt được ở mức thấp nhất.
 - GA: Xu hướng gom đặt hàng lượng lớn ở một số tuần. Tồn kho cuối tuần khá cao ở một số giai đoạn (đôi khi lên đến 70–80 tấn). Một trong những lý do có thể do GA nhận thấy chi phí đặt hàng là đáng kể, nên gộp đơn mua ít lần, chấp nhận tăng chi phí lưu kho.
 - Hybrid: Giai đoạn đầu (tính theo GA) cũng chia đơn tương đối chênh lệch. Tuy nhiên, đến giai đoạn solver tinh chỉnh, xu hướng đặt hàng được rải ra. Cuối cùng, so với GA, số lần đặt đều hơn, tồn kho ít hơn một chút, tổng chi phí gián tiếp giảm đáng kể.
- So sánh hành vi của các phương pháp đối với vật liệu thép:
 - Exact: Tương tự như xi măng, mô hình Exact cũng có xu hướng

đặt hàng đều và tăng nhanh ở ngay những tuần đầu. Khối lượng những lần đặt hàng lớn nhất (tuần 5, 9, 13) khoảng xấp xỉ 40 tấn. Điều này có thể solver quan tâm đến chi phí tồn kho cao của vật liệu này, trong khi đó giá đặt hàng tương đối (nếu so với giá vật liệu) lại không cao.

- GA: Mô hình yêu cầu đặt hàng lớn ở các tuần 4, 7, 9, 12, 20, trong đó tuần cao nhất đặt hàng tới 50 tấn.
- Hybrid: Do ban đầu tính theo GA, mô hình yêu cầu nhập nhò đơn, solver chấp nhận một phần, rồi gom bớt ở những tuần có nhu cầu lớn. Tồn kho trung gian (vẫn thấp hơn GA) vì Hybrid chưa gom nhiều như GA.

4.3. Thảo luận về khả năng tính toán và tính ứng dụng

Phương pháp chính xác (Exact) có ưu điểm là đảm bảo hoặc tiến gần nghiệm tối ưu nhất. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là thời gian xử lý khá dài (khoảng 1650 giây) và có thể vượt qua 3600 giây hoặc không thể giải quyết được nếu bài toán có quy mô lớn hơn. Giải thuật di truyền (GA) có ưu điểm là cho kết quả xấp xỉ trong thời gian ngắn (~605 giây) và dễ triển khai. Tuy nhiên, nhược điểm là kết

quả chưa đạt mức tối ưu như phương pháp chính xác, với độ lệch (Δ) khoảng 4.5% so với Exact. Phương pháp Hybrid tận dụng GA để tìm nghiệm ban đầu, sau đó sử dụng solver để tinh chỉnh kết quả, giúp giảm chi phí đáng kể so với GA. Mặc dù thời gian xử lý của Hybrid (~915 giây) vẫn chưa nhanh bằng GA, nhưng chi phí giảm rõ rệt ($\Delta = 1.5\%$ so với Exact). Trong bối cảnh thực tế, nhiều nhà quản lý không yêu cầu lời giải tuyệt đối tối ưu, vì chênh lệch chi phí khoảng 1.0%–2.0% có thể chấp nhận được, và thay vào đó họ cần quyết định nhanh chóng. Khi đó, GA hoặc Hybrid sẽ là các mô hình phù hợp. Tuy nhiên, nếu có thêm thời gian tính toán và bài toán không quá phức tạp, phương pháp chính xác có thể được sử dụng để tìm lời giải tối ưu nhất.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã tập trung phát triển và ứng dụng các mô hình tối ưu hóa quản lý tồn kho vật liệu trong các dự án xây dựng, một vấn đề đặc biệt quan trọng đối với thị trường xây dựng Việt Nam hiện nay. Bằng cách áp dụng và so sánh ba phương pháp chính, bao gồm phương pháp chính xác (Exact sử dụng MILP), thuật toán di truyền (GA) và phương pháp lai (Hybrid), nghiên cứu đã phân tích hiệu quả hoạt động, chi phí và khả năng ứng dụng thực tế của từng phương pháp. Kết quả cho thấy, mặc dù phương pháp Exact mang lại lời giải tối ưu hoặc gần tối ưu với chi phí gián tiếp thấp nhất (13.902 tỷ VNĐ), nhưng yêu cầu thời gian xử lý khá dài (1650 giây). Điều này là một hạn chế lớn khi áp dụng vào các dự án quy mô lớn và phức tạp, đặc biệt là các công trình tại Việt Nam. Trong khi đó, GA cho kết quả nhanh chóng (605 giây), nhưng chi phí gián tiếp lại cao hơn (14.521 tỷ VNĐ). Phương pháp Hybrid kết hợp ưu điểm của cả GA và MILP, đạt chi phí gián tiếp hợp lý (14.109 tỷ VNĐ) và thời gian xử lý tương đối nhanh (915 giây).

