


Designing a Bi-objective Mathematical Model for Cost and Environmental Pollution Control in Circular Supply Chain Management for Petrochemical Product Production

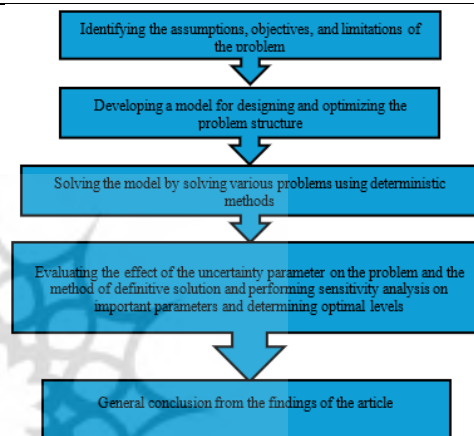
Koorosh Pouri 

PhD, Department of Industrial Engineering, SR.C. Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- This diagram illustrates the main stages of solving an optimization problem, from defining objectives and constraints to the final analysis of results.
- Deterministic methods and sensitivity analysis are used to examine the effect of parameters and determine the optimal region.
- By presenting a structured model, the author aims to achieve an efficient and reliable solution to the problem in question.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 16 May 2025

Revised: 3 July 2025

Accepted: 11 July 2025

Available online: 11 July 2025

*Correspondence:

kooroshpouri@gmail.com

How to cite this article:

Pouri, K. (2025). Designing a bi-objective mathematical model for cost and environmental pollution control in circular supply chain management for petrochemical product production. *System Engineering and Productivity*, 5 (4), 125-148.

Keywords:

Circular Supply Chain
Mathematical Modeling
Production Planning
Multi-objective optimization
Petrochemical industry

ABSTRACT

The aim of this paper is to investigate and propose a novel mathematical model to enhance the performance of production systems in the petrochemical industry by utilizing a closed-loop supply chain approach. The mathematical model is designed to optimize material flow, procurement, and product distribution within petrochemical systems, and is capable of accommodating uncertain demand. The objective functions considered include transportation and inventory costs (as the first objective function) and the level of pollution at treatment and distribution centers (as the second objective function). The primary goal of this research is to develop a mathematical model that simultaneously manages production costs and environmental pollution within the closed-loop supply chain of petrochemical products. The model seeks to find an optimal balance between costs and the environmental impacts arising from the production and distribution of petrochemical products. The proposed model is solved using the weighted sum method and the NSGA-II metaheuristic algorithm. According to the results obtained for the objective function, it is observed that the value of the objective function is highly sensitive to the weight assigned to the first objective. Increasing this weight leads to an increase in the objective function value, whereas a higher weight for the second objective results in a decrease in the objective function value. The findings indicate that the minimum value of the objective function is 35,996.988. Additionally, the results of the metaheuristic approach demonstrate that as the problem size increases, its computational complexity increases as well.

1. Introduction

Most enterprise architectures have traditionally adopted a linear approach, adhering to the value chain model, which involves production, consumption, and disposal, consequently depleting the Earth's natural resources (Hejazi, 2025). Consequently, sustainable development guidelines increasingly advocate for a transition from linear to closed-loop supply chain models, incorporating circular principles such as reuse, refurbishment, and recycling in innovative ways (Bahrami et al., 2025). Therefore, the integration of closed loops within supply chains has garnered significant attention from researchers, practitioners, and policymakers as a strategy to enhance sustainability outcomes in businesses (Alghababsheh & Gallea, 2022). Numerous companies are actively seeking solutions to accelerate comprehensive initiatives and transition toward more circular supply chains (Iji et al., 2025). This shift necessitates not only innovation in products, processes, and technologies but also in business models, which must incorporate novel recycling systems to facilitate the return of used products (Mozafari & Savari, 2025). Moreover, establishing a closed-loop supply chain is not feasible for a single organization, as it requires collaboration among various supply chain entities and other stakeholders from similar or diverse sectors (Safaie et al., 2025).

In general, a transformation in an organization's business model impacts the operations of other entities involved in its supply chain. Thus, a systemic approach to managing the efficient use of materials, energy, and other valuable resources through higher rates of recycling, reuse, and regeneration is essential for success. However, there remains limited theoretical and empirical knowledge regarding this phenomenon (Yang et al., 2018). The need to meet global demand sustainably, which continues to grow, underscores the importance of effective and efficient supply chain management. Specific sectors, such as the automotive industry, operate within complex supply chain networks that contribute to environmental degradation along their value chains. To enhance operational, economic, and social performance through improved sustainability, many companies have begun integrating new or recycled materials, cleaner technologies, and innovative organizational and logistical practices (González-Sánchez et al., 2020).

Sustainability has sparked extensive discourse within academic literature, particularly in supply chain management (SCM). Nevertheless, global patterns of production, consumption, and trade remain perilously unsustainable. Without transformative changes in sourcing, production, delivery, use, recovery, and regeneration of products, the world will continue to deplete significant natural resources at current consumption levels (Abolghasemian et al., 2024). A pivotal philosophy

that may facilitate such transformation is the circular economy (CE). This paradigm is increasingly recognized as a viable alternative to the conventional economic model. The CE framework is emerging as a significant driver of sustainability in both theory and practice, offering substantial potential to support organizations in achieving sustainable performance outcomes (Farooque et al., 2019).

Circular supply chains have evolved into a strategic variable for organizations, extending beyond environmental considerations. Furthermore, there is a critical research trajectory that emphasizes the broader socio-economic implications affecting various stakeholders, contributing to the development of studies on transitioning toward more sustainable production systems. Defining a new scope of specific practices to effectively implement circular economy principles in supply chains is essential, necessitating the adoption of systemic innovations (Govindan et al., 2023).

2. Methodology

In this section of the article, a mathematical model is proposed for the transportation and distribution of condensates as a production system aimed at reducing costs and investments while mitigating the adverse effects of greenhouse gas emissions. Generally, the objective functions considered in the mathematical modeling include: transportation costs (A), inventory costs (B), environmental pollution at processing centers (C), and environmental pollution at distribution centers (D). To address the limitations of methods when the number of objectives exceeds two, and considering that some objectives, such as A and B, as well as C and D, share the same units, the sum of objectives with identical units is taken as the final objective, transforming the problem into a bi-objective optimization. Thus, the objectives considered in the modeling are formulated as follows: 1) $\min (F1) = A + B$; 2) $\min (F2) = C + D$.

3. Results and Discussion

This section presents the numerical results of the proposed mathematical model for optimizing the transportation and distribution of condensates in a circular supply chain within the petrochemical industry. The model, formulated as a linear programming problem, aims to minimize costs and environmental pollution, with objective functions combining transportation and inventory costs ($F1 = A + B$) and environmental pollution from processing and distribution centers ($F2 = C + D$). The problem was solved using the weighted sum method, transforming the multi-objective problem into a single-objective one, with weights assigned to each objective (w_1 for $F1$ and w_2 for $F2$, where $w_1 + w_2 = 1$). The results indicate that the objective function value is highly sensitive to the weight of the first objective (w_1), increasing as w_1 increases and decreasing as w_2

(weight of the second objective) increases. The minimum objective function value of 988.35996 was achieved when $w_1 = 0.1$ and $w_2 = 0.9$.

The model was implemented in GAMS software for a small-scale problem, with calculations based on predefined sets and parameters. Key findings include zero condensate transfers from certain fields to processing centers in specific periods and a maximum transfer of 106,080 units in the third period from the first field to the first processing center. Inventory levels at processing centers were also zero in the first two periods, peaking at 20,749 units in the third period. The NSGA-II metaheuristic algorithm was employed to solve the model, with parameters tuned using the Taguchi L9 design. The algorithm's performance was compared to exact methods across small, medium, and large problem sizes, demonstrating that NSGA-II significantly reduces solution time while maintaining accuracy, with errors below 0.05 deemed negligible. This validates NSGA-II's effectiveness for large-scale problems.

A sensitivity analysis was conducted on field capacity, a critical parameter affecting the objective function. Increasing capacity by 100 units raised transportation costs due to higher production, while decreasing capacity by 100 units reduced costs but led to lost sales opportunities from exports. Overall, the results confirm the model's ability to optimize production and distribution decisions, supporting cost reduction and environmental sustainability in the petrochemical supply chain.

4. Conclusions

This article addresses the integration of two critical decision-making domains in the petrochemical products sector, namely production planning and distribution planning. In this regard, it is noteworthy that decisions in production planning have a direct impact on distribution planning. If products are not prepared and made available according to a proper schedule, the distribution unit will also be unable to fulfill customer requirements in a timely manner. For this reason, it is essential and necessary to study production planning and distribution planning in an integrated manner. To this end, a mathematical model is first proposed to optimize the decision variables related to production and distribution. Therefore, through the precise execution of this research, we can achieve enhanced collaboration among organizations in the petrochemical supply chain, leading to increased efficiency, reduced costs, and improved environmental performance. For instance, the establishment of digital platforms and shared information systems that provide all supply chain stakeholders with access to relevant data and information can facilitate improved communication and coordination. The development of collaboration contracts that encompass shared objectives, responsibilities, and commitments for each organization can foster motivation for cooperation

and mitigate tensions. Identifying and establishing common goals for all supply chain stakeholders, such as cost reduction, quality improvement, and pollution minimization, can further incentivize greater collaboration. By implementing these strategies, organizations in the petrochemical supply chain can enhance their cooperative efforts and attain superior outcomes in economic and environmental domains. This article, which pursues the objectives of integrating production planning and distribution planning in the petrochemical and refining industries, as well as simultaneous production and distribution planning to meet the requirements for petrochemical derivatives, accomplishes this through the presentation of a mathematical programming model. Based on the obtained results for the objective function, it is observed that the value of the objective function is highly dependent on the weight of the first objective. As this weight increases, the objective function value rises, whereas a higher weight for the second objective leads to a lower objective function value. According to the results, in the scenario where the weight of the first objective ($w_1 = 0.1$) and the weight of the second objective ($w_2 = 0.9$), the objective function attains its minimum value of 988.35996. Furthermore, the metaheuristic method results indicate that as the problem dimensions expand, computational complexity increases. This is because the solution time varies and escalates from one problem instance to another. However, the solution time using the NSGA-II metaheuristic algorithm is considerably shorter compared to the exact method. Therefore, for solving large-scale problems, reliance on the NSGA-II algorithm can be justified, with expectations of satisfactory performance.

This research exhibits similarities and differences when compared to similar studies, such as those by (Govindan et al., 2023) and (Jabarzadeh et al., 2020). Firstly, all three studies present a mathematical model for closed-loop supply chains. In the study by (Jabarzadeh et al., 2020; Govindan et al., 2023), minimizing carbon dioxide emissions is addressed, while evaluate greenhouse gas emissions from vehicles. Additionally, the current research, akin to (Govindan et al., 2023) examines uncertainty in demand rates to better approximate real-world conditions. Unlike previous studies that solely employed exact solution methods such as epsilon-constraint, this research also utilizes a metaheuristic algorithm. Moreover, greenhouse gas pollution levels are calculated specifically and more precisely in distinct segments, such as distribution. Many petrochemical companies may withhold accurate data related to production and distribution due to confidentiality concerns. This issue can result in inaccuracies and imprecision in the model's input data. Furthermore, for future research, it is recommended to extend the proposed model by incorporating pollution emissions at production centers alongside those at distribution centers.

Additionally, categorizing pollution types by solids, liquids, and gases can enable the determination of which wastes exert greater influence on emission levels. Moreover, incorporating social aspects, such as employment and employee health, could be considered for model development and future investigations. Finally, to account for uncertainty, parameters beyond demand rates—such as costs and capacities—should also be examined.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

Koorosh Pouri: Conceptual research model, literature review, theoretical background, data analysis, statistical analysis draft, drafting the manuscript, preliminary review of the report, research methodology development, Text revision.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest associated with this research.

Acknowledgments

We are grateful to all colleagues who provided insights and expertise that greatly assisted this research. We also thank the anonymous reviewers for their valuable suggestions to improve the paper.

References

- Abolghasemian, M., Kheiri, A. O., & Saberifard, N. (2024). Prioritizing factors affecting the flexibility and performance of the digital supply chain system in the Iranian food industry. *System Engineering and Productivity*, 4(1), 41–57. <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2025240.1194> (In Persian)
- Alghababsheh, M., & Gallear, D. (2022). Social sustainability in the supply chain: A literature review of the adoption, approaches and (un)intended outcomes. *Management & Sustainability: An Arab Review*, 1(1), 84–109. <https://doi.org/10.1108/MSAR-01-2022-0003>
- Bahrami, M. R., Hashemzadeh, G. R., Shahmansoury, A., & Fathi Hafshejani, K. (2025). Analyzing effective components in Industry 4.0 maturity for Iranian banking. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 21–50. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2047848.1246> (In Persian)
- Farooque, M., Zhang, A., Thüerer, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 882–900. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.303>
- González-Sánchez, R., Settembre-Blundo, D., Ferrari, A. M., & García-Muiña, F. E. (2020). Main dimensions in the building of the circular supply chain: A literature review. *Sustainability*, 12(6), Article 2459. <https://doi.org/10.3390/su12062459>
- Govindan, K., Salehian, F., Kian, H., Hosseini, S. T., & Mina, H. (2023). A location-inventory-routing problem to design a circular closed-loop supply chain network with carbon tax policy for achieving circular economy: An augmented epsilon-constraint approach. *International Journal of Production Economics*, 257, Article 108771. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108771>
- Hejazi, A. (2025). Analysis of the substantive factors in strategic knowledge management within the domain of higher education development. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 155–178. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2033665.1217> (In Persian)
- Iji, Z., Maleki, M. R., & Eghbali, H. (2025). Double sampling-based ridge penalized likelihood ratio control charting scheme for detecting the covariance matrix disturbances. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 51–64. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2046743.1238> (In Persian)
- Jabarzadeh, Y., Reyhani Yamchi, H., Kumar, V., & Ghaffarinasab, N. (2020). A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 31(5), 1351–1373. <https://doi.org/10.1108/MEQ-12-2019-0276>
- Mozafari, M., & Savari, J. (2025). Designing a green closed-loop supply chain network for pharmaceutical products using cuckoo search algorithm. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 135–153. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2050452.1248> (In Persian)
- Safaie, N., Heidari Soochelmai, Y., & Mirzaee Ghazani, M. (2025). A data-driven hybrid approach for examining the factors influencing the price of EUA during Phase IV of the EU ETS. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 113–134. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2050780.1253> (In Persian)
- Yang, M., Smart, P., Kumar, M., Jolly, M., & Evans, S. (2018). Product-service systems business models for circular supply chains. *Production Planning & Control*, 29(6), 498–508. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1449247>
- Zhang, A., Wang, J. X., Farooque, M., Wang, Y., & Choi, T.-M. (2021). Multi-dimensional circular

supply chain management: A comparative review of the state-of-the-art practices and research. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 155, Article 102509.

