

Robust Optimization of Pharmaceutical Logistics Network under Disaster Considering Reliability

Hamid Moakedi ^{1*}, Fatemeh Ghasemizadeh ²

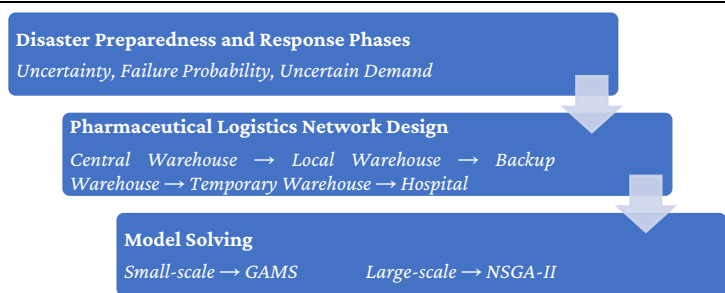
¹ Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, College of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

² M.Sc., Department of Industrial Engineering, College of Farabi, University of Tehran, Tehran, Iran

HIGHLIGHTS

- The pharmaceutical logistics network is designed in disaster preparedness and response phases.
- Reliability is modeled by considering the failure probability of warehouses and routes.
- The model is solved for large-scale problems using the NSGA-II algorithm.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 28 April 2026

Revised: 13 June 2026

Accepted: 23 June 2026

Available online: 23 June 2026

*Correspondence: moakedi@qut.ac.ir

How to cite this article:

Moakedi, H., & Ghasemizadeh, F. (2026). Robust optimization of pharmaceutical logistics network under disaster considering reliability. *System Engineering and Productivity*, 6 (4), 181-222.

Keywords:

Pharmaceutical Logistics
Backup and Temporary Warehouse
Robust Optimization
Reliability
Disaster Management

ABSTRACT

In this paper, an integer linear programming model is proposed for designing a pharmaceutical logistics network in two phases of disaster preparedness and response. In the preparedness phase, strategic decisions including location of central, local, and backup warehouses, capacity determination, perishable drug inventory management, and fleet allocation are made. In the response phase, temporary warehouses are activated considering the probability of route failures, and routing and distribution are performed dynamically over multiple periods. The proposed model pursues three objectives: minimizing service time, minimizing facility costs, and maximizing supply chain reliability. A scenario-based robust optimization approach is applied to model uncertainties in parameters such as demand and route statuses. The results show that the model is capable of fully allocating central warehouse inventory and preventing shortages under the highest demand scenario. The high allocation of fleet to the backup warehouse demonstrates the central role of this facility in network resilience. Sensitivity analysis also indicates that investment in warehouse fortification not only increases reliability but also significantly reduces drug purchasing and holding costs. Due to the NP-hard nature of the problem, the model is solved using GAMS for small-scale problems and the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) for large-scale problems. Comparison of results shows that the metaheuristic algorithm provides acceptable quality Pareto solutions in dimensions where the exact method fails to solve. Conducting a real case study with actual data is suggested as an essential step for future research.

1. Introduction

Natural disasters and man-made crises cause extensive human and financial losses annually. In such situations, one of the most critical components of disaster management is humanitarian logistics, particularly the pharmaceutical supply chain, which is of special complexity due to drug perishability and direct dependence on human life (Caunhye et al., 2012; Boonmee et al., 2017).

Despite extensive research in disaster logistics, a systematic literature review reveals seven gaps in previous studies: limited network layers, insufficient attention to warehouse and route reliability, lack of perishable drug inventory management, rare simultaneous consideration of preparedness and response phases, absence of integrated location-routing-inventory models, lack of multi-period dynamic routing, and limited use of multiple vehicle and product types.

In recent years, sustainable supply chain design for perishable products has been addressed by several studies (Abbasian et al., 2023; Chan et al., 2020; Foroozesh et al., 2022; Liu et al., 2021). However, few studies have simultaneously addressed backup/temporary warehouse location, reliability modeling through failure probability, and robust optimization in pharmaceutical logistics under crisis conditions. This gap constitutes the main motivation for the present study.

This paper presents an integrated mathematical model for a pharmaceutical logistics network in two phases of preparedness and response. In the preparedness phase, strategic decisions are made for locating central, local, and backup warehouses, capacity determination, perishable drug inventory management, and fleet allocation. In the response phase, temporary warehouses are activated considering route failure probability, with multi-period dynamic routing under uncertainty. The model pursues three objectives: minimizing service time and facility costs, and maximizing supply chain reliability.

The novelty is threefold: (1) introducing a four-level warehousing system (central, local, backup, temporary) for pharmaceutical logistics in disaster management; (2) incorporating reliability modeling through failure probability of warehouses and routes; and (3) employing robust scenario-based optimization combined with GAMS for small-scale and NSGA-II for large-scale problems.

The primary objective of this paper is to introduce and validate a robust optimization framework for pharmaceutical logistics based on parameters and scenarios aligned with real-world conditions, drawn from authentic sources (Mete & Zabinsky, 2010; Rezaei-Malek et al., 2016a; Rezaei-Malek, et al., 2016b). This approach enables controlled sensitivity analysis and rigorous performance comparison across different problem scales. A real-world case study is proposed as a direction for future research.

2. Methodology

This research is applied in terms of purpose and descriptive-survey in terms of data collection. The research was conducted in three main phases.

2.1. Phase 1: Problem Definition and Assumptions

The studied logistics network includes location, routing, and distribution of relief items considering several objectives. This supply chain addresses the supply of drugs needed at the time of a crisis. The logistics network consists of five components: hospitals (demand points), central warehouse (stores both drug types A and B), local warehouses (store only drug type B), backup warehouses (closest local warehouse to each hospital), and temporary warehouses (activated in scenarios where local and backup warehouses are damaged). Twenty-one assumptions were considered in model development, including discrete solution space, no partial delivery, heterogeneous fleet, different warehouse capacities (three levels), multi-product nature, different failure probabilities for warehouses and routes, perishable drug inventory management, and multi-period dynamic routing.

2.2. Phase 2: Mathematical Model

The proposed mathematical model is formulated as a multi-objective integer linear programming model. The three objective functions are: (1) minimizing transportation time between local warehouses and hospitals, (2) maximizing the reliability of activated warehouses, and (3) minimizing total supply chain costs including fixed costs of activating local warehouses, capacity determination costs, shortage costs before and after the crisis, holding costs of surplus drugs, purchase costs, and fixed and variable fleet costs minus revenue from selling drugs before expiration. Constraints include allocation and coverage constraints, inventory and capacity management constraints, routing and flow constraints, and multi-period dynamics constraints. Due to uncertainty in demand, warehouse status, and route accessibility, a scenario-based robust optimization approach (Mulvey et al., 1995) was employed. The three objectives are combined into a single objective using the weighted sum method with normalization.

2.3. Phase 3: Solution Methods

Due to the NP-hard nature of the problem (Cheng et al., 2016), two solution approaches are adopted. For small-scale problems, the model is solved exactly using GAMS software (CPLEX solver). For large-scale problems, the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) (Deb et al., 2002) is developed and implemented. To justify the selection of NSGA-II, it was compared with MOPSO and SPEA2; results showed that NSGA-II offers the best computational time and stability (Shahrabadi et al., 2024; Wang et al., 2023). The NSGA-II chromosome consists of four

parts: matrix A (assignment of local, backup, and temporary warehouses to hospitals and routing), matrix B (allocation of vehicles from central warehouse to local warehouses), matrix C (capacity level assignment to warehouses), and matrix D (number of vehicles allocated to each warehouse). The algorithm parameters were calibrated using the relative percentage deviation (PRD) criterion, with optimal crossover probability of 0.9 and mutation probability of 0.3.

3. Results and Discussion

The numerical example consists of one central warehouse (index 1), 5 potential warehouse locations (indices 2 to 6), and 3 hospitals (indices 7, 8, and 9). The number of pre-crisis periods is 4 and the number of post-crisis periods is 2. One type A drug and one type B drug are considered, with a maximum shelf life of 4 periods. The problem is solved under three different scenarios with occurrence probabilities of 0.36, 0.4, and 0.24.

3.1. Results of Exact Method (GAMS)

Among the 5 potential locations, warehouses 2, 3, and 4 are activated in the optimal solution. The allocation of local, backup, and temporary warehouses to hospitals satisfies the coverage radius constraints. The three objective function values across scenarios show that the robust model maintains stability against demand fluctuations.

3.2. Results of Metaheuristic Method (NSGA-II)

The NSGA-II parameters were first calibrated using the PRD criterion. The proposed algorithm was tested on 10 sample problems of varying sizes (small, medium, and large). Table 1 presents the computational results comparing GAMS and NSGA-II.

The results demonstrate that the exact method extracts Pareto solutions only for small-scale problems (Problems 1-3). As problem dimensions increase, the exact method fails to find solutions within the predetermined time of 20,000 seconds. In contrast, the NSGA-II algorithm successfully extracts acceptable quality solutions for medium and large-scale problems. However, for very large dimensions (Problem 10 with 40 potential warehouse locations and 60 hospitals), memory limitations prevent both methods from solving the problem.

3.3. Sensitivity Analysis

A sensitivity analysis was conducted on the drug survival rate parameter (the percentage of drugs remaining usable in warehouses after a disaster) across five levels: +50%, +25%, base case, -25%, and -50%. The results show that as warehouse reliability increases, pre-crisis inventory levels and purchasing costs decrease significantly. Additionally, the capacity strategy shifts from three large-capacity warehouses to four medium-capacity warehouses,

indicating that higher reliability allows for more dispersed inventory placement, which reduces transportation costs and improves geographic coverage. Notably, drug delivery to hospitals remains constant across all scenarios, confirming that the model prioritizes shortage prevention over inventory reduction.

4. Conclusion

This study presented an integrated mathematical model for designing a pharmaceutical logistics network in two phases of disaster preparedness and response, pursuing three objectives: minimizing service time and costs, and maximizing reliability. A scenario-based robust optimization approach was applied to handle uncertainties. Due to the NP-hard nature, the model is solved using GAMS for small-scale and NSGA-II for large-scale problems. The main findings, implications, and future research directions are summarized as follows.

4.1. Key Findings

Implementation on a numerical example with 5 potential locations and 3 hospitals showed that warehouses 2, 3, and 4 were activated as local, backup, and temporary warehouses, respectively. Under the highest demand scenario, central warehouse inventory reached zero. The total allocated vehicles are 16, with the backup warehouse (warehouse 3) receiving the largest share among local warehouses (6 vehicles). Sensitivity analysis revealed that a 50% increase in the drug survival rate reduces pre-crisis inventory by approximately 26% and shifts the capacity strategy from three large warehouses to four medium ones.

4.2. Theoretical and Practical Implications

The main theoretical contribution is the introduction of a four-level warehousing system (central, local, backup, temporary) combined with reliability modeling and robust optimization. Practically, managers can use this framework to determine optimal warehouse locations, capacity levels, and fleet allocation, while the sensitivity analysis demonstrates that investing in warehouse fortification enhances both reliability and cost efficiency.

4.3. Limitations and Future Research

Despite comprehensive validation based on real data from authentic sources, the model has not yet been calibrated with actual data from a specific disaster-prone region. Therefore, a real case study, as suggested by the reviewer, (e.g., for earthquake-prone provinces such as Kermanshah or East Azerbaijan, or flood-prone provinces such as Golestan or Khuzestan) is proposed as an essential future direction. Other future directions include developing hybrid metaheuristic algorithms, designing decomposition methods for very large-

scale problems, and incorporating sustainability objectives.

Acknowledgments

The authors sincerely thank the Editor-in-Chief, the anonymous reviewers, and the editorial staff for their constructive feedback and timely handling of the manuscript.

Funding

This research received no external funding.

Author contributions

Hamid Moakedi: Drafting the manuscript, Preliminary review of the report, Literature review and theoretical background, Data analysis, Text revision, Supervision; **Fatemeh Ghasemizadeh:** Research methodology development, Conceptual research model, Statistical analysis draft, Text revision.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Abbasian, M., Sazvar, Z., & Mohammadisiahroudi, M. (2023). A hybrid optimization method to design a sustainable resilient supply chain in a perishable food industry. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(3), 6080-6103. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22115-8>
- Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. *International journal of disaster risk reduction*, 24, 485-498. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.01.017>
- Caunhye, A. M., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 4-13. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004>
- Chan, F. T., Wang, Z., Goswami, A., Singhania, A., & Tiwari, M. K. (2020). Multi-objective particle swarm optimisation based integrated production inventory routing planning for efficient perishable food logistics operations. *International Journal of Production Research*, 58(17), 5155-5174. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1701209>
- Cheng, C., Qi, M., Wang, X., & Zhang, Y. (2016). Multi-period inventory routing problem under carbon emission regulations. *International Journal of Production Economics*, 182, 263-275. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.09.001>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Foroozesh, N., Karimi, B., & Mousavi, S. M. (2022). Green-resilient supply chain network design for perishable products considering route risk and horizontal collaboration under robust interval-valued type-2 fuzzy uncertainty: A case study in food industry. *Journal of Environmental Management*, 307, 114470. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114470>
- Liu, A., Zhu, Q., Xu, L., Lu, Q., & Fan, Y. (2021). Sustainable supply chain management for perishable products in emerging markets: An integrated location-inventory-routing model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 150, 102319. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102319>
- Mete, H. O., & Zabinsky, Z. B. (2010). Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International journal of production economics*, 126(1), 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.10.004>
- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*, 43(2), 264-281. <https://doi.org/10.1287/opre.43.2.264>
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Cheikhrouhou, N., & Taheri-Moghaddam, A. (2016a). An approximation approach to a trade-off among efficiency, efficacy, and balance for relief pre-positioning in disaster management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 485-509. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.07.003>
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Bozorgi-Amiri, A. (2016b). An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities. *Computers & industrial engineering*, 94, 201-215. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.014>
- Shahrabadi, F., Kia, H., Heidari, A., & Khalilzadeh, M. (2024). A Fuzzy Bi-objective Mathematical Model for Perishable Medical Goods Supply Chain Network Considering Crisis Situations: An Empirical Study. *Health Services Insights*, 17, 11786329241288772. <https://doi.org/10.1177/11786329241288772>
- Wang, F., Ge, X., Li, Y., Zheng, J., & Zheng, W. (2023). Optimising the distribution of multi-cycle emergency supplies after a disaster.

Sustainability, 15(2), 902.
<https://doi.org/10.3390/su15020902>

Table 1. Comparison of exact and metaheuristic methods

Problem	Scale	GAMS Time (s)	GAMS Objective	NSGA-II Time (s)	NSGA-II Objective
1	Small	285	0.85	150	0.87
2	Small	357	0.76	219	0.79
3	Small	7,864	0.72	1,128	0.75
4	Medium	20,000	0.80	1,988	0.73
5-9	Medium-Large	Not solved	-	6,842-19,167	Acceptable
10	Very Large	Not solved	-	Not solved	-

بهینه‌سازی استوار شبکه لجستیک دارو در شرایط بحران با رویکرد قابلیت اطمینان

حمید مؤکدی^۱، فاطمه قاسمی‌زاده^۲، *^۱، ^۲ 

^۱ استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران
^۲ کارشناس ارشد، گروه مهندسی صنایع، پردیس فارابی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

برجسته‌ها

- شبکه لجستیک دارو در دو فاز آمادگی و واکنش بحران طراحی شده است.
- قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن احتمال خرابی انبارها و مسیرها مدلسازی شده است.
- مدل در ابعاد بزرگ با الگوریتم NSGA-II حل شده است.

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۸
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۳
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲
ارائه برخط: ۱۴۰۵/۰۴/۰۲
*نویسنده مسئول:

moakedi@qut.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

لجستیک دارو
انبار پشتیبان و موقت
بهینه‌سازی استوار
قابلیت اطمینان
مدیریت بحران

چکیده

در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای طراحی شبکه لجستیک دارو در دو فاز آمادگی و واکنش بحران ارائه می‌شود. در فاز آمادگی، تصمیمات مکان‌یابی انبارهای مرکزی، محلی و پشتیبان، تعیین ظرفیت، مدیریت موجودی داروهای فسادپذیر و تخصیص ناوگان اتخاذ می‌گردد. در فاز واکنش، با توجه به احتمال خرابی مسیرها، انبارهای موقت فعال شده و مسیریابی و توزیع به صورت پویا و چنددوره‌ای انجام می‌شود. مدل پیشنهادی سه هدف کاهش زمان خدمت‌رسانی، کاهش هزینه‌های تسهیلات و افزایش قابلیت اطمینان زنجیره را دنبال می‌کند. برای مدلسازی عدم قطعیت در پارامترهایی نظیر تقاضا و وضعیت مسیرها، از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل قادر است در شرایط بحرانی با بیشترین سطح تقاضا، موجودی انبار مرکزی را به طور کامل تخصیص داده و از بروز کمبود جلوگیری کند. تخصیص بالای ناوگان به انبار پشتیبان، نقش محوری این تسهیلات در تاب‌آوری شبکه را نشان می‌دهد. تحلیل حساسیت نیز حاکی از آن است که سرمایه‌گذاری در مقاوم‌سازی انبارها نه تنها قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌های خرید و نگهداری دارو را نیز به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. با توجه به NP-hard بودن مسئله، مدل در ابعاد کوچک با نرم‌افزار گمز و در ابعاد بزرگ با الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II) حل شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد الگوریتم فراابتکاری در ابعادی که روش دقیق قادر به حل نیست، جواب‌های پارتویی با کیفیت قابل قبول ارائه می‌دهد. انجام مطالعه موردی با داده‌های واقعی به عنوان گامی ضروری برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد.