Việc phân tích hành vi đặt hàng đối với hai vật liệu quan trọng là xi măng và thép đã làm rõ hơn ưu nhược điểm và logic vận hành của từng phương pháp. Phương pháp Exact tối ưu hóa việc đặt hàng đều đặn để giảm chi phí lưu kho, trong khi GA tập trung vào việc giảm chi phí đặt hàng bằng cách gom các đơn hàng lớn, dẫn đến chi phí lưu kho cao hơn. Phương pháp Hybrid điều chỉnh và cân bằng giữa hai chiến lược này, giúp tối ưu hóa chi phí và thời gian tính toán. Từ góc độ thực tiễn, với sự chấp nhận một sai lệch nhỏ về chi phí gián tiếp (khoảng 1-2 %), GA và đặc biệt là phương pháp Hybrid cho thấy tiềm năng lớn trong các tình huống thực tế, nơi thời gian ra quyết định là yếu tố quan trọng. Kết quả nghiên cứu cũng mở ra triển vọng ứng dụng rộng rãi hơn tại Việt Nam, nơi các dự án thường gặp phải biến động về nhu cầu vật liệu, giá cả thị trường và điều kiện cung ứng. Để nâng cao tính thực tiễn và độ tin cậy, các hướng nghiên cứu tiếp theo có thể tập trung vào các mô hình quản lý tồn kho trong điều kiện bất định, các mô hình tối ưu hóa đa kho hoặc đa mục tiêu, cũng như mở rộng nghiên cứu đối với các loại vật liệu hoặc dự án có độ phức tạp cao hơn. Những bước phát triển này hứa hẹn sẽ cung cấp những công cụ hữu ích hơn nữa cho các nhà quản lý xây dựng tại Việt Nam trong việc quyết định chiến lược về tồn kho và tối ưu hóa chi phí thi công.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Uğurlu, S. Y. and Altay, A., "Recent Models and Solution Methodologies for Optimization Problems in Supply Chain Management Under Fuzziness," in *Supply Chain Management Under Fuzziness: Recent Developments and Techniques*, C. Kahraman and B. Öztayşi, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, (2014), pp. 423-447.
- [2]. He, W., Li, W., Xu, S., Wang, W., and An, X. "Time, Cost, and Energy Consumption Analysis on Construction Optimization in High-Rise Buildings", *Journal of Construction Engineering and Management*, **147**(10), p. 04021128 (2021).
- [3]. Vidal, G. H. "Deterministic and Stochastic Inventory Models in Production Systems: a Review of the Literature", *Process Integration and Optimization for Sustainability*, **7**(1), pp. 29-50 (2023).
- [4]. Tan, N. D., Kim, H.-S., Long, L. N. B., Nguyen, D. A., and You, S.-S. "Optimization and inventory management under stochastic demand using metaheuristic algorithm", *PLOS ONE*, **19**(1), p. e0286433 (2024).
- [5]. Al-Aidroun *et al.* "Critical Factors Influencing Inventory and Procurement System of Infrastructure Projects", *Journal of Civil Engineering and Management*, **28**(8), pp. 634-645 (2022).
- [6]. Taleizadeh, A. A., Soleymanfar, V. R., and Govindan, K. "Sustainable economic production quantity models for inventory systems with shortage", *Journal of Cleaner Production*, **174**, pp. 1011-1020 (2018).
- [7]. Jeang, A. "Economic production order quantity and quality", *International Journal of Production Research*, **49**(6), pp. 1753-1783 (2011).
- [8]. Farahvash, P. and Altiok, T. "A multi-period inventory model with multi-dimensional procurement bidding", *Annals of Operations Research*, **186**(1), pp. 101-118 (2011).
- [9]. Jaśkowski, P., Sobotka, A., and Czarnigowska, A. "Decision model for planning material supply channels in construction", *Automation in Construction*, **90**, pp. 235-242 (2018).
- [10]. Son, P. V. H., Duy, N. H. C., and Dat, P. T. "Optimization of Construction Material Cost through Logistics Planning Model of Dragonfly Algorithm — Particle Swarm Optimization", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **25**(7), pp. 2350-2359 (2021).
- [11]. Basheer, M., Elghaish, F., Brooks, T., Pour Rahimian, F., and Park, C. "Blockchain-based decentralised material management system for construction projects", *Journal of Building Engineering*, **82**, p. 108263 (2024).
- [12]. Lu, H., Wang, H., Xie, Y., and Li, H. "Construction Material Safety-Stock Determination Under Nonstationary Stochastic Demand and Random Supply Yield", *IEEE Transactions on Engineering Management*, **63**(2), pp. 201-212 (2016).
- [13]. Said, H. and El-Rayes, K. "Optimal utilization of interior building spaces for material procurement and storage in congested construction sites", *Automation in Construction*, **31**, pp. 292-306 (2013).
- [14]. Guo, K. and Zhang, L. "Multi-objective optimization for improved project management: Current status and future directions", *Automation in Construction*, **139**, p. 104256 (2022).
- [15]. Mao, J., Zhang, G., Ling, Z., Yuan, D., Liu, M., and Xu, J. "Potentials of Mixed-Integer Linear Programming (MILP)-Based Optimization for Low-Carbon Hydrogen Production and Development Pathways in China", *Energies*, **17**(7), p. 1694 (2024).
- [16]. Yojana, R. M., Hendra, M., and Marie, I. A., "Optimization of Production Planning Using Goal Programming and Inventory Control Based on