<https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102509>



طراحی یک مدل ریاضی دوهدفه برای کنترل هزینه و آلودگی زیست‌محیطی در مدیریت زنجیره تأمین چرخشی در تولید محصولات پتروشیمی

کوروش پوری ^{ID}

دکتری، گروه مهندسی صنایع، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده گرافیکی

برجسته‌ها

- این نمودار مراحل اصلی حل یک مسئله بهینه‌سازی را نشان می‌دهد، از تعریف اهداف و محدودیت‌ها تا تجزیه و تحلیل نهایی نتایج.
- روش‌های قطعی و تحلیل حساسیت برای بررسی اثر پارامترها و تعیین منطقه بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- نویسنده با ارائه یک مدل ساختاریافته، به دنبال دستیابی به راه‌حلی کارآمد و قابل اعتماد برای مسئله مورد نظر است.



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۶

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

ارائه برخط: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰

*نویسنده مسئول:

kooroshpouri@gmail.com

کلیدواژه‌ها:

زنجیره تأمین چرخشی
مدل‌سازی ریاضی
برنامه‌ریزی تولید
بهینه‌سازی چند هدفه
صنعت پتروشیمی

چکیده

هدف این مقاله بررسی و ارائه یک مدل ریاضی جدید برای بهبود عملکرد سیستم‌های تولیدی در صنعت پتروشیمی با استفاده از زنجیره تأمین دورانی پرداخته شده است. این مدل ریاضی به منظور بهینه‌سازی جریان مواد، تأمین مواد، و توزیع محصولات در سیستم‌های پتروشیمی طراحی شده و قادر است تقاضای غیرقطعی را نیز در نظر بگیرد. توابع هدف در نظر گرفته شده عبارت‌اند از هزینه‌های انتقال و موجودی (به‌عنوان تابع هدف اول) و میزان آلودگی در مراکز تصفیه‌کننده و توزیع (به‌عنوان تابع هدف دوم). هدف این تحقیق طراحی یک مدل ریاضی است که بتواند به طور هم‌زمان هزینه‌های تولید و آلودگی‌های زیست‌محیطی را در زنجیره تأمین چرخشی محصولات پتروشیمی کنترل کند. این مدل به دنبال یافتن تعادل بهینه بین هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید و توزیع محصولات پتروشیمی است. مدل پیشنهاد شده طبق روش مجموع وزن‌دار شده و الگوریتم فراابتکاری NSGA-II حل شده است. بر اساس نتایج به دست آمده برای تابع هدف مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف به شدت به وزن هدف اول وابسته است. با افزایش در مقدار آن مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد و در مقابل هر چه وزن تابع هدف دوم بیشتر باشد مقدار تابع هدف کمتر است. بر اساس نتایج به دست آمده مقدار تابع هدف کمترین مقدار را که برابر با ۳۵۹۹۶/۹۸۸ است را می‌گیرد. علاوه بر این، نتایج روش فراابتکاری بیانگر آن است که با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله پیچیدگی مسئله از لحاظ محاسباتی افزایش می‌یابد.

۱- مقدمه

بهبود پایداری در زنجیره‌های تأمین خود برای افزایش عملکرد عملیاتی، اقتصادی و اجتماعی خود، بسیاری از شرکت‌ها شروع به ترکیب مواد جدید یا بازیافتی، فن‌آوری‌های تمیزتر و اقدامات جدید سازمانی و تدارکاتی کرده‌اند (González-Sánchez et al., 2020). پایداری بحث‌ها و مباحث زیادی را در ادبیات دانشگاهی، از جمله ادبیات مدیریت زنجیره تأمین^۱ (SCM) به خود اختصاص داده است. با این حال، الگوهای جهانی تولید، مصرف و تجارت هنوز به‌طور خطرناکی ناپایدار باقی‌مانده‌اند. اگر در نحوه تأمین، تولید، تحویل، استفاده، بازیابی و بازسازی محصولات تغییری حاصل نشود، جهان در سطح فعلی مصرف خود، منابع طبیعی زیادی را مصرف خواهد کرد (Abolghasemian et al., 2024) یک فلسفه مهم که ممکن است در شکل‌گیری تغییرات کمک کند، اقتصاد چرخشی^۲ است. این نظریه به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان جایگزینی مناسب برای مدل اقتصادی شناخته شده است. نظریه CE در حال تبدیل شدن به یک نیروی محرک تأثیرگذار در جهت پایداری و هم در عمل است و به‌عنوان یک پتانسیل مهم برای کمک به سازمان‌ها برای دستیابی به موفقیت عملکرد پایدار محسوب می‌شود (Farooque et al., 2019). زنجیره تأمین دورانی به‌عنوان یک متغیر استراتژیک برای سازمان‌ها حتی فراتر از جنبه‌های محیطی تبدیل شده است. همچنین یک مسیر مهم وجود دارد که تمرکز مطالعه را در این خصوص بیشتر می‌کند و با توجه به سناریوهای اجتماعی و اقتصادی که ذینفعان مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به معنای گسترده‌تر، به‌عنوان تحقیق در مورد شیوه‌های تغییر به سمت یک سیستم تولیدی پایدارتر توسعه یافته است. تعریف محدوده جدیدی از اقدامات خاص برای اجرای کافی اصول اقتصاد چرخشی برای زنجیره‌های تأمین ضروری است، اتخاذ نوآوری‌های سیستمی برای آن‌ها است (Govindan et al., 2023).

سیستم‌های تولیدی در صنعت به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های فعالیت‌های تجاری برای تولید محصولات به کار می‌روند. هدف همیشگی این سیستم‌ها، بهبود کیفیت و کاهش هزینه‌ها است (Malekpour Kolbadinejad & Bagherinejad, 2023).

بیشتر معماری‌های سازمانی به‌صورت خطی بوده و مدل زنجیره ارزش را در نظر می‌گیرند، محصول تولید می‌کنند و از بین می‌برند که در نتیجه آن منابع طبیعی موجود در کره زمین مصرف می‌شوند (Hejazi, 2025). از این رو، دستورالعمل‌های توسعه پایدار به‌طور فزاینده‌ای خواستار تغییر زنجیره‌های تأمین از مدل‌های خطی به شکل حلقه بسته هستند که در آن ایده‌آل‌های مدور مانند استفاده مجدد، بازسازی و بازیافت به شیوه‌های جدید در نظر گرفته می‌شود (Bahrami et al., 2025)؛ بنابراین قرار دادن حلقه‌های موجود در زنجیره‌های تأمین توسط بسیاری از محققان، پزشکان و سیاست‌گذاران به‌عنوان رویکردی برای بهبود نتایج پایداری در مشاغل مورد توجه قرار گرفته است (Alghababsheh & Gallea, 2022). تعدادی از شرکت‌ها به دنبال راه‌حلی برای سرعت بخشیدن به اقدامات گسترده و انتقال به سمت زنجیره تأمین مدور بیشتر هستند (Iji et al., 2025). این تغییر نه تنها به نوآوری در فرآورده، فرآیند و فناوری، بلکه به نوآوری در مدل تجاری نیز نیاز دارد که برای بازگرداندن محصولات استفاده شده باید سیستم‌های جدید بازیافت را در نظر بگیرد (Mozafari & Savari, 2025). همچنین، ایجاد یک حلقه زنجیره تأمین توسط یک شرکت خاص امکان‌پذیر نیست، زیرا این امر مستلزم همکاری بین سازمان‌های مختلف زنجیره تأمین و سایر سهامداران از بخش‌های مشابه و یا متنوع است (Safaie et al., 2025). به‌طور کلی، تغییر در مدل تجاری یک سازمان بر فعالیت‌های تجاری سایر سازمان‌های درگیر در زنجیره تأمین آن‌ها تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، یک رویکرد سیستمی برای مدیریت استفاده بهتر از مواد، انرژی و سایر منابع ارزشمند از طریق نرخ بالاتر بازیافت، استفاده مجدد و بازآفرینی ضروری برای موفقیت است. با این وجود، دانش نظری و تجربی محدودی در مورد این پدیده مورد علاقه وجود دارد (Yang et al., 2018). نیاز به پوشش تقاضای جهانی به روش پایدار که به‌طور مداوم در حال رشد است، حاکی از مدیریت کافی و کارآمد عملیات زنجیره تأمین است. بخش‌های خاصی، مانند صنعت خودرو، دارای یک شبکه زنجیره تأمین پیچیده هستند که مسئول تخریب محیط‌زیست در زنجیره ارزش خود هستند. با توجه به

¹ Supply chain management (SCM)

² Circular economy (CE)

محیط‌زیست کمک کند. لذا در این مقاله، قصد داریم یک مدل ریاضی برای سیستم‌های تولیدی با استفاده از زنجیره تأمین دورانی ارائه دهیم. با استفاده از این مدل، قابلیت پیش‌بینی کارایی و بهره‌وری سیستم‌های تولیدی با بهره‌گیری از زنجیره تأمین دورانی در شرایط مختلف، ارائه خواهد شد. همچنین، با استفاده از این مدل، قابلیت بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های تولیدی با بهره‌گیری از زنجیره تأمین دورانی نیز فراهم می‌شود.

۲- پیشینه پژوهش

اقتصاد دورانی جایگزینی برای مدل تولید سنتی است و به همین دلیل مورد توجه محققان قرار گرفته است. تغییر در سیستم تولید با نیازهای جدید لجستیکی، با منابع و ضایعات و توزیع و بازیابی محصولات همراه است. زنجیره تأمین دورانی شامل فرآیندهای بازگشت‌پذیر است و تولیدکننده قصد دارد ارزش اضافی را در زنجیره تأمین به دست آورد. در این بخش تعدادی مطالعه که در این حوزه انجام شده است معرفی می‌شوند، برای مثال، آنجلیس و همکاران (De Angelis et al., 2018)، گزاره‌های مقدماتی را در مورد پیامدهای توسعه آنچه زنجیره تأمین دورانی می‌نامیم ارائه می‌دهد که در مطالعه از آن به‌عنوان اصول اقتصاد چرخشی در مدیریت زنجیره تأمین تعریف شده است. یافته‌های این تحقیق بر اساس استدلال‌های زیر صورت گرفته است که عبارت‌اند از: الف) تغییر از مالکیت محصول به لیزینگ و دسترسی در روابط زنجیره تأمین؛ ب) ارتباط انعطاف‌پذیری ساختاری و شرکت‌های نوپا در حلقه‌های منطقه‌ای-محلی؛ ج) حلقه‌های مواد باز و بسته در چرخه‌های فنی و بیولوژیکی؛ د) همکاری نزدیک‌تر در داخل و خارج از مرزهای صنعت؛ و ه) تدارکات دولتی و خصوصی در صنعت یا خدمات به‌عنوان اهرمی برای مقیاس‌بندی مدل‌های تجاری دورانی. همچنین در این تحقیق در مورد معنای اصول اقتصاد دورانی از نظر چالش‌های زنجیره تأمین بحث شده است و در مورد محدودیت‌ها و برنامه تحقیقاتی آینده نتیجه‌گیری می‌کنیم. لارسن و همکاران (Larsen et al., 2017)، کمبود مواد، انطباق قانون و صرفه‌جویی در هزینه‌ها، شرکت‌ها را بر آن دارد تا محصولات استفاده‌شده را برای استفاده مجدد، بازیابی و بازیافت از مشتریان خود پس بگیرند.

زنجیره تأمین دورانی یک روش مدیریتی است که در آن محصولات با کمک شرکای تجاری خارجی تولید و تأمین می‌شوند. این روش معمولاً از تعامل برقرارشده با شرکای تجاری دیگر در جهان برای کاهش هزینه و بهبود کیفیت استفاده می‌کند.