۱- مقدمه

همه ساله حوادث طبیعی نظیر زلزله، سیل، لغزش زمین و طوفان و نیز رویدادهای انسان ساخت همچون جنگ، عملیات تروریستی و رهاسازی مواد شیمیایی، تلفات و آسیب‌های مالی سنگینی به جوامع وارد می‌آورند. در مواجهه با چنین وضعیت‌هایی، لجستیک امداد به عنوان یکی از ارکان اساسی مدیریت بحران شناخته می‌شود. فرآیندهایی نظیر برآورد نیازها، تهیه و تأمین اقلام، جابجایی، انبارش و توزیع کالاها، تجهیزات و خدمات در میان افراد آسیب‌دیده و تیم‌های امدادی، همگی تحت پوشش لجستیک بحران قرار می‌گیرند. شرط اساسی موفقیت این فرآیندها، رساندن به موقع اقلام به مقصد و در محل‌های تعیین‌شده و به میزان کافی است (Caunhye et al., 2012). در این میان، زنجیره تأمین دارو به دلیل فسادپذیری اقلام، حساسیت بالا و وابستگی مستقیم جان انسان‌ها به آن، از پیچیدگی و اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

چارچوب مدیریت بحران عمدتاً شامل چهار مرحله پیشگیری، آمادگی، واکنش و بازسازی است. در مرحله آمادگی، اقداماتی نظیر گردآوری اطلاعات، آموزش نیروها، پژوهش، برنامه‌ریزی، ایجاد ساختارهای مدیریتی و تأمین منابع انجام می‌شود. مرحله واکنش نیز پس از وقوع بحران آغاز شده و شامل ارائه خدمات فوری برای حفاظت از دارایی‌ها و جلوگیری از گسترش خسارت است. طراحی یک شبکه لجستیک کارآمد نیازمند تلفیق این دو فاز و اتخاذ تصمیمات یکپارچه در سطوح استراتژیک، تاکتیکال و عملیاتی می‌باشد.

تاکنون پژوهش‌های متعددی در زمینه لجستیک امداد انجام شده است. در حوزه مکان‌یابی تسهیلات، مطالعاتی از جمله (Toiregas et al., 1971; Boonmee et al., 2017) به پوشش نقاط تقاضا توسط تسهیلات امدادی پرداخته‌اند. در زمینه مسیریابی و توزیع، (Rivera-Royero et al., 2016) مدلی پویا برای خدمت‌رسانی با در نظر گرفتن اولویت تقاضا، (Lu et al., 2016) مدلی مبتنی بر افق نورد برای توزیع اقلام امدادی در زمان مناسب، و (Klibi et al., 2018) مطالعه‌ای در زمینه آمادگی تأمین کالا در شرایط بحرانی ارائه کرده‌اند. در مطالعات

(Hasanzadeh & Bashiri, 2016; Tofighi et al., 2016)

نیز به طراحی شبکه لجستیک در دو فاز آمادگی و واکنش پرداخته شده است. با وجود این تحقیقات گسترده، مرور نظام‌مند ادبیات موضوع نشان می‌دهد که شکاف‌های زیر در پژوهش‌های پیشین وجود دارد:

- ۱) اغلب پژوهش‌های پیشین از لایه‌های محدودی در شبکه لجستیک امداد بهره گرفته‌اند، در حالی که مدل‌سازی یکپارچه و جامع تمام لایه‌ها، تطابق بیشتری با شرایط واقعی خواهد داشت.
- ۲) مسئله قابلیت اطمینان انبارها و مسیرهای ارتباطی از طریق در نظر گرفتن احتمال خرابی، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است.
- ۳) مطالعات کمی به مدیریت موجودی داروهای فسادپذیر در شرایط بحرانی پرداخته‌اند.
- ۴) تلفیق همزمان دو فاز آمادگی و واکنش در مقالات محدودی دیده می‌شود.
- ۵) به ندرت مدلی ارائه شده که تصمیمات مکان‌یابی، مسیریابی، توزیع و کنترل موجودی را به طور همزمان پوشش دهد.
- ۶) برنامه‌ریزی و مسیریابی پویا و چنددوره‌ای با توجه به تغییر شرایط جاده و تقاضا، کمتر مورد توجه واقع شده است.
- ۷) استفاده از همزمان انواع مختلف وسایل نقلیه و کالاهای گوناگون در مدل‌های پیشین محدود بوده است.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین پایدار برای محصولات فسادپذیر با رویکردهای بهینه‌سازی چندهدفه پرداخته‌اند (Chan et al., 2020; Abbasian et al., 2023). با وجود این پیشرفت‌ها، مرور ادبیات نشان می‌دهد که مطالعات اندکی به طور همزمان به مکان‌یابی انبارهای پشتیبان و موقت، مدل‌سازی قابلیت اطمینان از طریق احتمال خرابی انبارها و مسیرها، و بهینه‌سازی استوار در شبکه لجستیک دارو در شرایط بحران پرداخته‌اند. این شکاف تحقیقاتی انگیزه اصلی پژوهش حاضر را تشکیل می‌دهد.

۲) چگونه می‌توان موجودی داروهای فسادپذیر را قبل از بحران مدیریت کرد تا هم از کمبود و هم از فساد و انقضای داروها جلوگیری شود؟

۳) مسیریابی و توزیع داروها در شرایط عدم قطعیت مسیرها و تقاضا، به صورت چنددوره‌ای و پویا چگونه باید انجام شود؟

با توجه به ماهیت ترکیبی مسئله که مشتمل بر تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص، مسیریابی و مدیریت موجودی است، مدل پیشنهادی در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرد (Cheng et al., 2016). بدین‌جهت، در این پژوهش برای ابعاد کوچک از روش حل دقیق (نرم‌افزار گمز) و برای ابعاد بزرگ از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که هدف اصلی این مقاله، ارائه و اعتبارسنجی یک چارچوب جدید بهینه‌سازی استوار برای لجستیک دارو است. به همین منظور، آزمایش‌های محاسباتی بر اساس پارامترها و سناریوهای منطبق با شرایط واقعی برگرفته از منابع معتبر (Rezaei-Malek et al., 2016a؛ Mete & Zabinsky, 2010؛ Rezaei-Malek et al., 2016b) انجام شده تا امکان ارزیابی روش در ابعاد مختلف فراهم شود. مطالعه موردی با داده‌های واقعی نیز ارزشمند و ضروری است، اما به دلیل نیاز به داده‌های گسترده و هماهنگی با نهادهای مختلف، به عنوان یک جهت مستقل برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

۲- مبانی نظری پژوهش

در این بخش، مفاهیم پایه و پیشینه تحقیقات انجام‌شده در حوزه‌ی لجستیک بحران، مکان‌یابی تسهیلات امدادی، مسیریابی و توزیع اقلام امدادی، و همچنین مدل‌های دو فاز را ارائه می‌گردد. همچنین شکاف‌های تحقیقاتی با جزئیات بیشتر تبیین شده و جایگاه پژوهش حاضر در میان مطالعات پیشین مشخص می‌شود.

۲-۱- لجستیک بحران

بر اساس تعاریف ارائه شده در ادبیات، بحران‌ها به دو نوع کلی طبیعی و انسان‌ساخت تقسیم می‌شوند. بلایای طبیعی همچون زلزله، سیل، رانش زمین و توفان ناشی از اختلال در رابطه انسان و محیط زیست هستند. در مقابل،

پژوهش حاضر با هدف تدوین یک مدل ریاضی جامع برای شبکه لجستیک داروهای فسادپذیر، در دو مرحله آمادگی و واکنش به بحران انجام شده است. در فاز آمادگی، با توجه به احتمال خرابی انبارها، تصمیمات استراتژیک برای مکان‌یابی انبارهای مرکزی، محلی و پشتیبان به منظور نگهداری دو نوع دارو اخذ می‌شود. همچنین ظرفیت هر انبار (در سه سطح کوچک، متوسط و بزرگ) و اندازه و نوع ناوگان حمل‌ونقل برای هر انبار تعیین می‌گردد. در این فاز، تصمیمات تاکتیکال برای کنترل موجودی دارو به عنوان ماده فسادپذیر نیز اتخاذ می‌شود. کنترل فاز واکنش با وقوع بحران آغاز می‌شود که با توجه به احتمال خرابی مسیرها، تصمیمات عملیاتی برای فعالسازی انبارهای موقت گرفته می‌شود. همچنین برنامه‌ریزی توزیع و مسیریابی چنددوره‌ای و پویا تحت شرایط عدم قطعیت انجام می‌شود.

مدل پیشنهادی سه هدف مجزا را دنبال می‌کند: (۱) کاهش زمان خدمت‌رسانی، (۲) کاهش هزینه‌های تسهیلات، و (۳) افزایش قابلیت اطمینان زنجیره تأمین با فعالسازی تسهیلاتی که احتمال خرابی کمتری دارند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت در پارامترهایی نظیر تقاضا، وضعیت انبارها و دسترسی به مسیرها، از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده می‌شود.

در واقع، این پژوهش با اتخاذ رویکرد مهندسی سیستم‌ها و تفکر سیستمی، به طراحی یکپارچه شبکه لجستیک دارو در دو فاز آمادگی و واکنش بحران می‌پردازد. با مدل‌سازی احتمال خرابی انبارها و مسیرهای ارتباطی و لحاظ کردن پیشینه‌سازی قابلیت اطمینان به عنوان یکی از توابع هدف، مطالعه حاضر در حوزه مدیریت ریسک و قابلیت اطمینان شبکه قابل تعریف است. همچنین، استفاده از بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو برای مواجهه با عدم قطعیت‌های تقاضا، وضعیت تسهیلات و دسترسی به مسیرها، و نیز حل مدل سه‌هدفه با روش مجموع وزنی، پژوهش حاضر را در زمره سیستم‌های تصمیم‌گیری چندهدفه قرار می‌دهد. بر این اساس، سوالات پژوهش حاضر عبارتند از:

(۱) مکان بهینه انبارهای محلی، پشتیبان و موقت با در نظر گرفتن شعاع پوشش، فاصله، امنیت و هزینه چگونه تعیین می‌شود؟

کالاها به نقاط تقاضا در زمان بحران است (Rezaei-Malek et al., 2016b).

۲-۲- مکان‌یابی تسهیلات در لجستیک امداد

در حوزه لجستیک امداد، مسئله مکان‌یابی تسهیلات به بررسی ابعاد مکانی با در نظر گرفتن معیارهایی همچون هزینه، سرعت واکنش و توزیع عادلانه خدمات می‌پردازد. این موضوع در مرحله پیش‌بحران (آمادگی) برای جانمایی انبارهای ذخیره اقلام امدادی، و در مرحله پس‌بحران (واکنش) برای تعیین مکان مراکز موقت اسکان، توزیع و درمانی حائز اهمیت است.

از نخستین پژوهش‌ها در این حوزه، مطالعه‌ی (Toregas et al., 1971) است که در آن به مسئله تحت پوشش قرار گرفتن نقاط تقاضا توسط تسهیلات امدادی پرداخته شده است. در مطالعه‌ی (Boonmee et al., 2017) نیز مرور گسترده‌ای بر مدل‌های مکان‌یابی در لجستیک بشردوستانه اضطراری انجام شده که در آن انواع چالش‌ها و شرایط پیش و پس از بحران برای تسهیلات گوناگونی مانند انبارها، مراکز توزیع، پناهگاه‌ها، مکان‌های دفن پسماند و مراکز درمانی مورد بررسی قرار گرفته است. در (Klibi et al., 2018) نیز به موضوع پیش‌تأمین کالا در شرایط بحرانی پرداخته شده است. مسئله مورد مطالعه شامل تعیین مکان، ظرفیت و تعداد مراکز توزیع و همچنین میزان موجودی ذخیره‌شده بوده و برای مدلسازی عدم قطعیت، از سناریوهای متعدد و شبیه‌سازی مونت کارلو بهره گرفته شده است.

۲-۳- مسیریابی و توزیع در لجستیک امداد

مسئله‌ی جریان در لجستیک امداد شامل مسیریابی، توزیع و تخصیص کالاها را امدادی به نقاط تقاضا می‌شود. در ادامه، مهمترین مطالعات انجام‌شده در این حوزه مرور می‌گردد.

در (Rivera-Royero et al., 2016)، یک مدل پویا برای توزیع کالا و خدمات امدادی پیشنهاد شده که در آن تقاضا بر اساس اولویت طبقه‌بندی می‌گردد. تابع هدف این مدل، کمینه‌سازی تقاضای پوشش داده نشده با در نظر گرفتن ضریب اولویت هر گروه از تقاضا است. عملکرد این مدل با اجرای یک مطالعه موردی مرتبط با سیل در

جنگ‌ها، اقدامات تروریستی و انتشار مواد شیمیایی در زمره بحران‌های انسان‌ساخت قرار می‌گیرند. به منظور مقابله مؤثر با این رخدادها، دولت‌ها باید سیستم مدیریت بحران کارآمدی در سراسر کشور ایجاد کنند (Caunhye et al., 2012).

در ادبیات موضوع، لجستیک بحران به مجموعه‌ای از فعالیت‌ها گفته می‌شود که از برآورد نیازها آغاز شده و شامل تأمین کالا، جابجایی، انبارش و توزیع تجهیزات و خدمات میان آسیب‌دیدگان و امدادگران می‌گردد. اثربخشی این زنجیره عمدتاً به تحویل به‌موقع و کافی اقلام به نقاط مورد نظر بستگی دارد (Caunhye et al., 2012). چارچوب مدیریت بحران معمولاً در چهار مرحله تعریف می‌شود:

(۱) **پیشگیری:** اقدامات پیشگیرانه‌ای که پیش از وقوع بحران جهت مهار خطرات یا کاستن از پیامدهای آنها اجرا می‌شود.

(۲) **آمادگی:** فعالیت‌هایی مانند گردآوری اطلاعات، آموزش پرسنل، تحقیقات، برنامه‌ریزی، تشکیل ساختارهای مدیریتی و فراهم‌آوری منابع را در بر می‌گیرد که موجب افزایش توانایی مقابله با بحران می‌شود.

(۳) **واکنش:** مرحله‌ای که پس از وقوع بحران آغاز شده و شامل ارائه خدمات فوری برای حفظ زیرساخت‌ها و جلوگیری از گسترش خسارت است.

(۴) **بازسازی:** شامل فعالیت‌هایی است که شرایط یک سازمان آسیب‌دیده را به وضعیت عادی بازمی‌گرداند، با در نظر گرفتن استانداردهای ایمنی و ویژگی‌های یک سازمان موفق.

برای طراحی شبکه لجستیک کارآمد در شرایط بحرانی، لازم است این مراحل با یکدیگر تلفیق شده و تصمیمات در سه سطح استراتژیک، تاکتیکال و عملیاتی به صورت یکپارچه اتخاذ شوند. تصمیمات استراتژیک شامل مکان‌یابی تسهیلات، تعیین ظرفیت انبارها و تخصیص ناوگان حمل‌ونقل است. تصمیمات تاکتیکال به مدیریت موجودی و تعیین میزان ذخایر امدادی مربوط می‌شود و تصمیمات عملیاتی نیز شامل مسیریابی، توزیع و تخصیص

در مطالعات (Rezaei-Malek et al., 2016b)؛ یک شبکه لجستیک برای توزیع کالاهای فسادپذیر در شرایط بحرانی و در دو مرحله آمادگی و واکنش طراحی شده است. در این ساختار، مجموعه‌ای از انبارها و بیمارستان‌ها در نظر گرفته شده است. مرحله اول شامل تصمیم‌گیری درباره مکان انبارها، موجودی اولیه و سیاست سفارش‌دهی است. مرحله دوم نیز به توزیع داروها با هدف کاهش زمان و هزینه اختصاص دارد.

در (Hasanzadeh & Bashiri, 2016)، یک مدل دو مرحله‌ای (آمادگی و واکنش) برای لجستیک عملیات امداد در شرایط بحرانی ارائه شده است. مدل پیشنهادی آنان شامل دو مؤلفه اصلی است: مسئله مکان‌یابی گره‌های محوری و طراحی شبکه حمل‌ونقل. این ساختار، سه سطح را پوشش می‌دهد: تسهیلات سطح بالا، پایگاه‌های امدادی و مناطق آسیب‌دیده.