- Demand Forecasting Using Neural Networks on CV Bahyu Perkasa," presented at the Proceedings of the 2022 International Conference on Engineering and Information Technology for Sustainable Industry, Alam Sutera, Tangerang, Indonesia, (2022). Available: <https://doi.org/10.1145/3557738.3557875>
- [17]. Koutsokosta, A. and Katsavounis, S. "A Dynamic Multi-Period, Mixed-Integer Linear Programming Model for Cost Minimization of a Three-Echelon, Multi-Site and Multi-Product Construction Supply Chain", *Logistics*, **4**(3), p. 19 (2020).
 - [18]. Salari, S. A., Mahmoudi, H., Aghsami, A., Jolai, F., Jolai, S., and Yazdani, M., "Off-Site Construction Three-Echelon Supply Chain Management with Stochastic Constraints: A Modelling Approach," *Buildings*, vol. 12, no. 2. doi: 10.3390/buildings12020119
 - [19]. Alam, T., Qamar, S., Dixit, A., and Benaida, M. "Genetic Algorithm: Reviews, Implementations, and Applications", *International Journal of Engineering Pedagogy*, **6**(10), (2020).
 - [20]. Adhi, A., Siswanto, N., and Santosa, B. "Hybrid Metaheuristic for Solving Maritime Inventory Routing Problem in Bulk Product Transportation", *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, **16**(2), (2023).
 - [21]. Çimen, E. B., İ, K., Ö, S., Şahin, M., and Kılınc, D., "A Hybrid Stock optimization Approach for Inventory Management", *2021 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, (2021).
 - [22]. de Paula Vidal, G. H., Caiado, R. G. G., Scavarda, L. F., Ivson, P., and Garza-Reyes, J. A. "Decision support framework for inventory management combining fuzzy multicriteria methods, genetic algorithm, and artificial neural network", *Computers & Industrial Engineering*, **174**, p. 108777 (2022).
 - [23]. Bhowmik, O. and Parvez, S. "Supply chain network design: an MILP and Monte Carlo simulation approach", *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, **21**(1), p. 1936 (2024).
 - [24]. Menkar, S. R. and S.S.Chavan "Review of Inventory Management System to Ensure the Optimization of Resources", *International Research Journal of Engineering and Technology*, **10**(1), pp. 1123-1126 (2023).
 - [25]. Straubert, C. "A continuous approximation location-inventory model with exact inventory costs and nonlinear delivery lead time penalties", *International Journal of Production Economics*, **268**, p. 109092 (2024).
 - [26]. Chételat, D. and Lodi, A. "Continuous cutting plane algorithms in integer programming", *Operations Research Letters*, **51**(4), pp. 439-445 (2023).
 - [27]. Bonami, P., Cornuéjols, G., Dash, S., Fischetti, M., and Lodi, A. "Projected Chvátal-Gomory cuts for mixed integer linear programs", *Mathematical Programming*, **113**(2), pp. 241-257 (2008).
 - [28]. Goldberg, D. E. and Holland, J. H. "Genetic algorithms and Machine Learning", *Machine Learning*, **3**(2), pp. 95-99 (1988).