مدل‌سازی ریاضی و اقتصاد چرخشی در طراحی یک مدل ریاضی دوهدفه برای کنترل هزینه و آلودگی زیست‌محیطی در مدیریت زنجیره تأمین چرخشی در تولید محصولات پتروشیمی به نقل از (Govindan et al., 2023) ارتباط نزدیکی دارند. مدل‌سازی ریاضی به‌عنوان ابزاری برای بهینه‌سازی استفاده از منابع در زنجیره تأمین عمل می‌کند. در اقتصاد چرخشی، هدف کاهش مصرف منابع اولیه و افزایش بازیافت و استفاده مجدد از مواد است. مدل‌های ریاضی می‌توانند به شناسایی بهترین روش‌ها برای کاهش هزینه‌ها و آلودگی‌ها کمک کنند. مدل‌سازی ریاضی امکان تحلیل هزینه-فایده را فراهم می‌کند. در اقتصاد چرخشی، ارزیابی هزینه‌های مرتبط با آلودگی و هزینه‌های ناشی از عدم استفاده بهینه از منابع، می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهتری منجر شود. مدل‌های ریاضی می‌توانند به شناسایی نقاط بهینه در این تحلیل‌ها کمک کنند. در زنجیره تأمین چرخشی، ریسک‌های مرتبط با نوسانات بازار و تغییرات زیست‌محیطی وجود دارد. مدل‌سازی ریاضی می‌تواند به شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و ارزیابی تأثیرات آن‌ها بر هزینه‌ها و آلودگی‌ها کمک کند که این امر در اتخاذ تصمیمات استراتژیک بسیار مهم است. مدل‌های ریاضی می‌توانند به پیش‌بینی تقاضا و برنامه‌ریزی تولید کمک کنند. در اقتصاد چرخشی، این پیش‌بینی‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و کاهش پسماند منجر شوند. ارتباط بین مدل‌سازی ریاضی و اقتصاد چرخشی به تحقق اهداف توسعه پایدار کمک می‌کند. مدل‌های ریاضی می‌توانند به شناسایی و ارزیابی تأثیرات زیست‌محیطی و اقتصادی تصمیمات مدیریتی کمک کنند و به این ترتیب، به تحقق اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی هم‌زمان کمک کنند. درنهایت، ارتباط بین مدل‌سازی ریاضی و اقتصاد چرخشی در این تحقیق به‌عنوان ابزاری برای دستیابی به یک زنجیره تأمین پایدار و کارآمد در تولید محصولات پتروشیمی مورد تأکید قرار می‌گیرد. این ارتباط می‌تواند به بهبود عملکرد اقتصادی و کاهش تأثیرات منفی بر

دورانی را انجام می‌دهد. بر اساس نتایج بررسی، محققان خواستار مطالعات بیشتر در جهت‌هایی هستند که کمتر به آن‌ها توجه شده است اما مهم هستند. این جنبه‌ها عبارت‌اند از: بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر، همکاری و هماهنگی زنجیره تأمین مدور، محرک‌ها و موانع زنجیره تأمین دورانی، مصرف حلقوی، تعهدات محصول و فناوری‌ها.

سانچز و همکاران (González-Sánchez et al., 2020)، زنجیره‌های ارزشی برای تجسم پیوندها و فعل‌وانفعالات بین مراحل مختلف و بازیگران برای درک پیچیدگی‌های این موضوع را مورد بررسی قرار دادند. هدف نهایی این مطالعه دستیابی به یک چارچوب مفهومی برای مطالعه زنجیره تأمین دورانی است که از چشم‌اندازهای اصلی نظری در ادبیات مدیریت استراتژیک استفاده می‌کند. چهار بعد جدید برای حمایت از توسعه این زنجیره‌های تأمین مشخص شده است: شدت بیشتر در روابط ایجاد شده در زنجیره تأمین، سازگاری تدارکات و سازمانی، فناوری‌های هوشمند و یک محیط عملکردی. از نتایج به دست آمده در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که برای توسعه جدید زنجیره، امکان برقراری روابط مکرر و نزدیک‌تر با بازیگران را بیشتر باید فراهم کرد. این روابط در چارچوب سازمانی و لجستیکی سازگار توسعه خواهند یافت که در الگوهای مدل کسب‌وکار جدید گنجانده شده است. باین‌حال، ابعاد مربوط به تجارت محیطی مانند چارچوب‌های قانونی و مالی باید در آن گنجانده شود. جبارزاده و همکاران (Jabarzadeh et al., 2020) یک مدل ریاضی چندهدفه را برای زنجیره تأمین حلقه بسته پایدار برای محصولات کشاورزی ارائه نمودند. اهداف اصلی تحقیق تعیین میزان جریان در هر سطح و مکان‌یابی تسهیلات می‌باشد. لذا در این پژوهش کمینه کردن هزینه‌ها و هزینه‌های دی‌اکسید کربن آزاد شده می‌باشد. نتایج بیانگر عملکرد مناسب مدل پیشنهادی می‌باشد. ربانی و همکاران (Rabbani et al., 2018) یک مدل چندهدفه و چند دوره‌ای جهت مکان‌یابی و تخصیص در یک زنجیره تأمین پایدار ارائه نمودند. در نظر گرفتن تکنولوژی‌های مختلف برای خودروها که منجر به هزینه‌های مختلف از جمله هزینه‌های آزاد شدن دی‌اکسید کربن مختلف می‌شود از جمله نوآوری‌های این پژوهش است. به منظور مقابله با عدم قطعیت مسئله از رویکرد

برای این منظور، شرکت‌ها زنجیره تأمین دورانی را اجرا می‌کنند. اگرچه فضای آکادمیک از سال ۱۹۹۰ توجه قابل‌توجهی به موضوعات مرتبط با زنجیره تأمین داشته است، اما رابطه بین زنجیره تأمین و رشد درآمد شرکت هنوز مورد تحقیق قرار نگرفته است. از این رو لارسن و همکاران (Larsen et al., 2017)، در مطالعه خود با استفاده از تئوری رشد درآمد، به چگونگی انطباق آن با زنجیره‌های تأمین دورانی بررسی می‌کنند. یافته‌ها نشان می‌دهد که زنجیره تأمین دورانی می‌تواند باعث افزایش جریان درآمد از بازارهای موجود شرکت شود و فرصت‌های جدیدی را در بازار ایجاد کند دسترسی به بخش‌های بازار را که با محصولات جدید این شرکت امکان‌پذیر نیست، فراهم می‌کند. این مطالعه به درک از زنجیره تأمین دورانی می‌افزاید و پیشنهادات تحقیقاتی در مورد پتانسیل درآمد ذاتی زنجیره‌های تأمین دورانی را ارائه می‌دهد. یانگ و همکاران (Yang et al., 2018)، در مطالعه خود به نوآوری در مدل کسب‌وکار برای زنجیره‌های تأمین دورانی پرداخته شده است و پیشنهاد شده است که مدل‌های تجاری سیستم‌های خدمات تولیدی می‌توانند از طریق ایجاد ارزش در محافل داخلی، حلقه‌های استفاده طولانی، حلقه زنجیره تأمین را افزایش دهند. روش ارائه شده در این مقاله اتخاذ یک روش اکتشافی از یک شرکت بزرگ تولیدی چینی است که یک مدل تجاری سنتی مبتنی بر محصول و سه نوع مدل تجاری تولیدی به استفاده می‌کند. عملیات زنجیره تأمین از چهار مدل تجاری مجزا تجزیه و تحلیل شده و بخشنامه‌های مربوط به آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های تجاری مشابه نتیجه گرا، چرخه‌های فشرده و کارآمدتری از عملیات زنجیره تأمین دارند. به این معنی است که سیستم تعمیر، استفاده مجدد و بازسازی سریع‌تر و سرعت آن بالاتر است. این تحقیق به درک بهتری از رابطه بین نوآوری مدل کسب‌وکار و بخشنامه زنجیره تأمین کمک می‌کند. فاروک و همکاران (Farooque et al., 2019)، در مطالعه خود ابتدا اصطلاحات مختلف مربوط به پایداری زنجیره تأمین را طبقه‌بندی می‌کنند و تعریف واحدی از زنجیره تأمین دورانی را مفهوم‌سازی می‌کنند. با استفاده از این تعریف به عنوان مبنای سبب یک بررسی ادبیات ساختاریافته از ۲۶۱ مقاله تحقیقاتی در مورد وضعیت فعلی تحقیقات زنجیره تأمین

دورانی»، یعنی ادغام تفکر CE در مدیریت زنجیره تأمین با هدف دستیابی به «ضایعات صفر» می‌پردازد. این بررسی ۶۸ مورد پیاده‌سازی CE واقعی را که توسط بنیاد الن مک آرتور جمع‌آوری شده و ۱۲۴ مقاله در مجلات دانشگاهی معتبر و رده بالا در مدیریت عملیات و زنجیره تأمین را پوشش می‌دهد. بررسی مقایسه‌ای نشان داده که CSCM ابعاد متعددی را در برمی‌گیرد، از جمله SCM حلقه بسته، SCM معکوس، SCM بازسازی، SCM بازیافت و همزیستی صنعتی. بر اساس شکاف‌های تحقیق-عمل شناسایی شده و نیازهای تحقیقاتی مبرم، این مطالعه جهت‌گیری‌های مهمی را برای مطالعات آینده برای پیشبرد چرخه زنجیره تأمین موردبحث قرار داده است.

لهانه و کنت (Lahane & Kant, 2021)، به ارزیابی و رتبه‌بندی راه‌حل‌ها برای کاهش ریسک‌های زنجیره تأمین دورانی پرداخته‌اند. هدف از این تحقیق شناسایی و رتبه‌بندی راه‌حل‌های غلبه بر خطرات در اجرای زنجیره تأمین حلقه بسته^۲ CLSC می‌باشد. این رتبه‌بندی به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا بر روی بهترین راه‌حل‌ها تمرکز کنند و استراتژی‌های مناسب را برای مدیریت مؤثر ریسک‌های مرتبط با CLSC توسعه دهند. این تحقیق یک چارچوب ترکیبی جدید را با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی فیثاغورث (PF-AHP) و فیثاغورث فازی برای رتبه‌بندی راه‌حل‌ها برای کاهش خطرات اجرای CLSC ارائه می‌کند. این تحقیق یک ابزار پشتیبانی تصمیم‌سازی، سیستماتیک، دقیق و مفید را برای شاغلین، دانشگاهیان و سیاست‌گذارانی که مایل‌اند به‌طور مؤثر ریسک‌های CLSC را برای موفقیت اجرای CLSC مدیریت کنند، فراهم کرده است.

سنتوبلی و همکاران (Centobelli et al., 2022) فناوری بلاک چین را برای اعتماد، قابلیت ردیابی و شفافیت در زنجیره تأمین دورانی موردبررسی قرار داده‌اند. این مقاله برای ارتباط سه فرآیند معکوس زنجیره تأمین دورانی (بازیافت، توزیع مجدد، ساخت مجدد) و سه عامل مؤثر بر فناوری‌های بلاک چین (اعتماد، قابلیت ردیابی، شفافیت)، چارچوب یکپارچه چندمرحله‌ای را برای طراحی پلتفرم‌های بلاکچین دورانی پیشنهاد می‌کند. نتایج نشان داده که نقش بلاک چین به‌عنوان یک قابلیت فناورانه

ترکیبی پایدار استفاده شده است. در نهایت مطالعه موردی با رویکرد محدودیت اپسیلون حل گردیده است. وانگ و همکاران (Wang et al., 2020)، در مطالعه خود اولین گام را در توسعه معماری سیستم مدیریت زنجیره تأمین حلقوی فعال در بلاکچین در صنعت مد روز ارائه دادند. معماری سیستم توسط دو متخصص در فناوری زنجیره بلوک و مدیریت زنجیره تأیید شد. پیامدهای مدیریتی برای پیاده‌سازی فناوری بلاکچین برای پیشبرد دستور کار اقتصاد دایره‌ای موردبحث قرار گرفته است. خاندوال و باروا (Khandelwal & Barua, 2020)، در این مطالعه دیدگاهی را برای پیاده‌سازی مدیریت زنجیره تأمین دورانی^۱ (CSCM) در صنعت پلاستیک در اقتصادهای نوظهور، به‌ویژه هند فراهم می‌کند. فلسفه اقتصاد چرخشی (CE) را در مدیریت زنجیره تأمین ادغام می‌کند و دیدگاه جدیدی به سمت پایداری ارائه می‌دهد. با این وجود، اجرای CSCM به دلیل وجود موانع متعدد کاری دشوار است؛ بنابراین، این مطالعه باهدف بررسی و اولویت‌بندی موانع اجرای اقدامات CSCM در صنایع پلاستیک هند انجام شده است. این روش دومرحله‌ای را برای شناسایی و اولویت‌بندی موانع اجرای CSCM به کار می‌گیرد. در مجموع ۲۴ مانع از طریق یک بررسی گسترده ادبیات و نظرات کارشناسان در پنج گروه اصلی شناسایی شد. برای رتبه‌بندی موانع، از یک روش سلسله مراتبی تحلیل فازی (AHP) استفاده شده است. چارچوب فازی برای کنترل عدم قطعیت و ابهام در نظر گرفته شده است. برای نشان دادن مدل پیشنهادی، یک مورد تجربی از صنعت پلاستیک هند گرفته شده است. یک تجزیه و تحلیل حساسیت برای بررسی قابلیت مدل انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که فقدان سیاست‌های کاهش مالیات و اجرای ضعیف قوانین و مقررات برای حفاظت از محیط‌زیست برجسته‌ترین موانع طبق نتایج این تحقیق است. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به‌عنوان یک سنگ بنای محکی برای مدیران و سیاست‌گذاران در اجرای مؤثر زنجیره تأمین دورانی باشد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021)، بررسی مقایسه‌ای شیوه‌ها و تحقیقات پیشرفته مدیریت زنجیره تأمین دورانی چندبعدی را انجام داده‌اند. این مقاله به بررسی شیوه‌ها و تحقیقات پیشرفته در «مدیریت زنجیره تأمین

² Closed loop supply chain (CLSC)

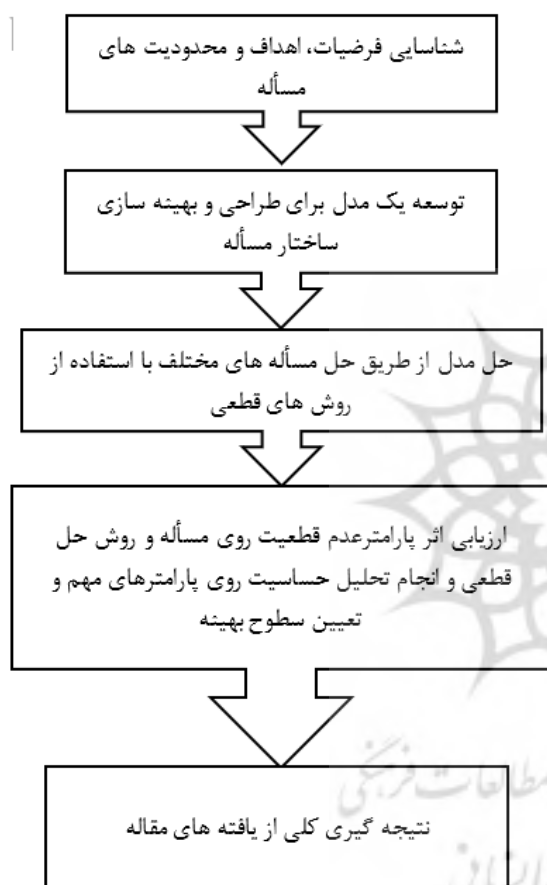
¹ Circular supply chain management (CSCM)

است، با توجه به هم واحد بودن برخی اهداف با یکدیگر مانند اهداف (A و B) و (C و D)، جمع اهداف هم واحد به عنوان هدف نهایی در نظر گرفته شده است و مسئله به یک مسئله دوهدفه تبدیل شده است. لذا اهدافی که در مدل سازی در نظر گرفته شده است به صورت زیر می باشند.

$$\text{Min } (F1) = A+B$$

$$\text{Min } (F2) = C+D$$

در شکل ۱، با به تصویر کشیدن مراحل اصلی انجام مقاله به صورت مفهومی نشان داده شده است.