در (Mohammadi et al., 2016)، یک مدل تصادفی چندهدفه برای دو مرحله آمادگی و واکنش بحران توسعه داده شده است. این مدل سه هدف را دنبال می‌کند: حداکثرسازی میزان تقاضای تحت پوشش، کاهش هزینه‌ها، و کمینه‌سازی اختلاف در سطح رضایت‌مندی میان نقاط مختلف تقاضا. مدل مذکور قابلیت در نظر گرفتن همزمان چندین محصول را دارد و تأثیر عدم قطعیت نیز در آن لحاظ شده است.

در (Pradhananga et al., 2016)، یک مدل یکپارچه برای تخصیص و توزیع کالا در دو مرحله آمادگی و واکنش بحران ارائه شده است. هدف این مدل، به حداقل رساندن هزینه اجتماعی است. هزینه اجتماعی در این مطالعه از دو جزء تشکیل می‌شود: هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه محرومیت. هزینه محرومیت به شرایطی اشاره دارد که افراد از دریافت کالاهای اساسی و ضروری خود در زمان بحران بازمی‌مانند. در (Moreno et al., 2016)، دو مدل تصادفی از نوع برنامه‌ریزی آمیخته با عدد صحیح (MIP) ارائه شده است که به یکپارچه‌سازی سه مؤلفه مکان‌یابی تسهیلات، عملیات حمل‌ونقل و تعیین تعداد خودروهای مورد نیاز در شرایط بحرانی می‌پردازد. این مدل‌ها برای دو فاز آمادگی و واکنش بحران تدوین شده‌اند. در (Bozorgi-Amiri & Khorsi, 2016)، یک مدل یکپارچه شامل تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص و مسیریابی در سه

کلمبیا ارزیابی شد و سه الگوریتم ابتکاری مختلف برای حل مسئله و مقایسه جواب‌ها به کار گرفته شد.

در (Lu et al., 2016)، مدلی مبتنی بر افق نورد برای توزیع اقلام امدادی در زمان مناسب پس از وقوع بلایا ارائه شده است. مدل مذکور، تقاضای امداد و زمان تحویل را پیش‌بینی کرده و جریان بهینه توزیع امداد را تعیین می‌کند. هدف به حداقل رساندن زمان کل برای ارائه کالاهای امدادی برای برآوردن تقاضا، با توجه به غیرقطعی بودن داده‌ها و نگرش ریسک‌گریزی است. آنها از یک مثال عددی بر اساس زلزله‌ی ۲۱ سپتامبر سال ۱۹۹۹ در تایوان استفاده کرده‌اند.

در (Bai, 2016) با در نظر گرفتن چند تأمین‌کننده، چند محدوده آسیب‌دیده، چند پایگاه امدادی و چند وسیله نقلیه، یک مدل دو مرحله‌ای برای مکان‌یابی، مسیریابی تک دوره‌ای و تخصیص منابع در زمان بحران ارائه شده است. در این مدل، برای عدم قطعیت در تأمین تقاضا و دسترسی به مسیر از منطق فازی بهره گرفته شده و اهدافی همچون عدالت در خدمت‌رسانی، کاهش زمان و هزینه در نظر گرفته شده است.

در (Baskaya et al., 2017)، تأثیر روش‌های مختلف انتقال کالا در لجستیک بشردوستانه شامل انتقال مستقیم، انتقال جانبی بین مراکز امدادی و انتقال جانبی از طریق دریا، در یک زنجیره تأمین امدادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. ارزیابی مذکور بر مبنای اطلاعات عینی حاصل از وقوع یک زلزله در استان‌بول انجام شده و نتایج روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

۲-۴- مدل‌های دو فازی (آمادگی و واکنش)

تعداد محدودی از مطالعات، دو فاز آمادگی و واکنش را به طور همزمان مورد بررسی قرار داده‌اند که در ادامه به مهمترین آنها اشاره می‌شود.

در (Tofighi et al., 2016)، مدلی برای شبکه لجستیک بشردوستانه با در نظر گرفتن عدم قطعیت طراحی شده است. این شبکه شامل انبارهای مرکزی، انبارهای محلی و نواحی آسیب‌دیده است. در گام نخست، مکان انبارها و سطح موجودی آنها تعیین می‌شود و در گام دوم، نحوه توزیع مشخص می‌گردد. اهداف در نظر گرفته شده شامل حداقل‌سازی مدت زمان توزیع، هزینه ناشی از کمبود و هزینه نگهداری کالاهای مصرف‌نشده است.

(۱) **یکپارچگی ناکافی لایه‌های شبکه:** در اکثر مقالات گذشته، تعداد لایه‌های در نظر گرفته شده در شبکه لجستیک امداد اندک است. برای مثال، در (Tofighi et al., 2016) تنها سه سطح (انبار مرکزی، انبار محلی و مناطق آسیب‌دیده) را در نظر گرفته شده است. در (Hasanzadeh & Bashiri, 2016) نیز ساختاری سه سطحی ارائه گردیده است. هر چند اخیراً در مطالعه‌ی (Ghaebi Panah et al., 2025) رویکرد یکپارچه‌تری به لجستیک امداد ارائه شده، اما لایه‌های انبارش مانند انبار پشتیبان و موقت را پوشش نداده است. در حالی که در نظر گرفتن بخش‌های مختلف شبکه لجستیک امداد به صورت یکپارچه، مدل را به شرایط دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند. در این تحقیق، سطوحی شامل انبارهای مرکزی، محلی، پشتیبان، موقت و بیمارستان‌ها در نظر گرفته شده است.

(۲) **کم‌توجهی به مدلسازی قابلیت اطمینان:** هرچند نقش خرابی تسهیلات و مسیرها در عملیات‌های امداد غیرقابل انکار است، اما مرور منابع نشان می‌دهد که تنها شماری اندک از تحقیقات، احتمال ازکارافتادگی انبارها و جاده‌ها را به صورت صریح مدل کرده‌اند. در مطالعاتی مانند (Bozorgi-Amiri & Khorsi, 2016؛ Moreno et al., 2016؛ Rezaei-Malek et al., 2016a) فرض شده است که تمام تسهیلات و مسیرها در زمان بحران به طور کامل در دسترس هستند. اخیراً پژوهش (Zhang et al., 2025b) به قابلیت اطمینان در لجستیک بلایا پرداخته، اما رویکرد آن متفاوت است و تلفیق بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو با قابلیت اطمینان را پوشش نداده است. این در حالی است که در عمل، احتمال خرابی انبارها و مسدود شدن جاده‌ها وجود دارد.

(۳) **کم‌توجهی به مدیریت موجودی مواد فسادپذیر در لجستیک بحران:** اگرچه پژوهش‌های متعددی به زنجیره تامین محصولات فسادپذیر در صنایع غذایی پرداخته‌اند (Abbasian et al., 2023؛ Foroozesh et al., 2022؛ Chan et al., 2020؛ Liu et al., 2021) اما در حوزه لجستیک بحران و به

سطح راهبردی (استراتژیک)، تاکتیکی و عملیاتی توسعه داده شده است. در مدل ارائه شده، سه هدف مورد مطالعه قرار گرفته است: اول، حداقل‌سازی حداکثر کمبود در میان تمامی مناطق آسیب‌دیده؛ دوم، کوتاه‌ترین زمان سفر؛ و سوم، کاهش هزینه‌های مربوط به دوره پیش‌بحران و پس‌بحران.

در (Manopiniwes & Irohara, 2017)، یک مدل خطی عدد صحیح مختلط تصادفی برای یکپارچه‌سازی تصمیمات در دو فاز آمادگی و واکنش ارائه شده که در آن در خصوص مکان‌یابی، تعیین سطح موجودی و برنامه‌ریزی توزیع، تصمیم‌گیری می‌شود. اهداف مدل شامل کمینه کردن هزینه‌ها و زمان واکنش است.

پژوهش‌های متعددی در زمینه زنجیره تامین محصولات فسادپذیر با رویکرد پایداری، انجام شده است. برای مثال، در (Liu et al., 2021)، یک مدل یکپارچه مکان‌یابی-موجودی-مسیریابی برای محصولات فسادپذیر در بازارهای نوظهور با در نظر گرفتن انتشار کربن و تازگی محصول ارائه شده است. نتایج مطالعه مذکور نشان می‌دهد که افزایش سرعت خودرو می‌تواند تازگی محصول را بهبود بخشد اما هزینه‌های حمل و نقل را افزایش می‌دهد. در (Abbasian et al., 2023)، یک زنجیره تامین مواد غذایی فسادپذیر با در نظر گرفتن اختلالات مسیر و شرایط ترافیکی مدلسازی شده و به منظور حل مدل پیشنهادی از یک روش ترکیبی جدید با استفاده از الگوریتم ژنتیک و توابع سودمند اکتشافی استفاده شده است. در (Foroozesh et al., 2022)، یک شبکه زنجیره تامین سبز و تاب‌آور برای محصولات فسادپذیر تحت خطرات اختلال و عدم قطعیت‌های معرفتی طراحی شده و از رویکرد برنامه‌ریزی احتمالی رباست با معیار اعتبار برای مواجهه با عدم قطعیت استفاده شده است. در (Chan et al., 2020)، یک مسئله برنامه‌ریزی یکپارچه تولید-موجودی-مسیریابی برای عملیات لجستیک مواد غذایی با چهار هدف (کاهش هزینه کل، حداکثرسازی کیفیت غذا، حداقل‌سازی انتشار CO₂ و حداقل‌سازی زمان تحویل) فرموله شده و الگوریتم MO-GLNPSO برای حل توسعه داده شده است.

۲-۵- شکاف‌های تحقیقاتی

با بررسی جامع مقالات مرتبط با پژوهش حاضر، شکاف‌های زیر در تحقیقات گذشته شناسایی می‌شود:

تک‌دوره‌ای و ایستا فرض شده است. مرور سیستماتیک (Ducati et al., 2026) نیز نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات موجود به مسیریابی پویا توجه نکرده‌اند.

(۷) **محدودیت در تنوع کالا و ناوگان:** مسائل اندکی برای خدمت‌رسانی از چند نوع وسیله نقلیه و چند نوع کالا استفاده کرده‌اند. در پژوهش‌هایی مانند (Klibi et al., 2018; Mete & Zabinsky, 2010) تنها یک نوع کالا و یک نوع وسیله نقلیه در نظر گرفته شده است. مطالعه (Foroozesh et al., 2022) چند نوع کالا و وسیله نقلیه دارد اما در زمینه دارو نیست و فاز آمادگی و واکنش را به صورت یکپارچه پوشش نداده است.

۲-۶- جمع‌بندی و جایگاه پژوهش حاضر

با توجه به شکاف‌های شناسایی شده، پژوهش حاضر به طراحی شبکه لجستیک دارو به عنوان ماده فسادپذیر در دو فاز آمادگی و واکنش می‌پردازد. نوآوری‌های پژوهش حاضر نسبت به مطالعات پیشین به شرح زیر است:

- (۱) معرفی ساختار چهارسطحی انبارش شامل انواع مرکزی، محلی، پشتیبان و موقت به همراه تخصیص پویای این تسهیلات به مراکز درمانی.
- (۲) مدلسازی قابلیت اطمینان از طریق احتمال خرابی برای انبارها و مسیرها.
- (۳) مدیریت موجودی داروهای فسادپذیر با در نظر گرفتن تاریخ انقضا و خروج به موقع از انبار.
- (۴) یکپارچه‌سازی همزمان مکان‌یابی، ظرفیت‌گذاری، تخصیص ناوگان، مدیریت موجودی، مسیریابی و توزیع.
- (۵) مسیریابی چنددوره‌ای و پویا با توجه به تغییرات شرایط پس از بحران.
- (۶) در نظر گرفتن دو نوع دارو (نادر و معمولی) و چند نوع وسیله نقلیه ناهمگن.
- (۷) استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو برای مدلسازی عدم قطعیت هم در فاز آمادگی و هم در فاز واکنش.
- (۸) ارائه یک روش حل فراابتکاری کارآمد (الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب NSGA-II) برای

ویژه زنجیره تامین دارو، این موضوع کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مدیریت موجودی به شکلی که داروها قبل از فاسد شدن از انبار خارج گردند، در مطالعات لجستیک بحران کمتر دیده می‌شود. در پژوهش‌هایی مانند (Caunhye et al., 2012; Manopiniwes & Irohara, 2017; Tofighi et al., 2016)، فرض شده است که اقلام امدادی فسادپذیر نیستند. مطالعه‌ی (Rekabi et al., 2023) به صراحت به فسادپذیری دارو پرداخته، اما تلفیق آن با فاز آمادگی و واکنش را پوشش نداده است. با این حال، در زنجیره تأمین دارو، فسادپذیری اقلام یک چالش کلیدی محسوب می‌شود.

- (۴) **تلفیق محدود دو فاز آمادگی و واکنش:** یکی از کاستی‌های عمده در پژوهش‌های پیشین، تفکیک دو فاز آمادگی و واکنش از یکدیگر است. در حالی که تلفیق این دو مرحله می‌تواند به کارایی بیشتر کمک کند. برای مثال، در (Baskaya et al., 2017; Bai, 2016) صرفاً به فاز واکنش پرداخته شده و تصمیمات فاز آمادگی (مانند مکان‌یابی انبارها)، از پیش تعیین شده در نظر گرفته شده است. اخیراً مطالعه‌ی (Zhu et al., 2025) به تلفیق ذخیره‌سازی و توزیع پرداخته، اما در زمینه داروهای فسادپذیر نیست و مسیریابی پویا را پوشش نداده است.
- (۵) **فقدان یکپارچگی همزمان تصمیمات:** مطالعات محدودی، مکان‌یابی، مسیریابی، توزیع و کنترل موجودی را به طور همزمان پوشش داده‌اند. بیشتر مطالعات موجود، مانند (Lu et al., 2016; Rivera-Royero et al., 2016) تنها به یکی از این ابعاد پرداخته‌اند. اخیراً پژوهش (Zhang et al., 2025a) به یکپارچه‌سازی تصمیمات پیش و پس از بحران پرداخته، اما مسیریابی پویا و چنددوره‌ای را پوشش نداده است.
- (۶) **ایستایی در مسیریابی:** تصمیم‌گیری در خصوص برنامه‌ریزی و مسیریابی بهتر است به صورت چنددوره‌ای و پویا انجام پذیرد، زیرا شرایط جاده و میزان تقاضا در این فاز ممکن است تغییر کند. در مطالعاتی مانند (Moreno et al., 2016; Pradhananga et al., 2016)، مسیریابی به صورت

حل مدل در ابعاد بزرگ و مقایسه آن با نتایج روش دقیق.

۳- روش پژوهش

در این بخش، مدل ریاضی شبکه لجستیک دارو در شرایط بحران ارائه می‌شود. ابتدا مسئله به زبان ساده تعریف شده و مفروضات آن بیان می‌گردد. سپس، نمادها، متغیرهای تصمیم، توابع هدف و محدودیت‌های مدل به تفصیل معرفی می‌شوند. در ادامه، با توجه به عدم قطعیت موجود در پارامترهایی نظیر تقاضا و وضعیت مسیرها، رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو برای حل مدل به کار گرفته می‌شود.

۳-۱- تعریف مسئله

زنجیره تامین اقلام امدادی مورد مطالعه در این مقاله، شامل مکانیابی، مسیریابی و توزیع اقلام امدادی با در نظر گرفتن چندین هدف می‌شود. این زنجیره به تامین داروهای مورد نیاز در زمان وقوع یک بحران می‌پردازد. متعاقباً مکان‌های مناسب برای انبارهای دارو قبل از وقوع بحران باید اندیشیده شود تا توزیع داروها به بیمارستان‌ها با کارایی مناسب از نظر اهداف مورد نظر صورت گیرد. این داروها به میزان مناسب در انبارها باید ذخیره گردد و داروهای منقضی در زمان مناسب خارج گردند تا هنگام وقوع بحران نه تنها کمبود دارو به کمترین میزان ممکن باشد، بلکه داروها در زمان مناسب و با رعایت عدالت به بیمارستان‌های مناطق آسیب دیده ارسال گردد. شبکه لجستیک مورد مطالعه از اجزای زیر تشکیل شده است:

(۱) **بیمارستان‌ها:** بیمارستان‌ها محل رسیدگی به جمعیت آسیب دیده می‌باشند. در هر منطقه ممکن است یک یا چندین بیمارستان وجود داشته باشد یا یک بیمارستان مسئول خدمت رسانی به چندین منطقه کوچک باشد. در هر صورت، تقاضای زنجیره تامین اقلام امدادی برابر تقاضای بیمارستان‌ها در مناطق آسیب دیده خواهد بود. این تقاضا شامل اقلام دارویی چندگانه است که هر کدام کارکرد خاص خود را دارند.