شکل ۱. مدل مفهومی روش اجرایی مقاله.

Figure 1. Conceptual model of the article's execution method.

۳-۱- مدل سازی ریاضی

در این بخش کلیه نمادهای به کار گرفته شده برای توصیف مجموعه ها؛ پارامترها و متغیرهای مسئله توضیح داده شده اند.

مجموعه ها:

I: مجموعه میدانها برای استخراج، $1, \dots, I$

J: مجموعه تصفیه کننده ها در پالایشگاه، $1, \dots, J$

برای بهبود کنترل در جابجایی ضایعات و فعالیت های مدیریت بازگشت محصول برجسته و تأثیرگذار می باشد. گوویندان و همکاران (Govindan et al., 2023)، در این تحقیق یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط دوهدفه یکپارچه با هدف بهینه سازی تصمیمات عملیاتی و استراتژیک در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه داده اند. مدل پیشنهادی از نوع مسئله مکان یابی-موجودی-مسیریابی برای ساختار شبکه سود می برد و سیاست مالیات کربن و مشکل زمان بندی خودرو را به ترتیب برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و زمان انتظار خودرو اعمال می کند. همچنین، رویکرد مبتنی بر سناریو تصادفی برای مقابله با عدم قطعیت تقاضا استفاده می شود و یک روش محدودیت افسیلون تقویت شده برای حل مدل دوهدفه پیشنهادی استفاده می شود. کاربرد مدل پیشنهادی و اثربخشی رویکرد راه حل دوهدفه برای دستیابی به اقتصاد چرخشی از طریق پیاده سازی آن در صنعت کابل و سیم در ایران بررسی می شود. با توجه به بررسی تحقیقات پیشین، مهم ترین شکاف های تحقیق به شرح ذیل مشخص می شود.

- عدم طراحی یک شبکه زنجیره تأمین دورانی برای بهینه سازی تصمیمات استراتژیک و عملیاتی در صنایع تولیدی به ویژه صنایع پتروشیمی با در نظر گرفتن حداقل کردن هزینه های انتقال و موجودی و آلاینده های زیست محیطی،
- عدم تعیین رویکردی برای مقابله با تقاضای غیرقطعی در طراحی یک زنجیره تأمین دورانی.

۳- روش تحقیق

در این بخش از مقاله یک مدل ریاضی برای انتقال و توزیع میعانات به عنوان یک سیستم تولیدی برای کاهش هزینه ها و سرمایه گذاری ها و همچنین کاهش تأثیر سو گازهای گلخانه ای ارائه می شود. به طور کلی توابع هدفی که در مدل سازی ریاضی به آن ها توجه شده است عبارت اند از: هزینه های انتقال (A)، هزینه موجودی (B)، میزان آلودگی زیست محیطی در مراکز تصفیه کننده (C) و میزان آلودگی زیست محیطی در مراکز توزیع (D). برای غلبه به ضعف روش ها در زمانی که تعداد اهداف بیش از دو هدف

P : مجموعه محصولات که شامل فرآورده‌های پتروشیمی می‌باشد، $1, \dots, P$

T : مجموعه دوره‌ها، $1, \dots, T$

D : مجموعه توزیع‌کنندگان $1, \dots, D$

S : مجموعه انبارهای نفت خام، $1, \dots, S$

C : مجموعه مصرف‌کننده میعانات، $1, \dots, C$

H : مجموعه پالایشگاه‌ها، $1, \dots, H$

اندیس‌ها:

$i \in I$: اندیس مربوط به مجموعه میدان‌ها

$j \in J$: مجموعه تصفیه‌کننده‌ها

$p \in P$: مجموعه محصولات

$t \in T$: مجموعه دوره‌ها

$d \in D$: مجموعه توزیع‌کنندگان

$s \in S$: مجموعه انبارهای نفت خام

$c \in C$: مجموعه مصرف‌کننده میعانات

$h \in H$: مجموعه پالایشگاه‌ها

پارامترها:

$capacity_i$: حداکثر ظرفیت میدان i ام

Cx_{ijt} : هزینه انتقال میعانات از میدان i ام به تصفیه‌کننده j ام در زمان t ام

Cy_{d_japt} : هزینه انتقال میعانات از تصفیه‌کننده j ام به توزیع‌کننده d در زمان t ام

Cy_{d_jcpt} : هزینه انتقال میعانات از تصفیه‌کننده j ام به مصرف‌کننده میعانات در زمان t ام

Cy_{h_jht} : هزینه انتقال میعانات از تصفیه‌کننده j ام به پالایشگاه h ام در زمان t ام

Cds_{ast} : هزینه انتقال میعانات از توزیع‌کننده d به انبار s

Csd_{sat} : هزینه انتقال میعانات از انبار s به توزیع‌کننده d

yds_{ast} : درصد انتقال نفت خام از توزیع‌کننده d به انبار s

ysd_{sat} : درصد انتقال نفت خام از انبار s به توزیع‌کننده d

$Cl_{d_{atp}}$: هزینه مصرف میعانات در مراکز توزیع d در زمان t

$Cl_{h_{htp}}$: هزینه مصرف میعانات در مراکز پالایشگاه h در زمان t

λ_{ip} : درصد مقدار محصول p (فرآورده‌های پتروشیمی) از گازهای ورودی میدان i ام

DC_{ctp} : مقدار تقاضای مرکز مصرف‌کننده c از میعانات P در زمان t

Dd_{dtp} : مقدار تقاضای مرکز توزیع‌کننده d از میعانات P در زمان t

Dh_{htp} : مقدار تقاضای مرکز پالایشگاه پتروشیمی h از میعانات P در زمان t

$DE_{ex,t}$: مقدار تقاضای نفت خام برای مراکز صادرات ex در زمان t

$CI_{dm_{im,d,t}}$: هزینه انتقال مواد اولیه از مراکز واردات i_m به مرکز توزیع d در زمان t

CI'_{jt} : هزینه خرید مواد وارد شده از خارج به مرکز تصفیه j در زمان t

CI_{jt} : هزینه واردات مواد اولیه وارد شده به مرکز تصفیه j در زمان t

CIc'_{ctp} : هزینه تولید میعانات در مراکز مصرف‌کننده میعانات c در زمان t

CIc_{ctp} : هزینه مصرف میعانات در مراکز مصرف‌کننده میعانات c در زمان t

$CI_{d'_{dtp}}$: هزینه تولید میعانات در مراکز توزیع d در زمان t

$CI_{h'_{htp}}$: هزینه تولید میعانات در مراکز پالایشگاه h در زمان t

Cap_{ctp} : ظرفیت مرکز جمع‌آوری میعانات p از سوی مصرف‌کننده c در زمان t

$f'_{o_{ctp}}$: هزینه جمع‌آوری میعانات p از سوی مصرف‌کننده c در زمان t

γ_{ctp} : نرخ برگشت میعانات p از سوی مصرف‌کننده c در زمان t

GI_{jt} : هزینه موجودی میعانات وارد شده از میدان به مرکز تصفیه j در زمان t

GII'_{jt} : هزینه مواد خریداری شده برای مرکز تصفیه j در زمان t

β_d : ضریب آلودگی مجاز در مراکز توزیع‌کننده،

β_j : میزان آلودگی مجاز در مراکز تصفیه‌کننده

متغیرها:

کلیه متغیرهای این مقاله از نوع پیوسته است و از هیچ متغیر صحیح و باینری تبعیت نمی‌کند. این متغیرها عبارت‌اند از:

x_{ijt} : مقدار انتقال میعانات از میدان i ام به تصفیه‌کننده j ام در زمان t ام

P : مجموعه محصولات که شامل فرآورده‌های پتروشیمی می‌باشد، $1, \dots, P$

T : مجموعه دوره‌ها، $1, \dots, T$

D : مجموعه توزیع‌کنندگان $1, \dots, D$

S : مجموعه انبارهای نفت خام، $1, \dots, S$

C : مجموعه مصرف‌کننده میعانات، $1, \dots, C$

H : مجموعه پالایشگاه‌ها، $1, \dots, H$

اندیس‌ها:

$i \in I$: اندیس مربوط به مجموعه میدان‌ها

$j \in J$: مجموعه تصفیه‌کننده‌ها

$p \in P$: مجموعه محصولات

$t \in T$: مجموعه دوره‌ها

$d \in D$: مجموعه توزیع‌کنندگان

$s \in S$: مجموعه انبارهای نفت خام

$c \in C$: مجموعه مصرف‌کننده میعانات

$h \in H$: مجموعه پالایشگاه‌ها

پارامترها:

$capacity_i$: حداکثر ظرفیت میدان i ام

Cx_{ijt} : هزینه انتقال میعانات از میدان i ام به تصفیه‌کننده j ام در زمان t ام

Cy_{d_japt} : هزینه انتقال میعانات از تصفیه‌کننده j ام به توزیع‌کننده d در زمان t ام

Cy_{d_jcpt} : هزینه انتقال میعانات از تصفیه‌کننده j ام به مصرف‌کننده میعانات در زمان t ام

Cy_{h_jht} : هزینه انتقال میعانات از تصفیه‌کننده j ام به پالایشگاه h ام در زمان t ام

Cds_{ast} : هزینه انتقال میعانات از توزیع‌کننده d به انبار s

Csd_{sat} : هزینه انتقال میعانات از انبار s به توزیع‌کننده d

yds_{ast} : درصد انتقال نفت خام از توزیع‌کننده d به انبار s

ysd_{sat} : درصد انتقال نفت خام از انبار s به توزیع‌کننده d

$Cl_{d_{atp}}$: هزینه مصرف میعانات در مراکز توزیع d در زمان t

$Cl_{h_{htp}}$: هزینه مصرف میعانات در مراکز پالایشگاه h در زمان t

λ_{ip} : درصد مقدار محصول p (فرآورده‌های پتروشیمی) از گازهای ورودی میدان i ام

DC_{ctp} : مقدار تقاضای مرکز مصرف‌کننده c از میعانات P در زمان t

$$\begin{aligned} & \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} ds_{dst} \cdot Cds_{dst} + \\ & \sum_{d \in D} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} sd_{sdt} \cdot Cds_{sdt} + \\ & \sum_d \sum_{im \in IM} \sum_{t \in T} Idm_{im,d,t} \cdot Cldm_{im,d,t} \\ & + \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Ic'_{ctp} \cdot f'_{octp} \end{aligned}$$

معادله (۱)، هزینه‌های انتقال را محاسبه می‌کند. در این معادله هزینه جمع آوری میعانات p از سوی مصرف‌کننده c در دوره t برای تحقق لجستیک معکوس با استفاده از رابطه $\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Ic'_{ctp} \cdot f'_{octp}$ لحاظ شده است. (۲)

$$\begin{aligned} B &= \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} CII_{jt} \cdot II_{jt} + \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} CII'_{jt} \cdot II'_{jt} \\ &+ \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Ic_{ctp} \cdot C Ic_{ctp} \\ &+ \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} CI'_{ctp} \cdot C Ic'_{ctp} \\ &+ \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Id_{atp} \cdot C Id_{atp} \\ &+ \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Id'_{atp} \cdot C Id'_{atp} \\ &+ \sum_{d \in S} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Ih_{htp} \cdot C Ih_{htp} \\ &+ \sum_{c \in S} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} Ih'_{htp} \cdot C Ih'_{htp} \sum_{j \in S} \sum_{t \in T} IS_{st} \cdot CIS_{st} \\ &+ \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} cap_{ctp} \cdot r_{ctp} Ic'_{ctp} \end{aligned}$$

معادله (۲) هزینه موجودی را محاسبه می‌کند. در این رابطه موجودی محصولات برگشتی بر اساس نرخ بازگشت هر یک از آن‌ها برحسب ظرفیت نگهداری آن‌ها از طریق رابطه $\sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} cap_{ctp} \cdot r_{ctp} Ic'_{ctp}$ در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} C &= \sum_{j \in J} \beta_j (\sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} yd_{jdpt} \cdot cyd_{jdpt} + \\ & \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} yc_{jdpt} \cdot cyc_{jdpt} + \\ & \sum_{h \in H} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} yh_{jdpt} \cdot cyh_{jdpt}) \end{aligned} \quad (۳)$$

معادله (۳) میزان آلودگی زیست‌محیطی در مراکز تصفیه‌کننده را محاسبه می‌کند. مقدار β_j از مطالعه زارعی و همکاران (۲۰۱۹) در نظر گرفته شده است.