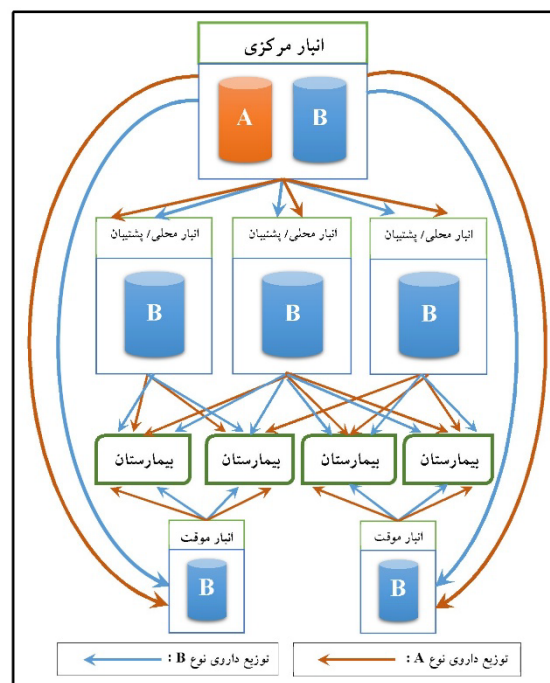
(۲) **انبار مرکزی:** به عنوان اولین سطح انبارش، محل ذخیره‌سازی هر دو دسته داروی A و B می‌باشد. اقلام گروه B مصرف عمومی و فراگیر دارند، در مقابل داروهای گروه A نایاب بوده، نیازمند شرایط ویژه برای انبارش هستند و عمدتاً برای بیماری‌های خاص تجویز می‌شوند که تمرکز نگهداری این داروها به دلیل شرایط ویژه انبارش یا کمبود، کنترل موجودی را بهبود می‌بخشد، در حالی که ناحیه تقاضا برای آنها در زمان بحران قابل پیش‌بینی نیست. مدل فرض می‌کند که انبار مرکزی در مکانی ایمن احداث شده، همه انبارهای محلی را پوشش می‌دهد و مکان آن از قبل تعیین شده است. بنابراین، مسئله اصلی به انتخاب مکان انبارهای محلی از بین گزینه‌های بالقوه تقلیل می‌یابد.

(۳) **انبارهای محلی:** سطح دوم انبارها را تشکیل می‌دهند. هر یک از این انبارها صرفاً به مراکز درمانی محدوده خود خدمات می‌دهند. از آنجا که داروهای نوع B پس از وقوع بحران در تمامی بیمارستان‌ها مورد نیاز است، تنها این دسته از اقلام در انبارهای منطقه‌ای نگهداری می‌شود.

(۴) **انبار پشتیبان:** سومین نوع انبار، انبارهای پشتیبان هستند. هر بیمارستان برای افزایش قابلیت اطمینان به انباری پشتیبان اختصاص می‌یابد که این انبار پشتیبان در واقع نزدیک ترین انبار محلی بدون در نظر گرفتن انبار محلی تخصیص یافته به آن بیمارستان است.

(۵) **انبار موقت:** اگر چه انبارهای محلی و پشتیبان به صورت متوسط نزدیکترین انبارها به بیمارستان‌ها هستند و کمترین هزینه جابجایی داروها به بیمارستان‌ها را دارند ولی ممکن است در تعداد معدودی از سناریوها آسیب بینند و نتوانند به بیمارستان‌ها به صورت مطلوب خدمت‌رسانی کنند. از این رو، در این حالات و با توجه به هر سناریو، انبار موقتی به هر بیمارستان تخصیص می‌یابد تا ناکارآمدی خدمت‌رسانی توسط انبارهای محلی و پشتیبان در صورت لزوم توسط آنها جبران گردد.

- (۷) مجموع تقاضاهای تخصیص داده شده به هر انبار در تمامی مسیرهای متعلق به آن نباید از ظرفیت انبار تجاوز کند.
- (۸) در این شبکه، چهار معیار برای جانمایی انبارها در نظر گرفته شده است. معیار نخست، سطح امنیت انبارها با توجه به ریسک آسیب‌پذیری مکان‌های از پیش تعیین‌شده برای ذخیره اقلام دارویی است. معیار دوم، توانایی پوشش‌دهی هر انبار به تعداد بیشتری از بیمارستان‌ها در صورت استقرار در موقعیت مورد نظر است. معیار سوم نیز به هزینه احداث و ظرفیت هر انبار مربوط می‌شود. چهارمین معیار فاصله تا بیمارستان‌ها و زمان مورد نیاز انتقال در جاده‌ها با شرایط متفاوت است که زمان واکنش را در پایین‌ترین سطح نگه دارد.
- (۹) ظرفیت انبارها متفاوت است. در واقع انبارها به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم می‌شوند که انتخاب نوع انبار به عهده مدل است و با توجه به مقدار تقاضا تصمیم‌گیری می‌کند.
- (۱۰) مدل ارائه شده به صورت چند کالایی است و برای هر کالای امدادی، حجم مشخص و هزینه‌های تهیه، کمبود و نگهداری متفاوتی وجود دارد.
- (۱۱) علاوه بر هزینه نگهداری برای اقلام امدادی موجود در انبارها طی افق برنامه‌ریزی بعد از بحران، برای اقلام امدادی باقیمانده در مناطق آسیب دیده هزینه نگهداری در نظر گرفته شده است؛ زیرا این اقلام مازاد حمل شده به یک نقطه آسیب دیده ممکن است موجب کمبود در سایر مناطق شوند.
- (۱۲) احتمال خرابی متفاوت برای انبارها در نظر گرفته شده است. در واقع، در صورت خراب شدن یک انبار، درصدی از موجودی انبار مذکور از بین می‌رود.
- (۱۳) برای مسیرهای انتقال کالا از انبارهای اولیه و پشتیبان به نقاط آسیب دیده، قابلیت اطمینان متفاوت تعریف شده است که به صورت احتمال باز بودن مسیرها است.



شکل ۱. شبکه لجستیک مورد مطالعه.

Figure 1. The studied logistics network.

- با در نظر گرفتن تسهیلات فوق، شبکه لجستیک مورد مطالعه به شرح شکل ۱ خواهد بود. سایر مفروضاتی که در مدلسازی بکار گرفته می‌شود، به شرح زیر است:
- (۱) چندین مکان بالقوه برای استقرار مراکز توزیع وجود دارد اما تعداد مراکز توزیعی که باید انتخاب شوند، مشخص نیست و تعداد دقیق آنها را مدل مشخص می‌کند.
 - (۲) فضای حل گسسته است به این معنی که مکانیابی مراکز توزیع در بین یکسری نقاط بالقوه که نسبت به سایر مکان‌ها در زمان بحران ایمن‌تر می‌باشند صورت می‌پذیرد.
 - (۳) تحویل جزئی در مسئله وجود ندارد. به عبارت بهتر تقاضای هر نقطه تنها با یک وسیله حمل و نقل برآورده می‌شود.
 - (۴) تعداد نقاط حادثه دیده و تقاضای آنها از قبل مشخص نیست.
 - (۵) تعداد وسایل حمل و نقل، نامشخص و ناوگان حمل و نقل به لحاظ ظرفیت حمل، ناهمگن است.
 - (۶) ظرفیت هر نوع از وسایل حمل و نقل از قبل مشخص است.

۱۸) به دلیل متفاوت بودن اطلاعات مانند میزان تقاضا، وضعیت جاده و... مسیریابی به صورت چند دوره‌ای و پویا است.

۱۹) در انبار مرکزی، حداقل وسیله نقلیه مورد نیاز برای خدمت‌رسانی به انبارهای محلی باید موجود باشد. این وسایل پس از شروع حرکت از انبار مرکزی و توزیع داروها بین انبارهای محلی، نهایتاً به انبار مرکزی برمی‌گردند.

۲۰) هر انبار محلی باید دست‌کم به اندازه‌ای وسیله نقلیه در اختیار داشته باشد که توان پاسخگویی به بیمارستان‌های تحت پوشش خود را داشته باشد. در هر دوره زمانی، خدمات‌رسانی به تمامی بیمارستان‌ها دقیقاً یک بار انجام می‌شود. فرایند به این شکل است که ابتدا تقاضای دوره جاری برای بیمارستان‌هایی که زیرپوشش یک انبار محلی، پشتیبان یا موقت قرار دارند، توسط وسایل نقلیه تخصیص‌یافته به آن انبار بارگیری شده و سپس میان آن‌ها توزیع می‌گردد. در پایان، هر وسیله نقلیه پس از اتمام تحویل به یک یا چند بیمارستان، به انبار اولیه خود بازمی‌گردد.

۲۱) در فاز آمادگی، ناوگان حمل‌ونقل مورد نیاز هر انبار تعیین و به آن اختصاص می‌یابد. این وسایل نقلیه سپس به صورت دوره‌ای تحت عملیات نگهداری و تعمیرات قرار می‌گیرند.

۳-۲- مدل ریاضی پیشنهادی

به منظور مدل‌سازی مسئله، ابتدا نمادها (شامل مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم) تعریف می‌گردند. سپس، سه تابع هدف شامل کمینه‌سازی زمان حمل‌ونقل، بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان انبارهای فعال و کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تامین معرفی می‌شوند. در ادامه، محدودیت‌های مسئله در چهار گروه اصلی ارائه می‌گردد: ۱) محدودیت‌های تخصیص و پوشش، ۲) محدودیت‌های مدیریت موجودی و ظرفیت، ۳) محدودیت‌های مسیریابی و جریان، و ۴) محدودیت‌های پویایی چنددوره‌ای.

۱۴) در مرحله واکنش، تنها داروهایی توزیع می‌شوند که همچنان قابل استفاده و عاری از هرگونه انقضا هستند. همچنین، داروهای خریداری‌شده در زمان تهیه، دارای حداکثر زمان مفید باقیمانده تا تاریخ انقضای خود می‌باشند.

۱۵) در هر دوره زمانی، سطح موجودی هر دارو با میزان بهینه آن (که مطابق فرض مسئله، موجودی دوره اول به عنوان سطح بهینه در نظر گرفته شده است) سنجیده می‌شود. چنانچه موجودی واقعی از این سطح بهینه کمتر باشد، آنگاه با وضعیت کمبود مواجه خواهیم بود. برای تشویق مدل به حداقل رساندن این کمبودها، جریمه‌ای در تابع هدف منظور شده است. دلیل این جریمه آن است که اگر چنین کمبودی در دوره وقوع بحران رخ دهد، میزان نارسایی در تأمین داروها در زمان بحران تشدید خواهد شد.

۱۶) در پایان هر دوره، وضعیت موجودی همه انواع داروها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. داروهایی که تاریخ انقضای آنها نزدیک است، از انبار خارج شده و به قیمتی که متناسب با تعداد دوره‌های باقیمانده از عمر مفید آنها تعیین می‌گردد، به فروش می‌رسند.

۱۷) مسیر حرکت وسایل نقلیه به منظور رساندن دارو، در سطح اول، از انبار مرکزی به انبارهای محلی و در سطح دوم، از انبار مرکزی به انبارهای موقت (در صورت خرابی انبار محلی و انبار پشتیبان تخصیص یافته به یک بیمارستان) است. بدین ترتیب، هرگاه در طول بحران، انبارهای محلی یا موقت به داروهای نوع A یا B نیاز پیدا کنند، محموله‌های مورد نیاز از انبار مرکزی برای آنها ارسال می‌شود. در سطح سوم، حرکت بین هر انبار محلی و بیمارستان‌های تخصیص یافته به آن انبار محلی است و بیمارستان‌هایی با هم در ارتباط هستند که تحت پوشش یک انبار محلی باشند. در سطح چهارم، حرکت بین انبار پشتیبان و نقاط تقاضاست، در صورتی که نتوان از انبار محلی استفاده کرد. در سطح پنجم، حرکت بین انبار موقت و نقاط تقاضا در صورت لزوم است.

۳-۲-۱- نمادهای مورد نیاز

• مجموعه‌ها و اندیس‌ها

J	مجموعه مکان‌های بالقوه برای احداث انبار محلی
K	مجموعه بیمارستان‌ها $k \in \{1, \dots, K \}$
U	مجموعه همه گره‌های شبکه $U = J \cup K \cup L; u, u' \in \{1, \dots, U \}$
B	مجموعه داروهای نوع $B, B \in \{1, \dots, B \}$
A	مجموعه داروهای نوع $A, A \in \{1, \dots, A \}$
C	مجموعه همه داروها $C = A \cup B; c \in \{1, \dots, C\}$
T	مجموعه دوره‌های زمانی قبل از بحران $t \in \{1, \dots, T \}$
Ec	مجموعه دوره‌های باقیمانده از عمر داروی c $e_c \in \{1, 2, \dots, E_c \}$
T'	مجموعه دوره‌های زمانی پس از بحران $t' \in \{1, \dots, T' \}$
V	مجموعه وسایل نقلیه $v \in \{1, \dots, V \}$
Ψ	مجموعه سناریوهای ممکن $\Omega \in \{1, \dots, \Psi \}$

• پارامترهای مستقل از سناریو

FJ_j	هزینه ثابت احداث انبار محلی در مکان j
$ds_{uu'}$	فاصله بین گره u تا u' در شبکه
$R1_j$	شعاع پوشش انبار محلی که در مکان j احداث می‌شود به عنوان انبار محلی بیمارستان‌ها
$R2_j$	شعاع پوشش انبار محلی که در مکان j احداث می‌شود به عنوان انبار پشتیبان بیمارستان‌ها
$R3_j$	شعاع پوشش انبار موقت که در مکان j احداث می‌شود.
$a1_{jk}$	پارامتر با مقدار ۱ در صورتی که بیمارستان k در شعاع پوشش انبار محلی j به عنوان انبار محلی قرار داشته باشد و با مقدار صفر در غیر اینصورت.
$a2_{jk}$	پارامتر با مقدار ۱ در صورتی که بیمارستان k در شعاع پوشش انبار محلی j به عنوان انبار پشتیبان قرار داشته باشد و با مقدار صفر در غیر اینصورت.
$a3_{jk}$	پارامتر با مقدار ۱ در صورتی که بیمارستان k در شعاع پوشش انبار موقت j قرار داشته باشد و با مقدار صفر در غیر اینصورت.
$CC1_{cj}$	هزینه توسعه سطح ظرفیت ۱ برای محصول c در انبار j

$CC2_{cj}$ هزینه توسعه سطح ظرفیت ۲ برای محصول c در انبار j

$CC3_{cj}$ هزینه توسعه سطح ظرفیت ۳ برای محصول c در انبار j

PSd_c جریمه کمبود داروی c قبل از وقوع بحران

PS_c جریمه کمبود داروی c در دوره‌ی بحران

H_c هزینه نگهداری داروی c که پس از بحران بلااستفاده باقی می‌ماند.

IP_{c,e_c} درآمد خالص فروش داروی c که e_c واحد زمانی از عمر مفید آن باقیمانده است.

CP_c هزینه خرید داروی c قبل از وقوع بحران

me_c آستانه حداکثر عمر باقیمانده از داروی c برای خروج از انبار

ec_c حداکثر مقدار قابل تهیه داروی c قبل از بحران (حداکثر قابل خرید از داروی نوع c)

$Cap1_{cj}$ ظرفیت سطح ۱ انبار j برای داروی c

$Cap2_{cj}$ ظرفیت سطح ۲ انبار j برای داروی c

$Cap3_{cj}$ ظرفیت سطح ۳ انبار j برای داروی c

FV_v هزینه ثابت استفاده از وسیله نقلیه نوع v

$MV_{v,t}$ هزینه متغیر نگهداری و تعمیرات وسیله نقلیه v در دوره t

Q_v ظرفیت وسیله نقلیه نوع v

BM یک عدد به اندازه کافی بزرگ

• پارامترهای وابسته به سناریو

P_Ω احتمال وقوع سناریوی Ω

$D_{ckt,\Omega}$ مقدار تقاضای بیمارستان k از داروی c در دوره t' در سناریوی Ω

$ac_{cj,\Omega}$ درصدی از داروی c که در انبار محلی j در سناریوی Ω سالم باقی مانده است.

$tr_{uuvtr,\Omega}$ زمان سفر از گره u به u' در زمان t' پس از بحران در سناریوی Ω

$ar_{uuvtr,\Omega}$ پارامتری با مقدار ۱ اگر مسیر بین u و u' در زمان t' پس از بحران در سناریوی Ω قابل دسترس باشد و با مقدار صفر در غیر اینصورت.

• متغیرهای مستقل از سناریو

y_j متغیر باینری با مقدار ۱ در صورتی که انبار j قبل از بحران فعال گردد.

وسيله نقلیه v انبار محلی z به بیمارستان k در سناریوی Ω در زمان t' زمانی که بحران در دوره t اتفاق افتاده باشد.

مقدار داروی مازاد نوع c که پس از بحران در محل نگهداری z در سناریوی Ω بلااستفاده باقی می‌ماند، در صورتی که بحران در زمان t اتفاق افتاده باشد.