yd_{jdpt} : مقدار انتقال متان از تصفیه‌کننده j ام به توزیع‌کننده d در زمان t ام
 yc_{jdpt} : مقدار انتقال نفت خام از تصفیه‌کننده j ام به توزیع‌کننده d میعانات در زمان t ام
 yh_{jdpt} : مقدار انتقال اتان از تصفیه‌کننده j ام به پالایشگاه h ام در زمان t ام
 ds_{dst} : مقدار انتقال میعانات از توزیع‌کننده d به انبار s
 sd_{sdt} : مقدار انتقال میعانات از انبار s به توزیع‌کننده d
 II_{jt} : مقدار موجودی میعانات وارد شده از میدان به مرکز تصفیه j در زمان t
 Ic_{ctp} : مقدار موجودی میعانات پتروشیمی در مراکز مصرف‌کننده میعانات c در زمان t
 Id_{atp} : مقدار موجودی میعانات در مراکز توزیع d در زمان t
 Ih_{htp} : مقدار موجودی میعانات در مراکز پالایشگاه h در زمان t
 IS_{st} : مقدار موجودی میعانات در مراکز انبار s در زمان t
 II'_{jt} : مقدار مواد خریداری شده برای مرکز تصفیه j در زمان t
 Ic'_{ctp} : مقدار تولید میعانات پتروشیمی در مراکز مصرف‌کننده میعانات c در زمان t
 Id'_{atp} : مقدار تولید میعانات در مراکز توزیع d در زمان t
 Ih'_{htp} : مقدار تولید میعانات در مراکز پالایشگاه h در زمان t
 $Idm_{im,d,t}$: مقدار مواد اولیه از مراکز واردات i_m به مرکز توزیع d در زمان t

توابع هدف:

با در نظر گرفتن موارد بالا، مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی به فرم قطعی که برای مدل‌سازی ریاضی مسئله در نظر گرفته شده در معادلات زیر توسعه داده شده است.

$$A = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} x_{ijt} \cdot Cx_{ijt} + \quad (۱)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} yd_{jdpt} \cdot Cyd_{jdpt} +$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} yd_{jdpt} \cdot Cyc_{jdpt} +$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{h \in H} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} yd_{jdpt} \cdot Cyh_{jdpt} +$$

$$Ih_{htp} = Ih_{h,t-1,p} + \sum_{j \in J} yh_{jdpt} + \sum_{j \in J} yc_{jdpt} + \sum_{j \in J} yd_{jdpt} - Dd_{dpt}$$

محدودیت (۵)، تضمین می‌کند که حداکثر مقدار ارسالی از میدان به تصفیه‌کننده‌ها در نظر گرفته شود. محدودیت (۶)، مقدار موجودی میعانات ورودی از تصفیه‌کننده‌ها را نشان می‌دهد. محدودیت (۷)، این محدودیت مقدار موجودی میعانات را در مراکز مصرف‌کننده میعانات در نظر می‌گیرد. محدودیت (۸)، تضمین می‌دهد مقدار متان که باید از تصفیه‌کننده j به سایر توزیع‌کنندگان ارسال شود نباید بیشتر از حداکثر محصول تصفیه شده موردنظر ورودی باشد. محدودیت (۹)، تضمین می‌دهد مقدار نفت خام که باید از تصفیه‌کننده j به سایر توزیع‌کنندگان ارسال شود نباید بیشتر از حداکثر محصول تصفیه شده موردنظر ورودی باشد. محدودیت (۱۰)، تضمین می‌دهد مقدار اتان که باید از تصفیه‌کننده j به سایر توزیع‌کنندگان ارسال شود، نباید بیشتر از حداکثر محصول تصفیه شده موردنظر ورودی باشد. محدودیت (۱۱)، مقدار موجودی میعانات در مراکز توزیع را محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۲) مقدار موجودی میعانات قابل عرضه در پالایشگاه محاسبه می‌شود.

۳-۲- برنامه‌ریزی عدم قطعیت

رویکرد مواجهه شدن با عدم قطعیت در این مطالعه بر اساس پیشنهاد رضایی و همکاران (Rezaei et al., 2021) دنبال شده است. تصمیمات اصلی در این حالت از مسئله، برآورد تقاضاها و تعیین زمان شروع آن‌ها است. بنابراین، متغیر باینری Z_i و متغیر y_{it} را برای هر تقاضا در نظر می‌گیریم. به ازای $1 \leq c \leq C$ مقدار Z_i در صورتی که تقاضا برآورده شود برابر با یک و در غیر این صورت، برابر با صفر خواهد بود. به ازای $1 \leq t \leq T$ و $1 \leq i \leq I$ مقدار y_{it} برابر یک است، اگر تقاضای مربوط به مجموعه مصرف‌کننده‌های میعانات i در دوره t برآورده شود. در غیر این صورت مقدار آن برابر با صفر خواهد بود. از آنجایی که هر تقاضا فقط می‌تواند در افق برنامه‌ریزی H یک بار اتفاق بی‌افتد، بنابراین داریم:

$$Z_i = \sum_{t=1}^T y_{it}, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \leq T; i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$D = \sum_{d \in D} \beta_d (\sum_{t \in T} Cds_{dst} + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} sd_{sdt} \cdot csd_{sdt} + \sum_{im \in IM} \sum_{t \in T} Idm_{im,d,t} \cdot CIdm_{im,d,t}) \quad (4)$$

معادله (۴) میزان آلودگی زیست‌محیطی در مراکز توزیع را محاسبه می‌کند. مقدار β_d از مطالعه زارعی و همکاران (۲۰۱۹) در نظر گرفته شده است. با توجه به موارد اشاره شده در بالا، مجموع معادلات (۱) با (۲) و (۳) با (۴) به عنوان تابع هدف نهایی به صورت $F=0.5*F1+0.5*F2$ در نظر گرفته می‌شود.

محدودیت‌ها:

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} \leq capacity_i \quad (5)$$

$$\forall_i \in I, t \in T \quad (6)$$

$$Ii_{jt} = Ii_{jt-1} + \sum_{j \in J} x_{ijt} + \sum_{i \in I} \sum_{p2 \in P} \sum_{j \in J} yd_{jdpt} - \sum_{c \in C} \sum_{p1 \in P} yd_{jdpt} \sum_{h \in H} \sum_{p3 \in P} yh_{jdpt} \quad (7)$$

$$Ic_{ctp} = Ic_{c,t-1,p} + \sum_{i \in I} x_{ijt} - \sum_{i \in I} yc_{dcpt} - \sum_{j \in J} yh_{dcpt} - \sum_{j \in J} yd_{dcpt} - DC_{ctp} \quad (8)$$

$$\sum_{d \in D} yd_{jdpt} - \sum_{i \in I} \lambda_{ip} \cdot x_{ijt} \quad (9)$$

$$\sum_{d \in D} yd_{jdpt} \leq \sum_{i \in I} \lambda_{ip} \cdot x_{ijt} \quad (10)$$

$$\sum_{d \in D} yh_{jdpt} \leq \sum_{i \in I} \lambda_{ip} \cdot x_{ijt} \quad (11)$$

$$Id_{dtp} = Id_{d,t-1,p} + \sum_{im \in IM} idm_{im,d,t} - \sum_{ex \in EX} DE_{ex,t} - \sum_{s \in S} \gamma ds_{st} \cdot ds_{dst} + \sum_{s \in S} \gamma sd_{st} \cdot sd_{sdt} + \sum_{j \in J} yd_{jdpt} + \sum_{j \in J} yc_{jdpt} - Dd_{dpt} \quad (12)$$

$$\forall_d \in D, t \in T, p2 \in P$$

کمی‌سازی^۱ می‌گویند. یکی از این نوع روش‌های کمی‌سازی، روش وزن‌دار شده می‌باشد.

روش مجموع وزن‌دار شده به عنوان یک ابزار مؤثر در تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی، به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری و قابلیت تجزیه و تحلیل آسان، به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن معیارهای مختلف و وزن‌دهی مناسب، تصمیمات بهتری اتخاذ کنند. این روش به دلیل سادگی در فهم و پیاده‌سازی، به راحتی قابل استفاده است. تصمیم‌گیرندگان می‌توانند به راحتی معیارها را تعیین و وزن‌دهی کنند. روش مجموع وزن‌دار شده به تصمیم‌گیرندگان این امکان را می‌دهد که معیارهای مختلف را با توجه به اولویت‌ها و نیازهای خاص خود وزن‌دهی کنند. با توجه به دلایل ذکر شده این روش مزایای مختلفی برای استفاده دارد. این روش قادر است با ترکیب معیارهای مختلف به یک نمره کلی، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند به راحتی گزینه‌ها را مقایسه کنند و تصمیمات بهتری بگیرند. روش مجموع وزن‌دار شده به وضوح نشان می‌دهد که هر معیار چه وزنی دارد و چگونه بر نتایج نهایی تأثیر می‌گذارد. این شفافیت می‌تواند به افزایش اعتماد به تصمیمات کمک کند.

فرض کنید، $Y \subseteq \mathbb{R}^p$ برای یک بردار وزنی دلخواه $\hat{\lambda} = (\hat{\lambda}_1, \dots, \hat{\lambda}_p) \in \mathbb{R}_{\geq}^p$ باشد. مجموعه تمام جواب‌های بهینه‌سازی چندهدفه نسبت به بردار وزنی $\hat{\lambda}$ به شکل رابطه ۱۸ تعریف می‌گردد.

$$S(\hat{\lambda}, Y) = \{\hat{y} \in Y : \langle \hat{\lambda}, \hat{y} \rangle = \min \langle \hat{\lambda}, y \rangle; y \in Y\} \quad (18)$$

که در آن $\langle \hat{\lambda}, y \rangle$ ضرب اسکالر در \mathbb{R}^p است. فرض کنید $\langle \hat{\lambda}, y \rangle = c$ که در آن c یک پارامتر است و $y \in Y$ است. از بین تمام مقادیر c در حقیقت به دنبال کوچکترین مقدار c می‌باشیم که اشتراک بین ناحیه شدنی Y و $\langle \hat{\lambda}, y \rangle = c$ مخالف با تهی باشد. از آنجاییکه شرط $\sum_{k=1}^p \lambda_k = 1$ را همواره می‌توان ساخت، و این شرط تغییری در مجموعه جواب‌های غیرمغلوب مسئله بهینه‌سازی چندهدفه نسبت به شرط $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_p) \in \mathbb{R}_{\geq}^p$ ایجاد نمی‌کند، لذا همواره از شرط $\sum_{k=1}^p \lambda_k = 1$ استفاده می‌کنیم. فرض کنید:

معادله (۱۳)، این اجازه را می‌دهد که متغیر Z_i مانند یک متغیر پیوسته عمل کند. چون در معادله (۱۳) متغیرهای مستقل یا صفر هستند یا یک، در صورت محاسبه حاصل جمع آن‌ها با یکدیگر، یک مقدار بزرگ‌تر یا مساوی صفر بدست می‌آید. حال اگر یک تقاضا در دوره k برآورده شود، ما می‌توانیم y_{ik} را از طریق متغیر پیوسته (۱۴) محاسبه کنیم.

$$y_{ik} = \sum_{t=1}^k y_{it}, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \leq T; i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T \quad (14)$$

به منظور برآورد تقاضا نیاز به واردات مواد اولیه داریم. برای این منظور متغیر N_{it} را به عنوان میزان واردات مواد اولیه در طول دوره t برای تقاضای i به شمار می‌آوریم. اگر تقاضا در طول دوره برآورده نشود، مقدار آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. کل مقدار تقاضا نباید از مقدار تقاضای بالقوه تجاوز کند. چون در صورت تجاوز با مازاد مواد روبرو می‌شویم.

$$y_{it} N_{it} \leq N_{it}^U, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \leq T; i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T \quad (15)$$

بعلاوه، عرضه (انتقال) میزان محصولات تولید شده بر اساس هر یک از تقاضاهای برآورده شده در هر دوره معین از طریق کل محصولات میعانان انجام می‌شود. این محدودیت به صورت یک معادله غیر استوار در رابطه (۱۶) نشان داده شده است. معادله (۱۷) همتای استوار معادله (۱۶) است. بنابراین معادله (۱۷) را به جای معادله (۱۶) در مسئله وارد می‌کنیم. w_{it} ضریب مصرف میعانان پتروشیمی که لازم است تولید شود (واحد اندازه گیری آن درصد می باشد).

$$\sum_{i=1}^I w_{it} N_{it} \geq S_t, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \leq T; i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^I w_{it} N_{it} \geq \hat{S}_t - \hat{S}_t, \quad 1 \leq i \leq I; 1 \leq t \leq T; i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T \quad (17)$$

۳-۳- روش حل مسئله: روش مجموع وزن‌دار شده

بر طبق روش مجموع وزن‌دار شده تصمیم‌گیرنده به اهداف مختلف وزن اختصاص می‌دهد و سپس توابع هدف را در وزن‌های مربوطه ضرب و در نهایت تابع هدف واحدی بوجود می‌آورد. یکی از روش‌های حل مسئله بهینه‌سازی چندهدفه تبدیل آن به یک مسئله بهینه‌سازی تک هدفه پارامتری است که به این نوع تبدیل

^۱ Scalarization

۳-۴- روش حل مسئله: روش NSGA-II

در این مقاله برای حل مدل از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II استفاده شده است. از جمله نقاط مثبت این الگوریتم این است که برخلاف برخی الگوریتم‌های دیگر که فضای جواب مسئله را فقط در یک جهت جستجو می‌کنند، به‌طور هم‌زمان در چندین جهت به جستجوی جواب می‌پردازد. عدم نیاز الگوریتم ژنتیک به پیوستگی و تحدب تابع هدف را نیز می‌توان از دیگر ویژگی‌های مثبت این الگوریتم قلمداد نمود. عملکرد الگوریتم NSGA-II مطابق با شبه کد زیر است. همچنین، فلوجارت اجرای آن در شکل ۲ نشان داده شده است.