مقدار کمبود داروی c در بیمارستان k در دوره بحران t' و در سناریوی Ω زمانی که بحران در زمان t اتفاق افتد.

متغیر باینری با مقدار ۱ در صورتی که کمان z به z' (مشکل از انبارهای محلی) در زمان t' و در سناریوی Ω زمانی که بحران در زمان t اتفاق افتد توسط تور وسایل نقلیه v مربوط به انبار مرکزی پیموده شود.

متغیر باینری با مقدار ۱ در صورتی که کمان u به u' (مشکل از انبارهای محلی و بیمارستان‌ها) در زمان t' و در سناریوی Ω زمانی که بحران در زمان t اتفاق افتد توسط تور وسایل نقلیه v مربوط به انبار محلی z پیموده شود.

موجودی باقیمانده وسیله نقلیه v متعلق به انبار مرکزی وقتی از انبار محلی z خارج می‌شود.

موجودی باقیمانده وسیله نقلیه v متعلق به انبار z وقتی از انبار محلی یا بیمارستان u خارج می‌شود.

۳-۲-۲- توابع هدف و محدودیت‌ها

مدل ریاضی پیشنهادی در قالب روابط (۱) تا (۵۸) ارائه شده است. این مدل شامل سه تابع هدف و پنجاه و پنج محدودیت می‌باشد. روابط (۱) تا (۳) به ترتیب بیانگر توابع هدف کمینه‌سازی زمان حمل‌ونقل، بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان و کمینه‌سازی هزینه‌های زنجیره تامین بوده و محدودیت‌های (۴) تا (۵۸) نیز به ترتیب شامل محدودیت‌های تخصیص و پوشش، مدیریت موجودی و ظرفیت، مسیریابی و جریان، و پویایی چنددوره‌ای هستند. تابع هدف (۱) به حداقل کردن زمان حمل و نقل در مسیرهای مختلف (بین انبارهای محلی و بیمارستان‌ها)

$z1_{cj}$ در صورتی که سطح ظرفیت ۱ داروی c برای انبار z در صورت احداث در نظر گرفته شود.

$z2_{cj}$ در صورتی که سطح ظرفیت ۲ داروی c برای انبار z در صورت احداث در نظر گرفته شود.

$z3_{cj}$ در صورتی که سطح ظرفیت ۳ داروی c برای انبار z در صورت احداث در نظر گرفته شود.

$U1_{kj}$ متغیر باینری با مقدار ۱ در صورتی که بیمارستان k به انبار z به عنوان انبار محلی تخصیص یابد.

$U2_{kj}$ متغیر باینری با مقدار ۱ در صورتی که بیمارستان k به انبار z به عنوان انبار پشتیبان تخصیص یابد.

Kc_{jct} مقدار داروی c با عمر باقیمانده e_c در انبار z که در دوره t قبل از بحران از انبار خارج می‌شود.

$I1_{cjet}$ سطح موجودی داروی c با عمر باقیمانده e_c در انبار z در دوره t

G_{cjt} مقدار داروی c با عمر باقیمانده E_c (حداکثر عمر) که در دوره t برای انبار z خریداری می‌شود.

E_{cjt} مقدار کمبود قبل از بحران داروی نوع c در انبار z در دوره t

N_{jv} تعداد وسیله نقلیه v تخصیص داده شده به انبار z

• متغیرهای وابسته به سناریو

$L1_{vtt\Omega}$ تعداد وسایل نقلیه نوع v مورد استفاده در انبار مرکزی در زمان t' زمانی که بحران در زمان t اتفاق افتد.

$L2_{jvtt\Omega}$ تعداد وسایل نقلیه نوع v مورد استفاده در انبار محلی z در زمان t' زمانی که بحران در زمان t اتفاق افتد.

$I2_{cjt\Omega}$ مقدار موجودی ذخیره شده محصول c در انبار z دوره t' و در سناریوی Ω در صورتی که بحران در زمان t اتفاق افتد.

$U3_{kj\Omega}$ متغیر باینری با مقدار ۱ در صورتی که انبار z در سناریوی Ω به عنوان انبار موقت برای بیمارستان k انتخاب شود و صفر در غیر اینصورت.

$x1_{cjvtt\Omega}$ مقدار داروی تحویل داده شده c توسط وسیله نقلیه v انبار مرکزی به انبار محلی z در سناریوی Ω در زمان t' زمانی که بحران در دوره t اتفاق افتاده باشد.

$x2_{ckjvtt\Omega}$ مقدار داروی تحویل داده شده c توسط

بهینه موجودی آنها باشد. از سوی دیگر، ممکن است در خرید یک دارو حداکثر مقداری وجود داشته باشد که در رابطه (۱۸) این محدودیت مشخص شده است. محدودیت (۱۹) حداکثر موجودی یک انبار برای یک دارو را محدود به سطح ظرفیت انتخاب شده برای آن دارو در آن انبار می‌کند. با این وجود، طبق محدودیت (۲۰)، در صورت فعال نشدن یک انبار، هیچ سطح ظرفیتی برای آن انبار در نظر گرفته نمی‌شود.

محدودیت (۲۱) نشان می‌دهد که در صورت فعال نشدن یک انبار، هیچ وسیله نقلیه‌ای از انبار مرکزی نه به آن وارد می‌شود و نه از آن خارج می‌شود. محدودیت (۲۲) نشان می‌دهد که در صورت فعال نشدن یک انبار محلی، هیچ وسیله نقلیه‌ای برای ارسال دارو از این انبار برای بیمارستان‌ها فرستاده نمی‌شود و یا از بیمارستان‌ها به آن بر نمی‌گردد. محدودیت (۲۳) مشخص می‌کند که هر نوع از وسایل نقلیه از انبار مرکزی در هر دوره، حداکثر به یک انبار محلی می‌تواند فرستاده شوند و این وسایل اگر به انبارهای محلی ارسال شوند در نهایت از یک انبار محلی باید به انبار مرکزی برگردند (محدودیت (۲۴)). مطابق با محدودیت (۲۵) در صورت ورود یک وسیله نقلیه از انبار مرکزی به یک انبار محلی، آن وسیله نقلیه باید از آن انبار در نهایت خارج شود.

قیود (۲۶) و (۲۷) بیان می‌دارند که صرفاً یک دستگاه نقلیه خروجی از انبار مرکزی یا انبار محلی، قادر به ورود به هر انبار محلی دیگر خواهد بود و این دستگاه در زمان خروج نیز تنها مجاز به حرکت به سوی یک انبار محلی دیگر می‌باشد. به عبارت دیگر، در هر دوره و هر سناریو حداکثر یک ماشین می‌تواند وارد هر انبار محلی و یا انبار مرکزی شود و حداکثر یک ماشین می‌تواند از آن خارج شود.

محدودیت‌های (۲۸) و (۲۹) به ترتیب خروج هر نوع وسیله نقلیه از انبارهای محلی را به حداکثر یک بیمارستان دیگر مجاز می‌کند و ورود مجدد آن را نیز تنها از یک بیمارستان دیگر ضروری می‌کند. این وسایل نقلیه در صورت ورود به یک بیمارستان حتماً باید از آن خارج شوند (محدودیت (۳۰)). طبق محدودیت (۳۱)، در صورتی که یک انبار به عنوان انبار محلی، پشتیبان یا موقت برای بیمارستانی انتخاب نشود، اجازه حمل از آن انبار به آن بیمارستان داده نمی‌شود. محدودیت (۳۲) تنها

می‌پردازد. در تابع هدف (۲) قابلیت اطمینان انبارهای فعال شده حداکثر می‌شود. هزینه‌های زنجیره تامین شامل هزینه ثابت فعال کردن انبارهای محلی، هزینه تعیین ظرفیت انبارهای محلی، هزینه کمبود داروها قبل از وقوع بحران، هزینه کمبود داروها در بیمارستان در دوره بحران، هزینه نگهداری داروهای مازاد بر نیاز دوره بحران، هزینه‌های خرید داروها، هزینه ثابت و متغیر (نگهداری و تعمیرات) منهای درآمد حاصل از فروش تعدادی از داروها قبل از منقضی شدن تاریخ آنها در تابع هدف (۳) حداقل می‌شود.

به موجب قیود شماره (۴) الی (۶)، برای هر مرکز درمانی می‌بایست یک انبار محلی، یک انبار پشتیبان و یک انبار موقت که همگی در محدوده پوشش تعیین شده قرار دارند، تعیین گردد. مطابق با محدودیت (۷) هر انبار تنها می‌تواند نقش یکی از انبارهای محلی، پشتیبان و موقت را داشته باشد. محدودیت‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهند که فاصله یک بیمارستان از انبار محلی تخصیص یافته به آن کمتر از فاصله آن بیمارستان تا انبار پشتیبان تخصیص یافته به آن است و فاصله یک بیمارستان تا انبار پشتیبان تخصیص یافته به آن کمتر از فاصله آن بیمارستان تا انبار موقت تخصیص یافته به آن است. محدودیت (۱۰) مشخص می‌کند که در صورت فعال نشدن یک انبار، آن انبار به عنوان انبار محلی یا به عنوان انبار پشتیبان و یا به عنوان انبار موقت، نمی‌تواند به یک بیمارستان تخصیص یابد.

بر اساس قید (۱۱)، انبارهای محلی مجاز به ذخیره‌سازی داروهای رده A نبوده و این اقلام تنها در انبار مرکزی قابل نگهداری هستند. همچنین، محدودیت (۱۲) میزان خرید این نوع داروها را برای انبارهای محلی در بازه پیش از بحران، صفر تعیین می‌کند. محدودیت (۱۳) بیانگر بالانس موجودی در دوره‌های قبل از بحران است. محدودیت (۱۴) موجودی داروهای با حداکثر عمر مفید در دوره‌های قبل از بحران را برابر با مقدار خرید این داروها در هر دوره قرار می‌دهد. محدودیت (۱۵) اجازه فروش داروهایی که عمر باقیمانده‌ی آنها بیشتر یا مساوی با me_c است را نمی‌دهد. محدودیت (۱۶)، میزان کمبود داروها در دوره‌های قبل از بحران را نسبت به مقدار بهینه‌ی موجودی این داروها محاسبه می‌کند. مطابق با محدودیت (۱۷)، موجودی داروها در یک دوره نباید بیشتر از سطح

روابط (۴۴) و (۴۵) موجودی انبارهای محلی پس از بحران از داروهای نوع A را نشان می‌دهد. در دوره اول پس از بحران، موجودی هر انبار محلی برابر است با موجودی دریافتی از انبار مرکزی منهای موجودی ارسالی از انبار محلی به بیمارستان‌ها (محدودیت (۴۴)). در سایر دوره‌ها، مطابق با محدودیت (۴۵) موجودی دوره‌های قبل نیز به عبارت نشان داده شده در (۴۴) افزوده می‌شود.

محدودیت (۴۶) امکان دریافت دارو از یک انبار توسط بیمارستان را مشروط به این می‌کند که آن انبار به عنوان انبار محلی، پشتیبان یا موقت آن بیمارستان انتخاب شده باشد. رابطه (۴۷) کمبود تقاضای بیماران در هر دوره پس از بحران و به ازای هر سناریو مشخص می‌کند.

محدودیت‌های (۴۸) و (۴۹) موجودی باقیمانده وسیله نقلیه بعد از ملاقات یک گره را به حداکثر داروی ارسالی توسط وسیله نقلیه، محدود می‌کند. محدودیت (۵۰) موجودی باقیمانده وسایل نقلیه زمانی که از انبار z به انبار z' حرکت می‌کنند را نشان می‌دهد و طبق آن، حداکثر این موجودی برابر است با موجودی باقیمانده بعد از عبور از گره z منهای مقدار داروی تحویل داده شده به گره z' . رابطه (۵۱)، به طور مشابه با (۵۰)، نشاندهی موجودی باقیمانده وسیله نقلیه خروجی از انبارها است هنگامی که آن وسیله نقلیه یک بیمارستان را طی می‌کند. محدودیت (۵۰) برای حذف زیرتور در حرکت از انبار مرکزی به انبارهای محلی و محدودیت (۵۱) برای حذف زیرتور در حرکت از انبارهای محلی به بیمارستان‌ها بکار گرفته می‌شود.

مطابق با قیود (۵۲) و (۵۳)، با تقسیم حجم محموله حمل‌شده بر گنجایش هر وسیله نقلیه، حداقل تعداد خودروهای مورد نیاز در انبار مرکزی و انبارهای محلی برای هر دوره بحران و هر سناریو محاسبه می‌گردد. محدودیت‌های (۵۴) و (۵۵)، این تعداد مورد استفاده از وسایل نقلیه را کمتر از تعداد تخصیص داده شده به انبارهای مرکزی و محلی قبل از وقوع بحران می‌کند. در نهایت، محدودیت‌های (۵۶) تا (۵۸) نوع متغیرهای تصمیم در مدل را مشخص می‌کنند.

$$\min \Pi_1(\Omega) = \sum_{j \in J} \sum_{j' \in J} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} tr_{jj'vt\Omega} \cdot M1_{jj'vtt'\Omega} + \sum_{u \in \{JUK\}} \sum_{w \in \{JUK\}} \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} tr_{uuvvt\Omega} \cdot M2_{uuvjvttt\Omega} \quad (1)$$

امکان حمل و نقل با یک نوع وسیله نقلیه از هر انبار محلی به هر بیمارستان را مجاز می‌داند و طبق محدودیت (۳۳)، از هر بیمارستان تنها یک نوع وسیله نقلیه مربوط به یک انبار محلی می‌تواند خارج شود. به عبارت دیگر، در هر دوره و هر سناریو حداکثر یک ماشین می‌تواند وارد هر بیمارستان و یا انبار محلی شود و حداکثر یک ماشین می‌تواند از آن خارج شود.

با در نظر گرفتن محدودیت‌های (۳۴) و (۳۵) امکان حمل و نقل در مسیرهایی که به علت بحران مسدود شده‌اند، وجود ندارد. محدودیت (۳۶) ارسال کالا از انبار مرکزی به یک انبار محلی را منوط به فعال شدن یک یال برای وسایل نقلیه انبار مرکزی می‌کند. رابطه‌ی مشابه‌ای در محدودیت (۳۷) امکان ارسال کالا از یک انبار محلی به بیمارستان‌ها را در نظر می‌گیرد.

محدودیت (۳۸) نشان می‌دهد که درصد موجودی باقیمانده‌ی انبار مرکزی یا به بیمارستان‌ها منتقل می‌شود و یا در انتها به عنوان محصول مازاد به حساب می‌آید. برای انبارهای محلی، رابطه (۳۹) محدودیتی مشابه با (۳۸) را ارائه می‌دهد.