$$S(Y) = U_{\lambda \in \mathbb{R}_{>}^p} S(\lambda, Y) = \quad (19)$$

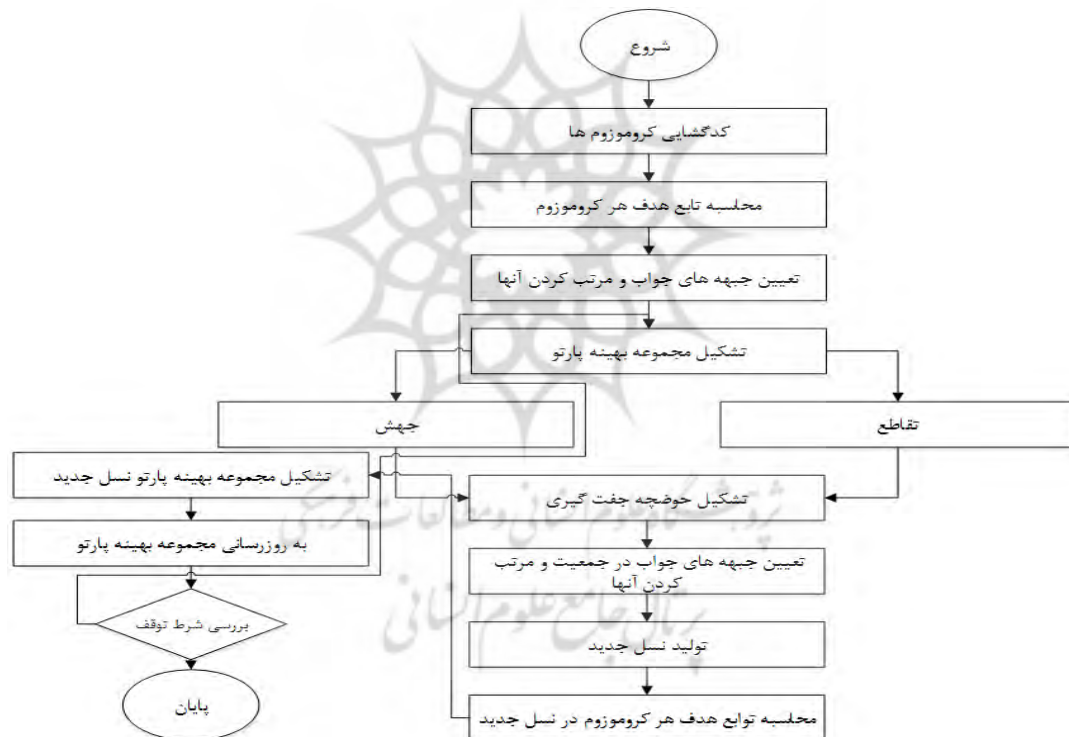
$$U_{\{\lambda > 0: \sum_{k=1}^p \lambda_k = 1\}} S(\lambda, Y)$$

و همچنین،

$$(20)$$

$S_0(Y) = U_{\lambda \in \mathbb{R}_{\geq}^p} S(\lambda, Y) = U_{\{\lambda \geq 0: \sum_{k=1}^p \lambda_k = 1\}} S(\lambda, Y)$ که در روابط ۱۹ و ۲۰، $S(Y)$ و $S_0(Y)$ به ترتیب مجموعه تمام نقاط غیرمغلوب مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را نسبت به بردار وزنی $\lambda \in \mathbb{R}_{>}^p$ را نشان می‌دهند. در روش مجموع وزن‌دار شده توجه به دو نکته زیر لازم است.

- تمامی توابع هدف باید بصورت Max یا Min باشند،
- ضرایب متغیرهای تصمیم در هر تابع هدف با تابع هدف دیگر باید هم‌مقیاس باشند و بنابراین دارای یک رده و بزرگی باشند.



شکل ۲. فلوجارت اجرایی الگوریتم NSGA-II

Figure 2. Executive flowchart of the NSGA-II algorithm.

Step 4: Create offspring using a crossover operator
Step 5: Introduce genetic variation in the offspring using a mutation operator
Step 6: Replace some of the least fit individuals in the current population with the new offspring
End loop
Finish//.

//Start:

Step 1: Generate an initial population
Begin loop /* Loop until a termination condition is met */
Step 2: Evaluate the fitness of a subset of individuals from the population
Step 3: Select pairs of the fittest individuals for reproduction

۴- نتایج عددی مدل ریاضی

جدول ۱. مجموعه‌های تعریف‌شده برای مسئله در ابعاد کوچک

Table 1. Defined sets for the problem in small dimensions

مجموعه‌های تعریف‌شده	مقدار
میدان‌ها	$i_1; i_2; i_3$
تصفیه‌کننده‌ها	$j_1; j_2$
محصولات	اتان و متان و نفت خام
دوره‌های زمانی	$t_1; t_2; t_3$
پالایشگاه	$h_1; h_2$
توزیع‌کننده‌ها	$d_1; d_2; d_3$
مبادی واردات	$im_1; im_2$
انبارها	$s_1; s_2$

جدول ۲. مقدار بهینه x_{ijt}

Table 2. Optimal value of x_{ijt}

به از	دوره ۱			دوره ۲		
	j_1	j_2	به از	j_1	j_2	به از
i_1	۰	۷۱/۴۸۹	۱۰۶/۸۰	۸۵/۳۳۵	۷۶/۱۰۱	۱۸/۴۴۹
i_2	۰	۰	۰	۰	۰	۰
i_3	۰	۰	۰	۰	۰	۰

جدول ۳. مقدار II_{jt}

Table 3. Value of II_{jt}

مرکز تصفیه	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳
j_1	۰	۰	۲۰/۷۴۹
j_2	۰	۷/۹۰۶	۱۳/۶۰۱

جدول ۴. مقدار بهینه (yh_{jht})

Table 4. Optimal value (yh_{jht})

به از	دوره ۱		دوره ۲		دوره ۳	
	h_1	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2
j_1	۰	۰	۲۲	۰/۰۷۰	۰	۱۲
j_2	۷	۱۹/۳۴۲	۰	۱۵/۵۷۷	۰	۰

جدول ۵. مقدار بهینه (yc_{jht})

Table 5. Optimal value (yc_{jht})

به از	دوره ۱		دوره ۲		دوره ۳	
	h_1	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2
j_1	۶	۲۲/۳۴۹	۰	۱/۲۵۶	۱۳	۲۵
j_2	۰	۰	۱۴/۳۵۶	۱۱/۳۲	۱۴/۵۸۶	۰/۰۸۶

در این بخش، با ملحوظ دانستن موارد تعیین شده در بخش قبل به عنوان پارامترهای از پیش تعیین شده مسئله برنامه‌ریزی شده برای کنترل متغیرهای در نظر گرفته شده به صورتی که در ادامه مشخص می‌شود. مسئله در ابعاد کوچک محاسبه می‌شود. مذکور به ازای مقادیر مجموعه‌هایی که در جدول ۱ مشخص شده است؛ در نرم‌افزار GAMS به اجرا درآمده است. شدنی بودن این مسئله در بخش سوم مقاله با تعیین یک مجموعه جواب نشان داده شده است. سیستم واحد قابل قبول، سیستم بین‌المللی (SI) بوده و در مواقع ضروری، باید معادل آن در سیستم آحاد دیگر در داخل پرانتز به کار رود. در این صورت، مقدار انتقال میعانان از میدان i به تصفیه‌کننده j در زمان t ام (x_{ijt}) مطابق با جدول ۲ محاسبه می‌شود.

بر اساس نتایج محاسبه‌شده، مجموع مقدار انتقال میعانان که شامل (متان و اتان و نفت خام) است در جدول ۳ نشان داده شده است. مقدار انتقال میعانان در دوره اول از میدان i_1 به مرکز تصفیه‌کننده اول برابر صفر است. همچنین، این مقدار از مراکز دوم و سوم در تمامی دوره‌ها به مراکز تصفیه اول و دوم برابر صفر است. علاوه بر این، بیشترین میزان انتقال میعانان در دوره سوم از میدان اول به مرکز اول برابر با ۱۰۶/۰۸۰ است. همچنین، مقدار موجودی میعانان وارد شده از میدان i به مرکز تصفیه j در میان t (II_{jt}) نشان داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده برای مقدار II_{jt} مقدار موجودی میعانان وارد شده در دوره اول به هر دو مرکز تصفیه برابر صفر است. همچنین، مقدار موجودی مرکز تصفیه در دوره دوم نیز برابر صفر است. در مقابل، مقدار موجودی مرکز تصفیه در دوره سوم برابر با ۲۰/۷۴۹ است. که بیشترین مقدار موجودی در طی دوره‌های زمانی است. در جدول ۴، مقدار انتقال اتان از تصفیه‌کننده j ام به پالایشگاه h در زمان t ام (yh_{jht}) نشان داده شده است. در جدول ۵، مقدار انتقال نفت خام از تصفیه‌کننده j ام به پالایشگاه h در زمان t ام (yc_{jht}) نشان داده شده است. در جدول ۶، مقدار انتقال متان از تصفیه‌کننده j ام به پالایشگاه h در زمان t ام (yd_{jht}) نشان داده شده است.

جدول ۶. مقدار بهینه $(y d_{jht})$

Table 6. Optimal value $(y d_{jht})$

به از	دوره ۱		دوره ۲		دوره ۳	
	h_1	h_2	h_1	h_2	h_1	h_2
j_1	۱۲/۳۲۵	۰	۰	۲	۰	۱۳/۵۸۹
j_2	۱۴/۲۷۹	۵	۳/۲۵۹	۰	۱۷/۲۴۹	۱/۵۶۹

همچنین، در جدول ۷، مقدار انتقال میعانان از انبار S به توزیع‌کننده d در زمان t ام (sd_{sdt}) نشان داده شده است. مقدار انتقال میعانان از انبار به توزیع‌کننده در دوره اول، فقط از طریق انبار دوم، به توزیع‌کننده سوم به مقدار $۲۱/۹۸$ انجام می‌شود. همچنین، از انبار اول و دوم به توزیع‌کننده اول و دوم به ترتیب میعانان به میزان $۱۸/۴۱$ و $۱۹/۶۰$ منتقل می‌شود. علاوه بر این، از انبار اول و دوم در دوره سوم فقط به توزیع‌کننده سوم به مقدار $۲۷/۳۳$ و $۴/۷۵$ منتقل می‌شود. مقدار مواد اولیه وارداتی از مراکز واردات I_m به مرکز توزیع d در طی دوره‌های زمانی t (im_{imdt}) مطابق با جدول ۸ می‌باشد. با توجه به نتایج محاسبه شده، میزان مواد اولیه وارداتی به مراکز توزیع در دوره دوم برابر با صفر است. همچنین، مواد اولیه واردشده ارسالی به مرکز توزیع اول در دوره اول بیشترین مقدار را دارد که برابر با $۵۵/۸۸۶$ است. سرانجام در جدول ۹ مقدار انتقال میعانان از توزیع‌کننده d به انبار s (ds_{dst}) نشان داده شده است. با محاسبه مقادیر فوق‌الذکر مقدار تابع هدف مطابق با جدول ۱۰ محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه مسئله چندهدفه در این مقاله، با استفاده از روش مجموع وزن‌دار شده محاسبه شده است، مقدار بهینه تابع هدف وابسته به مقدار اوزانی است که برای توابع هدف در نظر می‌گیریم. از آنجایی که فرم تابع هدف در مسئله مجموع وزن‌دار شده به صورت $w_1 f_1 + w_2 f_2$ می‌باشد و مجموع اوزان برابر با یک $(\sum w_i = 1)$ است، حالت‌های مختلفی برای ضرایب در نظر گرفته شود در جدول ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده برای تابع هدف مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف به شدت به وزن هدف اول وابسته است. با افزایش در مقدار آن مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد و در مقابل هر چه وزن تابع هدف دوم بیشتر باشد مقدار تابع هدف کمتر است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در حالتی که وزن تابع هدف اول یعنی $w_1 = 0.1$ و وزن تابع هدف دوم یعنی $w_2 = 0.9$

است، مقدار تابع هدف کمترین مقدار را که برابر با $۳۵۹۹۶/۹۸۸$ است را می‌گیرد.

جدول ۷. مقدار sd_{sdt}

Table 7. Value of sd_{sdt}

از - به	دوره ۱			دوره ۲			دوره ۳		
	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
s_1	۰	۰	۰	$۱۸/۴۱$	۰	۰	۰	۰	$۲۷/۳۳$
s_2	۰	۰	$۲۱/۹۸$	۰	$۱۹/۶۰$	۰	۰	۰	$۴/۷۵$

جدول ۸. مقدار im_{imdt}

Table 8. Value of im_{imdt}

از - به	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳
$im_1 \rightarrow d_1$	$۵۵/۸۸۶$	۰	$۴۸/۱۵۰$
$im_1 \rightarrow d_2$	$۵۱/۸۸۶$	۰	$۴۹/۱۵۰$
$im_1 \rightarrow d_3$	۰	۰	۰
$im_2 \rightarrow d_1$	۰	۰	۰
$im_2 \rightarrow d_2$	۰	۰	۰
$im_2 \rightarrow d_3$	$۳۹/۹۰۲$	۰	۰

جدول ۹. مقدار (ds_{dst})

Table 9. Value of (ds_{dst})

از به	دوره ۱	دوره ۲	دوره ۳
$d_1 \rightarrow s_1$	۰	۰	۰
$d_1 \rightarrow s_2$	۰	۰	۰
$d_2 \rightarrow s_1$	۰	۰	۰
$d_2 \rightarrow s_2$	$۱۱۲/۹۶۰$	۰	۰
$d_3 \rightarrow s_1$	$۸۶/۷۶۰$	۰	۰
$d_3 \rightarrow s_2$	$۲۳۴/۱۰۴$	۰	۰

جدول ۱۰. بررسی مقدار تابع هدف به ازای اوزان مختلف

Table 10. Examining the value of the objective function for different weights

ردیف	w_1	w_2	مقدار تابع هدف
۱	۰/۱	۰/۹	$۳۵۹۹۶/۹۸۸$
۲	۰/۲	۰/۸	$۵۷۹۶۹/۷۲۹$
۳	۰/۳	۰/۷	$۷۶۰۱۴/۳۰۹$
۴	۰/۴	۰/۶	$۹۲۴۸۲/۲۳۸$
۵	۰/۵	۰/۵	$۱۰۸۵۷۰/۲۲۰$
۶	۰/۶	۰/۴	$۱۲۸۱۵/۶۸۰$
۷	۰/۷	۰/۳	$۱۳۴۹۹۳/۵۱۸$
۸	۰/۸	۰/۲	$۱۴۸۱۷۱/۳۵۶$
۹	۰/۹	۰/۱	$۱۶۱۳۴۹/۱۹۴$

۴-۱- نتایج حل فراابتکاری

به منظور اجرای مدل فراابتکاری، ابتدا باید پارامترهای مدل را تنظیم نماییم. برای این منظور، از طراحی آزمایشات در الگوریتم NSGA-II استفاده می‌شود. ابتدا برای پارامترهای آن ۳ سطح مختلف (کم با کد ۱، متوسط با کد ۲ و زیاد با کد ۳) تعریف می‌شود. سپس آزمایش‌های از پیش تعریف شده در این الگوریتم به ازای تمام ترکیبات ممکن اجرا می‌شود. مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای این الگوریتم مطابق جدول ۱۱ می‌باشد. سپس با طرح L9 تاگوجی آزمایش‌های مختلف را ایجاد و برای هر کدام الگوریتم NSGA-II اجرا شده است. نتایج اجرا در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۱. پارامترها و سطوح آن‌ها برای الگوریتم NSGA-II

Table 11. Parameters and their levels for the NSGA-II algorithm

پارامتر	مقادیر هر سطح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
Population size (PS)	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
Crossover rate (CR)	۰/۵	۰/۷	۰/۹
Mutation rate (MR)	۰/۲	۰/۳	۰/۵
Maximum iterations (Max_iter)	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰

در این جدول کلیه حالات ممکن به ازای سطوح مختلفی که برای فاکتورهای الگوریتم NSGA-II در نظر گرفته شده است نشان داده شده است. برای مثال در آزمایش اول، کلیه فاکتورهای به ازای کمترین سطح خود در آزمایش شرکت دارند. در آزمایش دوم، فاکتور PS با مقدار کمترین سطح و سایر فاکتورها با مقدار متوسط مربوط به خود حضور دارند.

به همین ترتیب سایر حالت ممکن بر اساس قاعده جایگشت در آمار تکمیل می‌شود. با اجرای هر آزمایش و محاسبه مقدار شاخص MID سطح پاسخ موردنظر با استفاده از این شاخص برآورد می‌شود. حال با ارائه این خروجی‌ها به نرم‌افزار MINITAB نمودار S/N به صورت شکل ۳ ارائه می‌شود. بر اساس مقدار محاسبه شده نسبت سیگنال به نویز به ازای کلیه سطوح در نظر گرفته شده برای هر یک از فاکتورها، هر چه این مقدار برای سطح موردنظر کمتر باشد، مقدار آن سطح برای آن فاکتور انتخاب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده

است، کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای فاکتور PS در زمانی اتفاق می‌افتد که این شاخص در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار دارد؛ بنابراین، مقداری که برای این پارامتر در الگوریتم NSGA-II در نظر می‌گیریم برابر با ۲۰۰ خواهد بود. همچنین، کمترین مقدار نسبت سیگنال به نویز برای شاخص CR مربوط به سطح متوسط با کد ۲ این فاکتور است؛ بنابراین، فاکتور CR با مقدار ۰/۷ در الگوریتم حضور خواهد داشت. علاوه بر این، کمترین مقدار برای فاکتور MR مربوط به زمانی است که این فاکتور در سطح پایین خود با کد ۱ قرار دارد می‌باشد؛ بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۰/۲ حضور خواهد داشت. سرانجام، فاکتور Max_iter کمترین مقدار نسبت به نویز را وقتی دارد که در سطح زیاد خود با کد ۳ قرار داشته باشد؛ بنابراین، این فاکتور در الگوریتم با مقدار ۲۰۰ حضور خواهد داشت. حال بر اساس خروجی ارائه شده در شکل ۳ بهترین مقدار هر پارامتر در جدول ۱۲ مشخص شده است و سایر مثال‌ها با این مقادیر پارامترهای الگوریتم، اجرا می‌شود. در جدول ۱۲ مقدار بهینه پارامترها ارائه شده است.

جدول ۱۲. مقادیر متغیر پاسخ در تکنیک تاگوجی برای NSGA-II

Table 12. Response variable values in Taguchi technique for NSGA-II

شماره اجرا	پارامترهای الگوریتم				شاخص MID
	Max_iter	MR	CR	PS	
۱	۱	۱	۱	۱	۰/۵۳۴
۲	۲	۲	۲	۱	۰/۶۱۲
۳	۳	۳	۳	۱	۰/۵۳۷
۴	۳	۲	۱	۲	۰/۴۹۱
۵	۱	۳	۲	۲	۰/۵۷۶
۶	۲	۱	۳	۲	۰/۶۳۷
۷	۲	۳	۱	۳	۰/۵۹۹
۸	۳	۱	۲	۳	۰/۹۷۳
۹	۱	۲	۳	۳	۰/۶۴۲

۴-۱-۱- مقایسه نتایج قطعی و فراابتکاری

در این بخش از تحقیق برای مقایسه حل قطعی با حل از طریق الگوریتم فراابتکاری آزمایش‌هایی در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ مطابق با جدول ۱۴ در نظر گرفته شده است.

خطای مطلق نسبی از طریق رابطه

$$|mathematical model - metaheuristic model|$$

$$mathematical model$$

جدول ۱۴. ابعاد نمونه‌های عددی

Table 14. Dimensions of numerical samples

ابعاد	نمونه‌ها	i	j	D	t	c	s
کوچک	نمونه ۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
	نمونه ۲	۲	۲	۲	۱	۱	۲
	نمونه ۳	۲	۲	۳	۱	۱	۲
متوسط	نمونه ۴	۲	۳	۳	۱	۱	۳
	نمونه ۵	۳	۳	۳	۲	۲	۳
	نمونه ۶	۳	۳	۴	۲	۲	۳
	نمونه ۷	۴	۴	۴	۲	۲	۳
بزرگ	نمونه ۸	۴	۴	۳	۲	۲	۴
	نمونه ۹	۵	۵	۴	۳	۳	۴
	نمونه ۱۰	۶	۶	۵	۳	۴	۵

محاسبه شده است. این خطای محاسباتی توسط ابوالقاسمیان و همکاران (Abolghasemian et al., 2024) توسعه داده شده است. بر اساس آن می‌توانیم مقدار خطا بین دو سری نتایج را محاسبه نماییم. در صورتی که مقدار خطای محاسباتی بین دو سری داده کمتر از ۰/۰۵ باشد، خطای بین دو سری داده قابل اغماض خواهد بود. بنابراین، در این صورت می‌توانیم به نتایج مدل فراابتکاری در حل مسائل با ابعاد بزرگ اعتماد نماییم. با توجه به اختلاف کم در خطای روش‌های مدل‌سازی ضمن تأیید صحت مدل ریاضی توسعه داده شده، صحت عملکرد و کارایی الگوریتم NSGA-II اثبات می‌شود و می‌توان برای حل مسائل در ابعاد بزرگ نیز به NSGA-II اعتماد کرد.

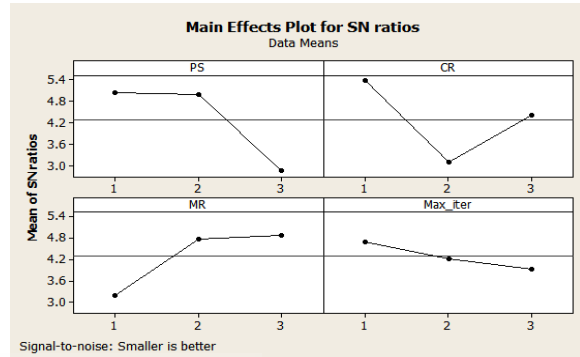
نتایج حل بیانگر آن است که با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله پیچیدگی مسئله از لحاظ محاسباتی افزایش می‌یابد؛ زیرا زمان حل از مسئله‌ای به مسئله دیگر تغییر می‌کند و افزایش پیدا می‌کند. البته مدت‌زمان حل توسط الگوریتم فراابتکاری NSGA-II نسبت به روش قطعی به مراتب کمتر است.

با توجه به نتایج جدول ۱۵ می‌توان برای حل مسائل در ابعاد بزرگ به الگوریتم NSGA-II اعتماد کرد و عملکرد مناسبی را پیش‌بینی کرد.

جدول ۱۳. مقدار بهینه متغیرها در NSGA-II

Table 13. Optimal value of variables in NSGA-II

مقدار بهینه	پارامتر
۲۰۰	Population size (PS)
۰/۷	Crossover rate (CR)
۰/۲	Mutation rate (MR)
۲۰۰	Maximum iterations (Max_iter)



شکل ۳. خروجی مینی تب برای روش تاگوچی در الگوریتم NSGA-II.

Figure 3. Minitab output for Taguchi method in NSGA-II algorithm.

در این جدول ابعاد نمونه‌های عددی نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است ۱۰ نمونه عددی موجود می‌باشد. نمونه‌های ۱ تا ۴ برای ابعاد کوچک و نمونه‌های ۵ تا ۸ مربوط به نمونه‌های متوسط و نمونه‌های ۹ تا ۱۰ مربوط به نمونه‌های بزرگ می‌باشد. طبیعی است هر چه ابعاد مسئله بیشتر شود سختی حل مسئله نیز بیشتر می‌شود. این آزمایش‌ها بر اساس مفروضات اولیه مدل بر اساس میدان‌ها برای تولید مواد اولیه، تصفیه‌کننده‌ها در کارخانه‌های تولیدی، عرضه‌کننده‌ها، مصرف‌کنندگان، دوره‌های زمانی و انبارهای ذخیره‌سازی می‌باشد.

جدول ۱۵ نتایج حل مدل را در سایزهای کوچک، متوسط و بزرگ نشان می‌دهد. چهار نمونه اول مربوط به میانگین جواب‌های مدل در حالت کوچک و چهار نمونه بعدی مربوط به میانگین جواب‌های مدل در سایز متوسط و دو نمونه آخر نیز مربوط به ابعاد بزرگ مسئله می‌باشد. دو نمونه آخر از این جهت در ابعاد بزرگ قرار می‌گیرند چون مدل ریاضی قادر به حل و ارائه پاسخ برای مقدار تابع هدف نمی‌باشد. در جدول ۱۵ نتایج حل دقیق با نتایج روش NSGA-II مقایسه شده است. در ستون خطا، سه

جدول ۱۶. حداکثر ظرفیت میداین

Table 16. Maximum capacity of fields

ظرفیت میداین فعلی $Cap_{current}$		
میدان ۱	میدان ۲	میدان ۳
۳۱۸/۶۰۵	۲۹۱/۵۳۴	۲۰۸/۱۴۷

جدول ۱۷. ظرفیت میداین با اضافه کردن ۱۰۰ واحد

Table 17. Field capacity with the addition of 100 units

ظرفیت میداین فعلی $Cap_{current} + 100$		
میدان ۱	میدان ۲	میدان ۳
۴۱۸/۶۰۵	۳۹۱/۵۳۴	۳۰۸/۱۴۷

جدول ۱۸. ظرفیت میداین با کم کردن ۱۰۰ واحد

Table 18. Field capacity minus 100 units

ظرفیت میداین فعلی $Cap_{current} - 100$		
میدان ۱	میدان ۲	میدان ۳
۲۱۸/۶۰۵	۱۹۱/۵۳۴	۱۰۸/۱۴۷



شکل ۴. تحلیل حساسیت روی ظرفیت میداین و تأثیر

آن روی تابع هدف.

Figure 4. Sensitivity analysis on the capacity of the fields and its impact on the objective function.

پرواضح است در صورت اعمال تغییر روی ظرفیت میداین، بر روی میزان انتقال میعانات و طبعاً بر روی هزینه‌های مربوط به آن‌ها تأثیر می‌گذارد. در این بخش می‌خواهیم حالتی را بررسی کنیم که ظرفیت هر یک از میداین ۱۰۰ واحد زیاد و کم گردد. در این صورت تأثیر این تغییرات را بر روی مقدار تابع هدف بررسی می‌کنیم. در جدول ۱۷ ظرفیت میداین در صورت اضافه کردن ۱۰۰ واحد و در جدول ۱۸ ظرفیت میداین در صورت کم کردن ۱۰۰ واحد نشان داده شده است. در شکل ۲، تأثیر تغییرات در نظر گرفته شده برای ظرفیت میداین نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است در صورت افزایش در میزان ظرفیت، با توجه به قبول تولید محصولات بیشتر

جدول ۱۵. نتایج مقایسه‌ای حل در ابعاد کوچک و

متوسط

Table 15. Comparative results of the solution in small and medium dimensions

نمونه‌ها	اختلاف بین روش قطعی و فراابتکاری
نمونه ۱	۰/۰۱
نمونه ۲	۰/۰۵
نمونه ۳	۰/۰۱
نمونه ۴	۰/۰۲
نمونه ۵	۰/۰۲
نمونه ۶	۰/۰۱
نمونه ۷	۰/۰۱
نمونه ۸	۰/۰۱
نمونه ۹	-
نمونه ۱۰	-

۴-۲- تحلیل حساسیت

در این بخش، با در نظر گرفتن پارامتر تأثیرگذار بر روی مقدار تابع هدف میزان اثر تغییرات آن پارامتر را بر روی تابع هدف بررسی شده است. برای این منظور، پارامتر حداکثر ظرفیت بهره‌برداری میداین‌ها در نظر گرفته شده است. در نظر گرفتن ظرفیت در تحلیل حساسیت تحقیق جاری، به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا محدودیت‌ها را شناسایی کنند، تأثیرات تغییرات را بررسی کنند و بهینه‌سازی منابع را انجام دهند. این امر در نهایت به بهبود عملکرد سیستم و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی کمک می‌کند.