محدودیت (۴۰) موجودی انبار مرکزی از داروها در اولین دوره بعد از بحران را نشان می‌دهد که برابر است با موجودی باقیمانده قبل از بحران منهای میزان دارویی که در آن دوره به سایر انبارهای محلی ارسال می‌شود. برای سایر دوره‌های بحران، محدودیت موجودی انبار مرکزی به صورت رابطه (۴۱) تعریف می‌شود و موجودی باقیمانده از دوره‌های قبل را منهای موجودی ارسالی به سایر انبارها در دوره جاری می‌کند. محدودیت (۴۲) موجودی داروهای نوع B در اولین دوره پس از بحران در انبارهای محلی را نشان می‌دهد که میزان آن برابر است با موجودی باقیمانده دوره قبل بحران به علاوه داروی دریافتی از انبار مرکزی منهای داروی ارسالی در آن دوره به بیمارستان‌ها. برای سایر دوره‌ها، موجودی انبارهای محلی از داروی نوع B برابر است با موجودی باقیمانده از دوره قبل بعلاوه مقدار دریافتی از انبار مرکزی در آن دوره منهای موجودی ارسالی به بیمارستان‌ها در آن دوره (محدودیت (۴۳)).

$$\min \Pi_2(\Omega) = - \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} ac_{cj\Omega} \cdot y_j \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} \min \Pi_3(\Omega) = & \sum_{j \in \{1, \dots, |J|\}} FJ_j \cdot y_j + \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} (CC1_{cj} \cdot z1_{cj} + CC2_{cj} \cdot z2_{cj} + CC3_{cj} \cdot z3_{cj}) \quad (۳) \\ & + \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} PSd_c \cdot E_{cjt} + \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T'} PS_c \cdot w_{kctt'\Omega} - \sum_{c \in C} \sum_{e_c \in E_c} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} IP_{c,e_c} \cdot K_{cj e_c t} \\ & + \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} H_c \cdot S_{cjt\Omega} + \sum_{c \in C} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} CP_c \cdot G_{cjt} + \sum_{v \in V} \sum_{j \in J} FV_v \cdot N_{jv} \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} MV_{v,t} \cdot N_{jv} \end{aligned}$$

s.t.

$$\sum_{j \in J \setminus 0} a1_{jk} \cdot U1_{kj} = 1 \quad \forall k \in K \quad (۴)$$

$$\sum_{j \in J \setminus 0} a2_{jk} \cdot U2_{kj} = 1 \quad \forall k \in K \quad (۵)$$

$$\sum_{j \in J \setminus 0} a3_{jk} \cdot U3_{kj\Omega} = 1 \quad \forall k \in K, \Omega \in \Psi \quad (۶)$$

$$U1_{kj} + U2_{kj} + U3_{kj\Omega} \leq 1 \quad \forall k \in K, j \in J \setminus 0, \Omega \in \Psi \quad (۷)$$

$$ds_{kj} \cdot U1_{kj} \leq ds_{kj'} + BM(1 - U2_{kj'}) \quad \forall j, j' \in J \setminus 0, k \in K \quad (۸)$$

$$ds_{kj} \cdot U2_{kj} \leq ds_{kj'} + BM \cdot (1 - U3_{kj'\Omega}) \quad \forall j, j' \in J \setminus 0, k \in K, \Omega \in \Psi \quad (۹)$$

$$\sum_{k \in K} U1_{kj} + \sum_{k \in K} U2_{kj} + \sum_{\Omega \in \Psi} \sum_{k \in K} U3_{kj\Omega} \leq BM \cdot y_j \quad \forall j \in J \setminus 0 \quad (۱۰)$$

$$I1_{\alpha j e_{\alpha t}} = 0 \quad \forall \alpha \in A, j \in \{1, \dots, |J|\}, e_{\alpha} \in E_{\alpha}, t \in T \quad (۱۱)$$

$$G_{\alpha jt} = 0 \quad \forall \alpha \in A, j = \{1, \dots, |J|\}, t \in T \quad (۱۲)$$

$$I1_{cj(e_c-1)(t+1)} = I1_{cj e_c t} - K_{cj e_c t} \quad \forall j \in J, c \in C, t \in \{1, \dots, |T| - 1\}, e_c = \{2, \dots, |E_c|\} \quad (۱۳)$$

$$I1_{cj(|E_c|)t} = G_{cjt} \quad \forall c \in C, j \in J, t \in \{1, \dots, T\} \quad (۱۴)$$

$$K_{cj e_c t} = 0 \quad \forall c \in C, j \in J, e_c \in \{me_c, \dots, |E_c|\}, t \in T \quad (۱۵)$$

$$E_{cjt} = G_{cj1} - \sum_{e_c \in E_c} I1_{cj e_c t} \quad \forall c \in C, j \in J, t \in T \quad (۱۶)$$

$$\sum_{e_c \in E_c} I1_{cj e_c t} \leq G_{cj1} \quad \forall c \in C, j \in J, t \in T \quad (۱۷)$$

$$\sum_{j \in J} G_{cj1} \leq e_c \quad \forall c \in C \quad (۱۸)$$

$$G_{cj1} \leq Cap1_{cj} \cdot z1_{cj} + Cap2_{cj} \cdot z2_{cj} + Cap3_{cj} \cdot z3_{cj} \quad \forall c \in C, j \in J \quad (۱۹)$$

$$z1_{cj} + z2_{cj} + z3_{cj} = y_j \quad \forall c \in C, j \in J \quad (۲۰)$$

$$\sum_{j' \in J} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T'} \sum_{\Omega \in \Psi} (M1_{jj'rvtt'\Omega} + M1_{j'jvtt'\Omega}) \leq BM \cdot y_j \quad \forall j \in J \quad (۲۱)$$

$$\sum_{u \in \{KUJ\}} \sum_{w \in \{KUJ\}} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T'} \sum_{\Omega \in \Psi} M2_{uwjvtt'\Omega} \leq BM \cdot y_j \quad \forall j \in J \setminus 0 \quad (۲۲)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} M1_{ojvtt'\Omega} \leq 1 \quad \forall v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} M1_{jovtt'\Omega} = \sum_{j=1}^{|J|} M1_{ojvtt'\Omega} \quad \forall v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (24)$$

$$\sum_{\substack{j'=0 \\ j' \neq j}}^{|J|} M1_{jj'vtt'\Omega} - \sum_{\substack{j'=0 \\ j' \neq j}}^{|J|} M1_{j'jvtt'\Omega} = 0 \quad \forall j \in J \setminus 0, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (25)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{v \in V} M1_{j'jvtt'\Omega} \leq 1 \quad \forall j \in J \setminus 0, \forall t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (26)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{v \in V} M1_{jj'vtt'\Omega} \leq 1 \quad \forall j \in J \setminus 0, \forall t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (27)$$

$$\sum_{k \in K} M2_{jkjvtt'\Omega} \leq 1 \quad \forall j \in J \setminus 0, \forall v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (28)$$

$$\sum_{k \in K} M2_{kjjvtt'\Omega} = \sum_{k \in K} M2_{jkjvtt'\Omega} \quad \forall j \in J \setminus 0, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (29)$$

$$\sum_{u \in \{K \cup J\}} M2_{ukjvtt'\Omega} - \sum_{u \in \{K \cup J\}} M2_{kujvtt'\Omega} = 0 \quad \forall j \in J \setminus 0, k \in K, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (30)$$

$$\sum_{u \in \{K \cup J\}} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T'} (M2_{ukjvtt'\Omega} + M2_{kujvtt'\Omega}) \leq BM \cdot (U1_{kj} + U2_{kj} + U3_{kj}) \quad \forall k \in K, j \in J, \Omega \in \Psi \quad (31)$$

$$\sum_{u \in \{K \cup J\}} \sum_{v \in V} M2_{uuvjvtt'\Omega} \leq 1 \quad \forall u' \in \{K \cup J\}, j \in J, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (32)$$

$$\sum_{u \in \{K \cup J\}} \sum_{v \in V} M2_{urujvtt'\Omega} \leq 1 \quad \forall u' \in \{K \cup J\}, j \in J, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (33)$$

$$M1_{jj'vtt'\Omega} \leq ar_{jj't'\Omega} \quad \forall j, j' \in J, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (34)$$

$$M2_{uuvjvtt'\Omega} \leq ar_{uuvt'\Omega} \quad \forall u, u' \in \{J \cup K\}, j \in J \setminus 0, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (35)$$

$$\sum_{c \in C} x1_{cjvtt'\Omega} \leq BM \cdot \sum_{j \in J} M1_{j'jvtt'\Omega} \quad \forall j \in J \setminus 0, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (36)$$

$$\sum_{c \in C} x2_{ckjvtt'\Omega} \leq BM \cdot \sum_{u \in \{J \cup K\}} M2_{ukjvtt'\Omega} \quad \forall k \in K, j \in J \setminus 0, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (37)$$

$$\sum_{e_c \in E_c} ac_{c0\Omega} \cdot I1_{c0e_c t} = \sum_{j \in J \setminus 0} \sum_{v \in V} \sum_{t' \in T'} x1_{cjvtt'\Omega} + S_{c0t\Omega} \quad \forall c \in C, t \in T, \Omega \in \Psi \quad (38)$$

$$\sum_{e_c \in E_c} ac_{cj\Omega} \cdot I1_{cje_c t} + \sum_{\substack{v \in V \\ t \in T}} \sum_{t' \in T'} x1_{cjvtt'\Omega} = \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} \sum_{t' \in T'} x2_{ckjvtt'\Omega} + S_{cjt\Omega} \quad \forall c \in C, j \in J \setminus 0, \Omega \in \Psi \quad (39)$$

$$I2_{c0tt'\Omega} = \sum_{e_c \in E_c} ac_{c0\Omega} \cdot I1_{c0e_c t} - \sum_{j \in J \setminus 0} \sum_{v \in V} x1_{cjvtt'\Omega} \quad \forall c \in C, t' = 1, t \in T, \Omega \in \Psi \quad (40)$$

$$I2_{c0tt'\Omega} = I2_{c0t(t-1)\Omega} - \sum_{j \in J \setminus 0} \sum_{v \in V} x1_{cjvtt'\Omega} \quad \forall c \in C, t' \in \{2, \dots, T'\}, t \in T, \Omega \in \Psi \quad (41)$$

$$I2_{\beta jtt'\Omega} = \sum_{e_\beta \in E_\beta} ac_{\beta j\Omega} \cdot I1_{\beta je_\beta t} + \sum_{v \in V} x1_{\beta jvtt'\Omega} - \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} x2_{\beta k jvtt'\Omega} \quad \forall \beta \in B, t' = 1, t \in T, j = \{1, \dots, J\}, \Omega \in \Psi \quad (42)$$

$$I2_{\beta jtt'\Omega} = I2_{\beta jt(t-1)\Omega} + \sum_{v \in V} x1_{\beta jvtt'\Omega} - \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} x2_{\beta kvtt'\Omega} \quad \forall \beta \in B, t' = \{2, \dots, |T'|\},$$

$$t \in T, j = \{1, \dots, J\}, \Omega \in \Psi \quad (43)$$

$$I2_{\alpha jtt'\Omega} = \sum_{v \in V} x1_{\alpha jvtt'\Omega} - \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} x2_{\alpha kvtt'\Omega} \quad \forall \alpha \in A, t' = 1, t \in T, j = \{1, \dots, J\}, \quad \Omega \in \Psi \quad (44)$$

$$I2_{\alpha jtt'\Omega} = I2_{\alpha jt(t-1)\Omega} + \sum_{v \in V} x1_{\alpha jvtt'\Omega} - \sum_{k \in K} \sum_{v \in V} x2_{\alpha kvtt'\Omega} \quad \forall \alpha \in A, t' = \{2, \dots, |T'|\},$$

$$t \in T, j = \{1, \dots, J\}, \Omega \in \Psi \quad (45)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T'} x2_{ckjvtt'\Omega} \leq BM(U1_{kj} + U2_{kj} + U3_{kj\Omega}) \quad \forall j \in J \setminus 0, k \in K, \Omega \in \Psi \quad (46)$$

$$W_{kctt'\Omega} = D_{ckt\Omega} - \sum_{j \in J} \sum_{v \in V} x2_{ckjvtt'\Omega} \quad \forall k \in K, c \in C, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (47)$$

$$\rho1_{jvtt'\Omega} \leq \sum_{c \in C} \sum_{j' \in J \setminus 0} x1_{cj'vtt'\Omega} \quad \forall j \in \{1, \dots, |J|\}, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (48)$$

$$\rho2_{ujvtt'\Omega} \leq \sum_{c \in C} \sum_{k \in K} x2_{ckjvtt'\Omega} \quad \forall u \in \{J \cup K\}, j \in J \setminus 0, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (49)$$

$$\rho1_{jvtt'\Omega} - \sum_{c \in C} x1_{cj'vtt'\Omega} + (1 - M1_{jj'vtt'\Omega}) \cdot BM \geq \rho1_{j'vtt'\Omega} \quad \forall j, j' \in J, j \neq j', v \in V,$$

$$t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (50)$$

$$\rho2_{ujvtt'\Omega} - \sum_{c \in C} x2_{ckjvtt'\Omega} + (1 - M2_{ukjvtt'\Omega}) \cdot BM \geq \rho2_{kvtt'\Omega}$$

$$\forall j \in \{1, \dots, |J|\}, u \in \{J \cup K\}, k \in K, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (51)$$

$$L1_{vtt'\Omega} \geq \frac{1}{Q_v} \sum_{j' \in J \setminus 0} \sum_{c \in C} x1_{cj'vtt'\Omega} \quad \forall v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (52)$$

$$L2_{jvtt'\Omega} \geq \frac{1}{Q_v} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} x2_{ckjvtt'\Omega} \quad \forall j \in J \setminus 0, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (53)$$

$$L1_{vtt'\Omega} \leq N_{ov} \quad \forall v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (54)$$

$$L2_{jvtt'\Omega} \leq N_{jv} \quad \forall j \in J \setminus 0, v \in V, t \in T, t' \in T', \Omega \in \Psi \quad (55)$$

$$y_j, z1_{cj}, z2_{cj}, z3_{cj}, U1_{kj}, U2_{kj}, U3_{kj\Omega}, M1_{jj'vtt'\Omega}, M2_{uu'jvtt'\Omega} \in \{0, 1\} \quad (56)$$

$$K_{c_j e_c t}, I1_{c_j e_c t}, G_{cjt}, E_{cjt}, I2_{cjtt'\Omega}, x1_{cjvtt'\Omega}, x2_{cj'vtt'\Omega}, S_{j\beta t}, W_{kctt'\Omega}, \rho1_{jvtt'\Omega}, \rho2_{ujvtt'\Omega} \geq 0 \quad (57)$$

$$N_{jv}, L1_{vtt'\Omega}, L2_{jvtt'\Omega} \in Z^+ \quad (58)$$

۳-۳-۳- روش حل

۳-۳-۱- بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو

با توجه به عدم قطعیت در پارامترهایی نظیر تقاضا، وضعیت انبارها و دسترسی به مسیرها، رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو (Mulvey et al., 1995) برای حل مدل پیشنهادی به کار گرفته می‌شود. این رویکرد بر خلاف برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای که تنها به بهینه‌سازی مقدار متوسط پاسخ در سناریوهای مختلف می‌پردازد، انحراف جواب‌ها از مقدار متوسط و نیز جریمه نقض محدودیت‌ها را نیز در تابع هدف لحاظ می‌کند. بدین

برای حل مدل چندهدفه و غیرقطعی ارائه‌شده، از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو (Mulvey et al., 1995) استفاده می‌شود. همچنین، به منظور تبدیل سه تابع هدف (کاهش زمان خدمت‌رسانی، کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان) به یک تابع هدف واحد، روش مجموع وزنی با نرمالسازی به کار گرفته می‌شود. نهایتاً، حل مدل با استفاده از نرم‌افزار گمز انجام می‌پذیرد.

۳-۳-۲- تبدیل مدل چندهدفه به تک‌هدفه

مدل معرفی شده در روابط (۱) تا (۵۸)، یک مدل چند هدفه و غیرقطعی است که با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای رویدادهای غیرقطعی، ارائه شده است. به منظور حل این مدل چند هدفه و تبدیل مسئله در قالب مدل ارائه شده در رابطه (۶۲)، با در نظر گرفتن وزن یا اهمیت w_i برای تابع هدف i ام، به کمک رویکرد مجموع وزنی، یک تابع هدف واحد مطابق رابطه زیر برای هر سناریو تعریف می‌گردد.

$$z_{\Omega} = \sum_{i=1}^3 w_i \cdot \Pi_i(\Omega) \quad (63)$$

باید توجه داشت که به منظور رفع مشکل اختلاف ابعاد و مقیاس در ترکیب توابع هدف، از رابطه زیر استفاده می‌گردد.

$$\Pi_i(\Omega) = \frac{\Pi_i(\Omega) - \Pi_i^*(\Omega)}{\Pi_i^{nadir}(\Omega) - \Pi_i^*(\Omega)}, \quad \forall i \quad (64)$$

که در آن، $\Pi_i^*(\Omega)$ بیانگر مقدار تابع هدف i در سناریو Ω به ازای حل ایده‌آل و همچنین، $\Pi_i^{nadir}(\Omega)$ بیانگر مقدار تابع هدف i در سناریو Ω به ازای حل ندر (یا حل ضد ایده‌آل) است.

خطای مدل معرفی شده، متغیر $w_{kctt\Omega}$ است. در نتیجه، داریم: $w_{kctt\Omega} = \varepsilon_{kctt\Omega}$ و $\varepsilon_{kctt\Omega} = \xi_{kctt\Omega}^+$ و $\xi_{kctt\Omega}^-$. بنابراین، تابع هدف استوار مبتنی بر برنامه‌ریزی تصادفی، به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود که در صدد کمینه کردن آن هستیم.

$$\sum_{\Omega \in \Psi} P_{\Omega} \cdot z_{\Omega} + \sum_{\Omega \in \Psi} P_{\Omega} \cdot (\Gamma_{\Omega}^+ + \Gamma_{\Omega}^-) + \sum_{\Omega \in \Psi} \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T'} P_{\Omega} \times (\xi_{kctt\Omega}^+ + \xi_{kctt\Omega}^-) \quad (65)$$

رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو که در این پژوهش استفاده شده است، اولین بار توسط (Mulvey et al., 1995) معرفی گردید. در سال‌های اخیر، این رویکرد در مسائل زنجیره تامین با عدم قطعیت گسترش یافته است. برای مثال، پیشوایی و همکاران (Pishvae et al., 2012)، یک رویکرد برنامه‌ریزی امکانی استوار برای طراحی شبکه زنجیره تامین با مسئولیت اجتماعی ارائه کردند که پایه‌های روش‌شناسی مورد استفاده در این پژوهش را شکل می‌دهد.