با در نظر گرفتن ظرفیت‌ها، می‌توان استراتژی‌های پایدار و کارآمدی را برای مدیریت زنجیره تأمین طراحی کرد که نه تنها هزینه‌ها را کاهش دهد بلکه به کاهش آلودگی زیست‌محیطی نیز کمک کند. این امر به تحقق اهداف توسعه پایدار کمک می‌کند. علاوه بر این، ظرفیت‌ها به‌عنوان محدودیت‌های کلیدی در زنجیره تأمین عمل می‌کنند. شناخت ظرفیت‌های موجود (مانند ظرفیت تولید، انبارداری و حمل‌ونقل) به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا محدودیت‌های واقعی را در نظر بگیرند و از طراحی مدل‌هایی که غیرقابل اجرا هستند، جلوگیری کنند. حداکثر ظرفیت در نظر گرفته شده برای سه میدان موجود در مسئله مطابق با جدول ۱۶ می‌باشد.

این مقاله که با پوشش اهداف یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی توزیع در صنعت پتروشیمی و پالایشگاهی و همچنین، برنامه‌ریزی تولید و توزیع به‌صورت هم‌زمان به‌منظور تأمین نیازهای فرآورده‌های پتروشیمی دنبال شده است که این کار را با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی انجام‌شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده برای تابع هدف مشاهده می‌شود که مقدار تابع هدف به‌شدت به وزن هدف اول وابسته است. با افزایش در مقدار آن مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد و در مقابل هر چه وزن تابع هدف دوم بیشتر باشد مقدار تابع هدف کمتر است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در حالتی که وزن تابع هدف اول یعنی $w_1 = 0.1$ و وزن تابع هدف دوم یعنی $w_2 = 0.9$ است، مقدار تابع هدف کمترین مقدار را که برابر با $35996/988$ است را می‌گیرد. علاوه بر این، نتایج روش فراابتکاری بیانگر آن است که با بزرگ‌تر شدن ابعاد مسئله پیچیدگی مسئله از لحاظ محاسباتی افزایش می‌یابد. زیرا، زمان حل از مسئله‌ای به مسئله دیگر تغییر می‌کند و افزایش پیدا می‌کند. البته مدت‌زمان حل توسط الگوریتم فراابتکاری NSGA-II نسبت به روش قطعی به‌مراتب کمتر است. بنابراین، برای حل مسائل در ابعاد بزرگ به الگوریتم NSGA-II اعتماد کرد و عملکرد مناسبی را پیش‌بینی کرد.

این تحقیق در مقایسه با تحقیق‌های مشابه مانند (Govindan et al., 2023) و (Jabarzadeh et al., 2020) شباهت‌ها و تفاوت‌هایی دارد. اولاً، هر سه مطالعه یک مدل ریاضی برای زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کرده‌اند. در مطالعه (Jabarzadeh et al., 2020) کمینه کردن انتشار کربن دی‌اکسید و در مطالعه (Govindan et al., 2023) انتشار گازهای گلخانه‌ای وسایل نقلیه مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، تحقیق جاری مانند تحقیق (Govindan et al., 2023) عدم قطعیت در نرخ تقاضا به‌منظور نزدیک‌تر شدن به واقعیت مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق برخلاف مطالعات قبلی که صرفاً به حل قطعی مانند اپسیلون محدودیت استفاده‌شده است، از الگوریتم فراابتکاری نیز استفاده‌شده است. همچنین، میزان آلودگی گازهای گلخانه‌ای به‌طور اختصاصی برای اینکه دقیق‌تر محاسبه شود در یک بخش مانند توزیع محاسبه‌شده است.

هزینه‌های نقل‌وانتقال نیز افزایش می‌یابد. همین‌طور اگر چنانچه ظرفیت را کم نماییم، در حقیقت از پذیرش تولید محصولات بیشتر خودداری می‌شود. ممکن است که در این صورت مطابق با شکل ۴ هزینه‌ها کاهش یابد، اما با توجه به اینکه در این صورت میزان تولیدات کم می‌شود بخشی از فروش محصولات که از طریق صادرات بود را از دست خواهیم داد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به ترکیب دو حوزه تصمیم‌گیری مهم در حوزه محصولات پتروشیمی یعنی برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی توزیع پرداخته‌شده است. در این راستا، این نکته حائز اهمیت است که تصمیمات حوزه برنامه‌ریزی تولید بر روی برنامه‌ریزی توزیع تأثیر مستقیم دارد.

چنانچه محصولات طبق زمان‌بندی اصولی آماده و فراهم نشود، واحد توزیع نیز نمی‌تواند نیازهای مشتریان را در موعد مقرر تحویل نماید. به همین دلیل، لازم و ضروری است تا برنامه‌ریزی تولید و برنامه‌ریزی توزیع به‌صورت یکپارچه مورد مطالعه قرار گیرد. در این راستا، ابتدا یک مدل ریاضی به‌منظور بهینه‌سازی متغیرهای تصمیم تولید و توزیع ارائه می‌شود؛ بنابراین، با اجرای دقیق این تحقیق قادر خواهیم بود تا بهبود همکاری بین سازمان‌های زنجیره تأمین در صنعت پتروشیمی دست‌یابیم و منجر به افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد زیست‌محیطی شود. برای مثال، ایجاد پلتفرم‌های دیجیتال و سیستم‌های اطلاعاتی مشترک که به‌تمامی ذینفعان زنجیره تأمین امکان دسترسی به داده‌ها و اطلاعات مرتبط را بدهد، می‌تواند به بهبود ارتباطات و هماهنگی کمک کند. ایجاد قراردادهای همکاری که شامل اهداف مشترک، مسئولیت‌ها و تعهدات هر سازمان باشد، می‌تواند به ایجاد انگیزه برای همکاری و کاهش تنش‌ها کمک کند. شناسایی و تعیین اهداف مشترک برای تمامی ذینفعان زنجیره تأمین، مانند کاهش هزینه‌ها، بهبود کیفیت و کاهش آلودگی، می‌تواند به ایجاد انگیزه برای همکاری بیشتر کمک کند. با اجرای این راهکارها، سازمان‌های زنجیره تأمین در صنعت پتروشیمی می‌توانند همکاری‌های خود را بهبود بخشند و به نتایج بهتری در زمینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی دست یابند.

- Bahrami, M. R., Hashemzadeh, G. R., Shahmansoury, A., & Fathi Hafshejani, K. (2025). Analyzing effective components in Industry 4.0 maturity for Iranian banking. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 21–50. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2047848.1246> (In Persian)
- Centobelli, P., Cerchione, R., Del Vecchio, P., Oropallo, E., & Secundo, G. (2022). Blockchain technology for bridging trust, traceability and transparency in circular supply chain. *Information & Management*, 59(7), Article 103508. <https://doi.org/10.1016/j.im.2021.103508>
- De Angelis, R., Howard, M., & Miemczyk, J. (2018). Supply chain management and the circular economy: Towards the circular supply chain. *Production Planning & Control*, 29(6), 425–437. <https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1449244>
- Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisinigh, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 882–900. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.303>
- González-Sánchez, R., Settembre-Blundo, D., Ferrari, A. M., & García-Muiña, F. E. (2020). Main dimensions in the building of the circular supply chain: A literature review. *Sustainability*, 12(6), Article 2459. <https://doi.org/10.3390/su12062459>
- Govindan, K., Salehian, F., Kian, H., Hosseini, S. T., & Mina, H. (2023). A location-inventory-routing problem to design a circular closed-loop supply chain network with carbon tax policy for achieving circular economy: An augmented epsilon-constraint approach. *International Journal of Production Economics*, 257, Article 108771. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108771>
- Hejazi, A. (2025). Analysis of the substantive factors in strategic knowledge management within the domain of higher education development. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 155–178. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2033665.1217> (In Persian)
- Iji, Z., Maleki, M. R., & Eghbali, H. (2025). Double sampling-based ridge penalized likelihood ratio control charting scheme for detecting the covariance matrix disturbances. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 51–64. <https://doi.org/10.22034/sep.2025.2046743.1238> (In Persian)
- Jabarzadeh, Y., Reyhani Yamchi, H., Kumar, V., & Ghaffarinasab, N. (2020). A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 29(1), 1–15. <https://doi.org/10.1108/MSAR-01-2022-0003>
- بسیاری از شرکت‌های پتروشیمی ممکن است به دلیل محرمانگی، داده‌های مربوط به تولید و توزیع را به‌درستی در دسترس قرار ندهند. این موضوع می‌تواند منجر به نادرستی و عدم دقت در داده‌های ورودی مدل شود. همچنین، برای تحقیقات بیشتر توصیه می‌شود که برای توسعه مدل پیشنهادی میزان انتشار آلودگی در مراکز تولیدکننده نیز در کنار مراکز توزیع در نظر گرفته شود. همچنین، نوع آلودگی برحسب جامدات، مایعات و گازها قادر می‌سازد که کدام‌یک از پسماندها تأثیر بیشتری بر روی انتشار آلودگی دارند. علاوه‌براین، اعمال جنبه اجتماعی مانند اشتغال و سلامت کارکنان برای توسعه مدل و تحقیقات آتی می‌تواند موردتوجه قرار بگیرد. سرانجام، برای برآورد عدم قطعیت علاوه بر نرخ تقاضا، هزینه و ظرفیت را نیز موردبررسی قرار داد.

مشارکت‌های نویسندگان

همه نویسندگان در مقاله نقش و سهم یکسان داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع مرتبط با تحقیق حاضر ندارند و نتایج به‌صورت بی‌طرفانه و بدون دخالت منافع شخصی یا حرفه‌ای به‌دست‌آمده است.

قدردانی

نویسندگان از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری و همچنین داوران محترم که کیفیت این مقاله را افزایش دادند، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- Abolghasemian, M., Kheiri, A. O., & Saberifard, N. (2024). Prioritizing factors affecting the flexibility and performance of the digital supply chain system in the Iranian food industry. *System Engineering and Productivity*, 4(1), 41–57. <https://doi.org/10.22034/msb.2024.2025240.1194> (In Persian)
- Alghababsheh, M., & Gallear, D. (2022). Social sustainability in the supply chain: A literature review of the adoption, approaches and (un)intended outcomes. *Management & Sustainability: An Arab Review*, 1(1), 84–109. <https://doi.org/10.1108/MSAR-01-2022-0003>

- fast fashion. *Computers in Industry*, 123, Article 103324.
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103324>
- Yang, M., Smart, P., Kumar, M., Jolly, M., & Evans, S. (2018). Product-service systems business models for circular supply chains. *Production Planning & Control*, 29(6), 498–508.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2018.1449247>
- Zhang, A., Wang, J. X., Farooque, M., Wang, Y., & Choi, T.-M. (2021). Multi-dimensional circular supply chain management: A comparative review of the state-of-the-art practices and research. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 155, Article 102509.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102509>
- International Journal*, 31(5), 1351–1373.
<https://doi.org/10.1108/MEQ-12-2019-0276>
- Khandelwal, C., & Barua, M. K. (2024). Prioritizing circular supply chain management barriers using fuzzy AHP: case of the Indian plastic industry. *Global Business Review*, 25(1), 232–251.
<https://doi.org/10.1177/0972150920948818>
- Lahane, S., & Kant, R. (2021). Evaluation and ranking of solutions to mitigate circular supply chain risks. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 753–773.
<https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.034>
- Larsen, S. B., Knudby, T., van Wouwerghem, J., & Jacobsen, P. (2017). On the circular supply chain's impact on revenue growth for manufacturers of assembled industrial products—A conceptual development approach. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 1965–1969). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8290235>
- Malekpour Kolbadinejad, S., & Bagherinejad, J. (2023). Presenting a dual-objective location-inventory model for designing an integrated forward/reverse logistics network. *System Engineering and Productivity*, 3(1), 1–40.
<https://doi.org/10.22034/sep.2023.706141> (In Persian)
- Mozafari, M., & Savari, J. (2025). Designing a green closed-loop supply chain network for pharmaceutical products using cuckoo search algorithm. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 135–153.
<https://doi.org/10.22034/sep.2025.2050452.1248> (In Persian)
- Rabbani, M., Saravi, N. A., Farrokhi-Asl, H., Lim, S. F. W., & Tahaei, Z. (2018). Developing a sustainable supply chain optimization model for switchgrass-based bioenergy production: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 200, 827–843.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.226>
- Rezaei Kallaj, M., Abolghasemian, M., Moradi Pirbalouti, S., Sabk Ara, M., & Pourghader Chobar, A. (2021). Vehicle routing problem in relief supply under a crisis condition considering blood types. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, Article 7217182.
<https://doi.org/10.1155/2021/7217182>
- Safaie, N., Heidari Soochelmai, Y., & Mirzaee Ghazani, M. (2025). A data-driven hybrid approach for examining the factors influencing the price of EUA during Phase IV of the EU ETS. *System Engineering and Productivity*, 5(1), 113–134.
<https://doi.org/10.22034/sep.2025.2050780.1253> (In Persian)
- Wang, B., Luo, W., Zhang, A., Tian, Z., & Li, Z. (2020). Blockchain-enabled circular supply chain management: A system architecture for