ترتیب، جواب نهایی از پایداری و استواری بیشتری در مواجهه با تحقق سناریوهای مختلف برخوردار خواهد بود. به منظور توضیح این روش، مدل استاندارد زیر را در نظر بگیرید.

$$\begin{aligned} \min & fy + cx \\ \text{s. t.} & Ax = b \\ & By + Dx \geq 0 \\ & y \in \{0,1\}, \quad x \in R^+ \end{aligned} \quad (59)$$

با مشخص کردن سناریوهای غیرقطعی با علامت Ω و مقدار پارامترهای غیرقطعی، مدل فوق به ازای هر سناریو به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \min & z_{\Omega} = fy + c_{\Omega}x_{\Omega} \\ \text{s. t.} & Ay = b \\ & B_{\Omega}y + D_{\Omega}x_{\Omega} \geq 0 \\ & y \in \{0,1\}, \quad x_{\Omega} \in R^+ \end{aligned} \quad (60)$$

مدل بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو نیز به شرح زیر تعریف می‌شود.

$$\begin{aligned} \min & \sum_{\Omega \in \Psi} p_{\Omega} \cdot z_{\Omega} \\ & + \lambda \sum_{\Omega \in \Psi} p_{\Omega} |z_{\Omega} - \sum_{\Omega' \in \Psi} p_{\Omega'} z_{\Omega'}| \\ & + \sum_{\Omega \in \Psi} p_{\Omega} \cdot |\varepsilon_{\Omega}| \\ \text{s. t.} & Ay = b \\ & B_{\Omega}y + D_{\Omega}x_{\Omega} + \varepsilon_{\Omega} \geq 0 \\ & y \in \{0,1\}, \quad x_{\Omega} \in R^+ \end{aligned} \quad (61)$$

که در آن، قسمت اول تابع هدف، متوسط هزینه‌های مدل را تشکیل می‌دهد، قسمت دوم، میزان انحراف در جواب سناریوهای مختلف را حداقل می‌کند و قسمت سوم، حداقل کردن خطای مدل نسبت به سناریوهای مختلف را هدف قرار می‌دهد. با خطی سازی عبارات شامل قدر مطلق، معادل خطی مدل فوق، به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \min & \sum_{\Omega \in \Psi} p_{\Omega} \cdot z_{\Omega} + \lambda \sum_{\Omega \in \Psi} p_{\Omega} \cdot (\Gamma_{\Omega}^+ + \Gamma_{\Omega}^-) \\ & + \sum_{\Omega \in \Psi} p_{\Omega} \cdot (\xi_{\Omega}^+ + \xi_{\Omega}^-) \\ \text{s. t.} & \varepsilon_{\Omega} = \xi_{\Omega}^+ - \xi_{\Omega}^- \\ & \Gamma_{\Omega}^+ - \Gamma_{\Omega}^- = (z_{\Omega} - \sum_{\Omega' \in \Psi} p_{\Omega'} z_{\Omega'}) \\ & Ay = b \\ & B_{\Omega}y + D_{\Omega}x_{\Omega} + \varepsilon_{\Omega} \geq 0 \\ & y \in \{0,1\}, \quad x_{\Omega} \in R^+ \end{aligned} \quad (62)$$

در ادامه، مفاهیم مربوط به الگوریتم، بیان شده و عملگرهای مختلف آن، متناسب با مدل تحقیق، تشریح می‌شود.

۳-۴-۱- مقاردهی اولیه

پارامترهای اولیه مورد نیاز برای راه‌اندازی الگوریتم عبارتند از: حجم جمعیت اولیه ($popsiz$), احتمال اعمال تقاطع (P_c), احتمال اعمال جهش (P_m) و شرط خاتمه الگوریتم.

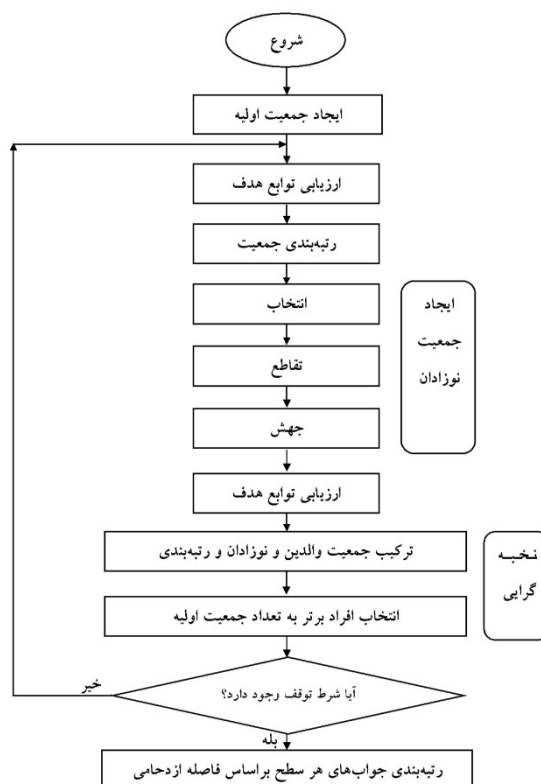
۳-۴-۲- کروموزوم

هر کروموزوم، نمایانگر یک جواب بالقوه برای مسئله بوده و نحوه مقاردهی متغیرهای مدل را مشخص می‌کند. در تحقیق حاضر، کروموزوم مربوط به هر جواب، از چهار قسمت تشکیل می‌شود. قسمت اول، یک ماتریس سه بعدی (A) است که بعد اول مربوط به مکان‌های بالقوه برای احداث انبار، بعد دوم مربوط به انواع وسایل نقلیه و بعد سوم مربوط به بیمارستان‌ها است. این ماتریس، برای تخصیص انبارهای محلی، پشتیبان و موقت به بیمارستان‌ها و همچنین تخصیص بیمارستان‌ها به تور مربوط به انواع وسایل نقلیه در نظر گرفته شده است. در تولید جواب‌های اولیه، عناصر این ماتریس به صورت تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود. سپس بزرگترین درایه ماتریس A را مشخص می‌کنیم. فرض می‌کنیم که این درایه به صورت $A_{j,v,k}$ باشد. در صورتی که بیمارستان k در شعاع پوشش انبار j باشد، آنگاه انبار j به عنوان انبار محلی بیمارستان k تخصیص می‌یابد و به تور وسیله نقلیه v خروجی از انبار j بیمارستان k اضافه می‌شود (این عمل به ترتیب انجام می‌شود تا مسیریابی تور مربوط به وسیله نقلیه v انبار j نیز مشخص گردد) و اگر انبار محلی j در لیست انبارهای محلی فعال شده قرار نداشته باشد، آن را در جواب جاری فعال می‌کنیم. در غیر اینصورت، دومین عدد بزرگ ماتریس A را مشخص می‌کنیم و رویه فوق را مجدداً انجام می‌دهیم. در هر تکرار این رویه، وقتی عنصر $A_{j,v,k}$ به عنوان بزرگترین عنصر از میان عناصر باقیمانده ماتریس A انتخاب می‌شود، بررسی می‌کنیم که آیا برای بیمارستان k تاکنون انبار محلی، یا انبار پشتیبان و یا انبار موقت انتخاب شده یا خیر. اگر انبار محلی تاکنون انتخاب شده باشد، تخصیص انبار پشتیبان را برای این بیمارستان

۳-۴- الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب

با توجه به NP-hard بودن مسئله، روش دقیق یادشده در بخش ۳-۳ تنها برای ابعاد کوچک قابل اجراست. از این‌رو، در این بخش یک الگوریتم فراابتکاری برای حل مدل در ابعاد بزرگ ارائه می‌شود. از بین الگوریتم‌های فراابتکاری برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA-II)، روش بسیار کارآمدی است که در این مقاله به منظور حل مدل پیشنهادی از آن استفاده می‌شود.

الگوریتم NSGA-II به گونه‌ای طراحی شده که همزمان دو ویژگی نخبه‌گرایی و تنوع پراکندگی را حفظ کند. در این روش، نخست جمعیتی از فرزندان با استفاده از جمعیت والدین تولید می‌شود که اندازه هر دو جمعیت برابر N است. سپس این دو جمعیت با یکدیگر ترکیب شده و جمعیتی به اندازه $2N$ حاصل می‌شود (Deb et al., 2002). این جمعیت ترکیبی با استفاده از روش مرتب‌سازی سریع نامغلوب، طبقه‌بندی می‌گردد. در نهایت، جمعیت جدید نسل بعد از میان بهترین اعضا، به تعداد N انتخاب می‌شود. هر طبقه از اعضای دسته‌بندی‌شده، یک جبهه نامیده می‌شود. شکل ۲، فلوچارت این الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم NSGA-II.

Figure 2. Flowchart of the NSGA-II algorithm.

جدول ۳ تولید می‌شود. با رمزگشایی از قسمت دوم کروموزوم، مسیریابی از انبار مرکزی به سایر انبارها طبق جدول ۴ به دست می‌آید.

قسمت سوم کروموزوم، یک ماتریس دو بعدی (C) است که سطرهای آن داروها و ستون‌های آن انبارها است. این قسمت از کروموزوم برای تخصیص ظرفیت به انبارها در نظر گرفته شده است. همانطور که توضیح داده شد، سه سطح ظرفیت برای انبارها ارائه شده بود. از این رو، در تولید جواب‌های اولیه برای ظرفیت انبارهای مربوط به یک نوع دارو، یک عدد تصادفی بین ۱ تا ۳ برای انبارها (در صورت فعال شدن) تولید شده و سپس این عدد به عنوان سطح ظرفیت انبار برای دارو انتخاب می‌شود. این قسمت از کروموزوم نیز برای مسئله مورد مطالعه طبق جدول ۵ به صورت تصادفی تولید می‌شود.

آخرین قسمت کروموزوم نیز یک ماتریس دو بعدی (D) است که سطرهای آن انبارها و ستون‌های آن انواع وسیله نقلیه است. این قسمت بیانگر تعداد وسایل نقلیه تخصیص یافته از هر نوع به انبارها است. در اینجا نیز برای هر انبار و هر نوع وسیله نقلیه یک عدد تصادفی بین ۱ تا آستانه تعیین شده (با توجه به ظرفیت شبکه لجستیک در فراهم کردن وسیله نقلیه) تولید می‌شود. سپس این عدد به عنوان تعداد وسیله نقلیه تخصیص داده شده به انبار در نظر گرفته می‌شود. این قسمت از کروموزوم نیز برای مسئله مورد مطالعه به صورت تصادفی طبق جدول ۶ تولید می‌شود.

با مشخص شدن هر کروموزوم یا هر جواب مطابق با رویه‌ی توضیح داده شده در بالا، متغیرهای مربوط به مسیریابی (M_1 و M_2)، متغیرهای مربوط به تعداد وسایل نقلیه (N) و متغیرهای مربوط به فعال شدن انبارهای محلی و سطح ظرفیت آنها نیز از مدل حذف می‌شود. از سوی دیگر، به جای متغیرهای L_1 و L_2 با اعمال یک تقریب ناچیز، x_1/Q و x_2/Q را جایگزین می‌کنیم و با حذف محدودیت‌های مربوطه، مدل حاصل به یک مدل خطی با تعداد متغیرها و محدودیت‌های بسیار کمتر تبدیل می‌شود. با حل این مدل، تابع هدف دوم و سوم مشخص می‌شود. سپس برای تعیین تابع هدف اول یعنی مسیریابی، ماتریس‌های A و B مربوط به هر جواب همانطور که توضیح داده شد، در نظر گرفته می‌شود.

انجام می‌دهیم و اگر تخصیص انبار پشتیبان نیز تاکنون انجام شده باشد، تخصیص انبار موقت به آن را دنبال می‌کنیم. در هر صورت، مراحل فوق تا آنجا ادامه می‌شود که برای همه بیمارستان‌ها، همه انبارهای محلی، پشتیبان و موقت انتخاب گردد و این بیمارستان به تور وسایل نقلیه‌ی انبار تخصیص داده شده، اضافه گردد. از سوی دیگر، تخصیص نهایی حاصل به مدل برنامه‌ریزی خطی که در ادامه توضیح داده می‌شود، ارسال می‌شود تا در صورت عدم تخصیص یک وسیله نقلیه از یک انبار به یک بیمارستان، متغیر x_2 مربوطه برابر صفر قرار داده شود (به عنوان یک محدودیت مدل خطی).

در ادامه، برای مثال، جزئیات یک کروموزوم برای مسئله‌ای متشکل از یک انبار مرکزی (انبار ۱)، ۵ مکان بالقوه برای احداث انبار (انبار ۲ تا ۶) و ۳ بیمارستان شرح داده می‌شود. عناصر قسمت اول کروموزوم، به صورت تصادفی بین صفر و یک، طبق جدول ۱ تولید می‌شود. با رمزگشایی از قسمت اول کروموزوم، تخصیص انبارهای محلی، پشتیبان و موقت به بیمارستان‌ها و مسیریابی از این انبارها به بیمارستان‌ها طبق جدول ۲ به دست می‌آید. همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، از میان ۵ مکان بالقوه، انبارهای ۳، ۴، ۵ و ۶ فعال شده‌اند.

قسمت دوم جواب، یک ماتریس دو بعدی (B) است که سطرهای آن انبارهای محلی و ستون‌های آن انواع وسایل نقلیه است. این قسمت از جواب مربوط به تخصیص وسایل نقلیه از انبار مرکزی به انبارهای محلی و همچنین تخصیص انبارهای محلی به تور مربوط به انواع وسایل نقلیه است. عناصر ماتریس B به صورت تصادفی بین صفر و یک تولید می‌شود. در اینجا نیز اولویت تخصیص بدین صورت است که هر چه قدر مقدار عنصر B بزرگتر باشد اولویت بیشتری دارد. پس از تخصیص یک انبار به وسایل نقلیه، وسیله نقلیه‌ی دیگری به انبار تخصیص نمی‌یابد. به عبارت دیگر، مطابق با محدودیت‌های تحقیق، به هر انبار محلی حداکثر یک نوع وسیله نقلیه ارسال می‌شود. نکته قابل ذکر این است که اگر مطابق با مرحله قبل، یک انبار محلی برای ارسال کالا به بیمارستان‌ها فعال نشده باشد، در این قسمت آن را در تور وسایل نقلیه از انبار مرکزی قرار نمی‌دهیم. عناصر قسمت دوم کروموزوم برای مسئله مورد مطالعه، به صورت تصادفی بین صفر و یک، طبق

جدول ۱. قسمت اول کروموزوم (ماتریس A)

Table 1. First part of the chromosome (Matrix A)

بیمارستان ۱	وسیله نقلیه ۱	وسیله نقلیه ۲	وسیله نقلیه ۳
انبار ۲	۰/۲۱۲۸	۰/۰۲۴۹	۰/۷۴۲۹
انبار ۳	۰/۴۴۶۴	۰/۹۹۹۱	۰/۱۰۹۳
انبار ۴	۰/۳۸۶۶	۰/۲۸۳۱	۰/۸۶۶۶
انبار ۵	۰/۷۷۴۶	۰/۷۶۷۸	۰/۸۲۱۵
انبار ۶	۰/۴۷۴۲	۰/۰۳۵۱	۰/۰۰۳۸
بیمارستان ۲	وسیله نقلیه ۱	وسیله نقلیه ۲	وسیله نقلیه ۳
انبار ۲	۰/۶۳۲۴	۰/۶۷۹۹	۰/۳۹۱۷
انبار ۳	۰/۲۱۰۵	۰/۹۷۱۷	۰/۷۶۳۳
انبار ۴	۰/۴۳۴۹	۰/۴۳۵۴	۰/۱۰۰۱
انبار ۵	۰/۹۳۳۱	۰/۲۳۸۰	۰/۲۲۳۹
انبار ۶	۰/۴۵۷۳	۰/۸۸۷۴	۰/۱۰۲۵
بیمارستان ۳	وسیله نقلیه ۱	وسیله نقلیه ۲	وسیله نقلیه ۳
انبار ۲	۰/۵۱۶۹	۰/۵۶۱۴	۰/۰۸۷۵
انبار ۳	۰/۲۵۸۷	۰/۹۶۸۷	۰/۶۸۵۹
انبار ۴	۰/۰۳۳۹	۰/۷۵۲۵	۰/۸۱۰۵
انبار ۵	۰/۷۴۹۷	۰/۹۴۹۳	۰/۱۵۰۸
انبار ۶	۰/۵۴۱۷	۰/۷۳۸۸	۰/۳۱۳۸

جدول ۲. رمزگشایی قسمت اول کروموزوم

Table 2. Decoding of chromosome part 1

بیمارستان	انبار محلی	انبار پشتیبان	انبار موقت
۱	۳	۴	۵
۲	۳	۵	۶
۳	۳	۵	۴
انبار	وسیله نقلیه ۱	وسیله نقلیه ۲	وسیله نقلیه ۳
انبار ۲	[]	[]	[]
انبار ۳	[]	[بیمارستان ۱، ۲ و ۳]	[]
انبار ۴	[]	[]	[بیمارستان ۱ و ۳]
انبار ۵	[بیمارستان ۲]	[بیمارستان ۳]	[بیمارستان ۱]
انبار ۶	[]	[بیمارستان ۲]	[]

جدول ۳. قسمت دوم کروموزوم (ماتریس B)

Table 3. Second part of the chromosome (Matrix B)

انبار	وسیله نقلیه ۱	وسیله نقلیه ۲	وسیله نقلیه ۳
انبار ۲	۰/۷۰۳۶	۰/۵۷۷۲	۰/۶۸۹۶
انبار ۳	۰/۵۹۶۱	۰/۶۰۰۹	۰/۹۸۵۶
انبار ۴	۰/۰۵۴۴	۰/۱۳۶۰	۰/۲۴۶۹
انبار ۵	۰/۹۷۱۲	۰/۰۳۴۹	۰/۷۶۶۳
انبار ۶	۰/۵۷۴۴	۰/۴۱۳۸	۰/۶۶۶۷

جدول ۴. رمزگشایی قسمت دوم کروموزوم

Table 4. Decoding of chromosome part 2

انبار	وسیله نقلیه ۱	وسیله نقلیه ۲	وسیله نقلیه ۳
انبار ۱ (مرکزی)	[انبار ۲ و ۵]	[]	[انبار ۳، ۶ و ۴]

جدول ۵. قسمت سوم کروموزوم (ماتریس C)

Table 5. Third part of the chromosome (Matrix C)

	انبار ۱	انبار ۲	انبار ۳	انبار ۴	انبار ۵	انبار ۶
دارو ۱ (نوع A)	۲	۳	۳	۳	۱	۱
دارو ۲ (نوع B)	۳	۳	۳	۳	۳	۲

جدول ۶. قسمت چهارم کروموزوم (ماتریس D)

Table 6. Fourth part of the chromosome (Matrix D)

	وسیله نقلیه ۱	وسیله نقلیه ۲	وسیله نقلیه ۳
انبار ۱	۴	۳	۵
انبار ۲	۱	۵	۸
انبار ۳	۵	۷	۶
انبار ۴	۱۰	۳	۱
انبار ۵	۹	۹	۴
انبار ۶	۲	۲	۲

۳-۴-۴- مرتب سازی سریع نامغلوبها

رتبه بندی جمعیت براساس نامغلوبها با استفاده از مفهوم غالب و مغلوب، انجام می شود. اگر کروموزوم شماره یک نسبت به کروموزوم شماره دو، در هیچ کدام از اهداف بدتر نباشد و دست کم در یکی از اهداف اکیداً بهتر باشد، میگوییم کروموزوم یک بر کروموزوم دو غلبه می کند یا کروموزوم دو مغلوب کروموزوم یک می شود (Deb, 2011; Lobato, 2017; Gen et al., 2008).

برای رتبه بندی جمعیت N عضوی بر اساس سطوح نامغلوب، هر جواب با سایر جوابهای موجود در جمعیت مقایسه می شود تا مشخص گردد که آیا جواب مورد نظر مغلوب است یا خیر. پس از این مقایسه ها، مجموعه ای از جوابها حاصل می شوند که نسبت به یکدیگر نه غالب اند و نه مغلوب. این جوابها، اولین جبهه (مرز) نامغلوب را تشکیل می دهند. برای یافتن جوابهای واقع در جبهه های بعدی، جوابهای جبهه اول به طور موقت حذف شده و فرآیند مقایسه مجدداً تکرار می گردد (Deb et al., 2002). این روند تا زمانی ادامه می یابد که تمامی جوابهای جمعیت در جبهه های نامغلوب قرار گیرند. برای روشن تر

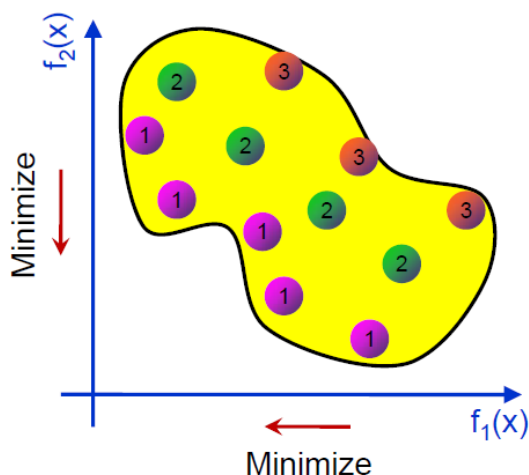
سپس، مطابق با مسیریابی و توالی تور وسایل نقلیه که در هر جواب وجود دارد، عمل می کنیم. با این وجود اگر متغیر x_1 یا x_2 مربوط به یک یال برابر صفر باشند، از آن یال صرف نظر می کنیم و به یال بعد می رویم که متغیر x_1 یا x_2 آن مخالف صفر باشد. با محاسبه مجموع زمانهای حمل و نقل در زمانها و سناریوهای مختلف، تابع هدف اول نیز به صورت مقتضی شناسایی می شود.

۳-۴-۳- ارزیابی کروموزوم

پس از تولید هر کروموزوم در الگوریتمهای ژنتیک، لازم است یک مقدار برازندگی (Fitness) برای آن محاسبه گردد. در مسائل بهینه سازی، این مقدار برازندگی همان مقادیر توابع هدف مسئله را نشان می دهد.

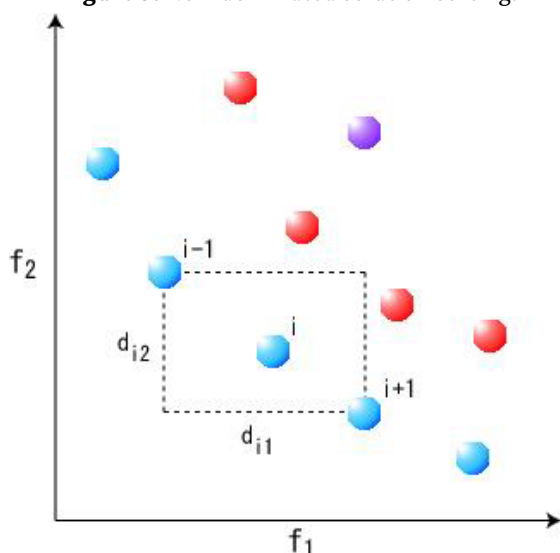
در تحقیق حاضر با حل مدل برنامه ریزی خطی، توابع هدف دوم و سوم مشخص می شود و سپس با مشخص شدن حمل و نقل یا عدم حمل و نقل از انبار مرکزی به انبارهای محلی و از انبارهای محلی به بیمارستانها و با در نظر گرفتن توالی مشخص شده در جوابهای هر عضو جمعیت، تابع هدف اول یعنی زمان حمل و نقل نیز مشخص می شود.

تعیین شده‌ای از اعضای رتبه‌بندی شده را انتخاب می‌کنیم. نهایتاً، این روند را تا رسیدن به تعداد جمعیت مورد نظر ادامه می‌دهیم.



شکل ۳. مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب.

Figure 3. Non-dominated solution sorting.



شکل ۴. محاسبه‌ی فاصله ازدحامی.

Figure 4. Crowding distance calculation.

۳-۴-۷- عملگر تقاطع

در الگوریتم ژنتیک، تقاطع مهمترین عملگر محسوب می‌شود. این فرآیند به ترکیب کروموزوم‌های نسل فعلی با یکدیگر می‌پردازد تا نسل جدیدی از کروموزوم‌ها تولید گردد. هرچند عملگر تقاطع با امکان ترکیب ژن‌های مطلوب، موجب کاهش تنوع ژنتیکی جمعیت می‌شود، اما مزیت کلیدی آن تولید فرزندان قانونمند است؛ بدین معنا که همواره کروموزوم‌های حاصل با فضای جواب مسئله سازگار بوده و هیچ جواب نامعتبری تولید نخواهد شد.

شدن موضوع، شکل ۳ نمونه‌ای از مرتب‌سازی جواب‌های نامغلوب را برای یک مسئله دوعامله با اهداف کمینه‌سازی نشان می‌دهد.

۳-۴-۵- فاصله ازدحامی

یکی از اهداف اصلی الگوریتم‌های تکاملی در مسیر دستیابی به مرز بهینه پارتو، حفظ پراکندگی و گوناگونی جواب‌ها در مجموعه نتایج حاصله است. به عبارت دیگر، در حالی که مرتب‌سازی نامغلوب فرآیندی برای یافتن جواب‌های برتر است، سازوکار تنوع نیز بر گستردگی و پخش‌شدگی این جواب‌ها تأکید دارد. در الگوریتم NSGA-II، این مهم با استفاده از معیار «فاصله ازدحامی» به شرح زیر صورت می‌گیرد.

مقدار فاصله ازدحامی برای هر جواب بر اساس میانگین فاصله آن با دو جواب همسایه در دو طرف، با توجه به مقادیر توابع هدف محاسبه می‌شود. برای تعیین این معیار برای یک جواب مشخص واقع در یک مرز نامغلوب، بزرگترین مستطیلی که آن جواب و دو همسایه آن درون آن جای می‌گیرند، در نظر گرفته می‌شود. سپس مجموع طول و عرض این مستطیل به عنوان فاصله ازدحامی آن جواب خاص در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴، نحوه محاسبه فاصله ازدحامی را برای عضو دلخواه i ام از مرزهای نامغلوب نشان می‌دهد (Deb et al., 2002).

مقدار این پارامتر برای هر عضو از هر گروه، مطابق با رابطه (۶۶) محاسبه می‌گردد و نشان‌دهنده درجه نزدیکی آن جواب به سایر اعضای جمعیت در همان گروه است. هر چه مقدار این پارامتر بزرگتر باشد، تنوع و پراکندگی بیشتری در میان اعضای جمعیت حاصل خواهد شد.

$$d(i) = \sum_{k=1}^n \frac{|f_k(i-1) - f_k(i+1)|}{|f_k^{max} - f_k^{min}|}, \quad (66)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

۳-۴-۶- استراتژی انتخاب

از روش تورنمنت برای انتخاب والدین جهت اعمال عملگرهای تقاطع و جهش و ایجاد فرزندان استفاده می‌شود. بدین منظور، در هر مرحله به تعداد از پیش تعیین شده‌ای از اعضای جمعیت انتخاب کرده و بر مبنای مقایسه آنها را رتبه‌بندی می‌کنیم. سپس، به تعداد از پیش

۳-۴-۹- انتخاب افراد برتر به تعداد جمعیت اولیه

در گام اول، تمامی فرزندان حاصل از عملگرهای تقاطع و جهش ارزیابی می‌شوند. سپس جمعیت فرزندان با جمعیت والدین ترکیب می‌گردند که در نتیجه آن، جمعیتی به اندازه دو برابر جمعیت اولیه حاصل می‌شود. در مرحله بعد، از مرتب‌سازی نامغلوب برای دسته‌بندی کل این جمعیت ترکیبی استفاده می‌گردد. در این روش، یک مقایسه سراسری میان همه اعضای مجموعه والدین و فرزندان انجام شده و پس از تشکیل جبهه‌های مختلف نامغلوب، جمعیت نسل بعد به ترتیب اولویت این جبهه‌ها (از بهترین جبهه به سمت جبهه‌های ضعیف‌تر) و به صورت یک‌یک از هر جبهه پر می‌شود. فرآیند پر کردن از بهترین جبهه نامغلوب آغاز شده و سپس به ترتیب جبهه دوم، سوم و الی آخر ادامه می‌یابد تا نسل بعد به طور کامل تشکیل شود. از آنجا که اندازه جمعیت ترکیبی (والدین بعلاوه‌ی فرزندان) دو برابر اندازه جمعیت اولیه است، ممکن است همه اعضا نتوانند در جمعیت نسل بعد جای گیرند؛ بنابراین جواب‌های اضافی به سادگی حذف می‌شوند.

شکل ۵، نحوه اعمال نخه‌گرایی در انتخاب جمعیت نسل بعد را نشان می‌دهد. برای جواب‌هایی که در آخرین جبهه قرار دارند و با استفاده از سازوکار نخه‌گرایی حذف می‌شوند، لازم است دقت بیشتری به کار رود؛ به گونه‌ای که برای رعایت اصل چگالی، جواب‌هایی با فاصله ازدحامی بیشتر حفظ گردند (Deb et al., 2002).

۳-۴-۱۰- شرط توقف الگوریتم

معیارهای مختلفی برای توقف الگوریتم قابل استفاده‌اند که مهمترین آنها عبارتند از (Deb, 2011؛ Gen et al., 2008):

- ۱) دستیابی به حداکثر تعداد تکرارها یا مراحل تکاملی تعیین‌شده؛
- ۲) حصول یک جواب قابل قبول و مطلوب؛
- ۳) عدم بهبود قابل توجه در جواب‌ها در طی تکرارهای متوالی.

۳-۴-۱۱- مقایسه با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری

انتخاب NSGA-II به عنوان الگوریتم فراابتکاری در این پژوهش، بر اساس مطالعات مقایسه‌ای پیشین است.

با توجه به تمهیدی که در نمایش جواب‌های الگوریتم ارائه شده است، عملگر تقاطعی که به کار می‌بریم به شرح زیر است. عدد تصادفی λ که بین صفر و یک است را تولید می‌کنیم. سپس فرض می‌کنیم که ماتریس A والد اول برابر A_1 و برای والد دوم برابر A_2 باشد. حال ماتریس A فرزندان اول و دوم که آنها را با A_3 و A_4 نشان می‌دهیم با استفاده از روابط ۶۷ و ۶۸ مشخص می‌شود.

$$A_3 = \lambda \cdot A_1 + (1 - \lambda) \cdot A_2 \quad (67)$$

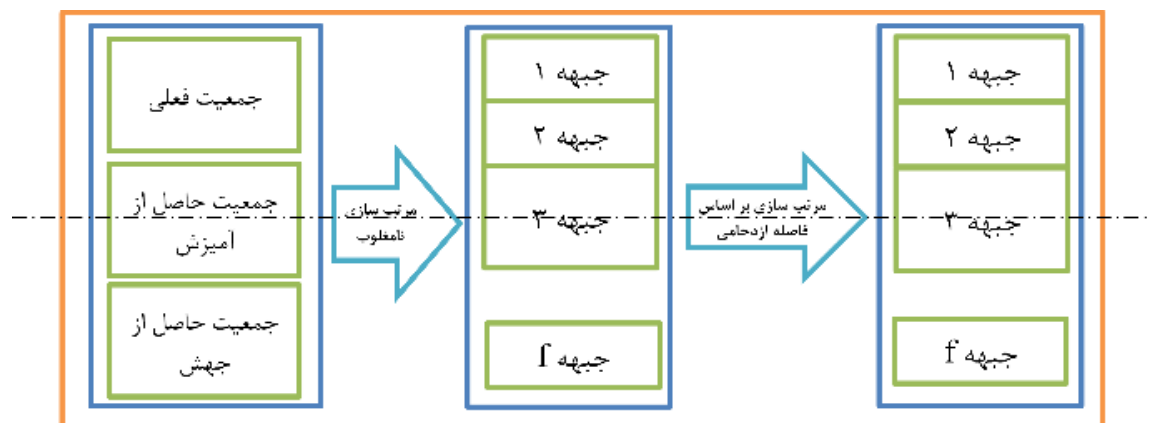
$$A_4 = (1 - \lambda) \cdot A_1 + \lambda \cdot A_2 \quad (68)$$

برای تولید ماتریس B فرزندان نیز مانند ماتریس A از روابط ۶۷ و ۶۸ استفاده می‌شود. برای اعمال عملگر تقاطع بروی قسمت سوم (ماتریس C) و چهارم (ماتریس D) کروموزوم‌های والد، نیز مانند ماتریس A عمل می‌شود، با این تفاوت که در روابط ۶۷ و ۶۸ مقدار رند شده عبارات سمت راست برای فرزندان بکار گرفته می‌شود، زیرا متغیرهای مربوط به سطح ظرفیت و همینطور تعداد وسایل نقلیه تخصیص داده شده به انبارهای محلی، متغیرهای عدد صحیح هستند.

۳-۴-۸- عملگر جهش

عملگر جهش نیز یکی دیگر از عملگرهای الگوریتم ژنتیک است که به تولید جواب‌های جدید و متنوع کمک می‌کند. در این الگوریتم، پس از ایجاد هر عضو جدید در جمعیت، هر یک از ژن‌های آن با احتمال معینی دچار تغییر (جهش) می‌شوند. جهش می‌تواند به صورت حذف یک ژن از مجموعه ژن‌های جمعیت یا افزودن ژنی که پیشتر در جمعیت وجود نداشته، ظاهر شود. به طور کلی، جهش یک ژن به معنای تغییر مقدار آن است. روش‌های مختلفی برای اعمال جهش وجود دارد که بسته به نوع کدگذاری انتخاب می‌شوند. هدف اصلی عملگر جهش، حفظ تنوع ژنتیکی در طول اجرای الگوریتم تکاملی است (Deb, 2011؛ Gen et al., 2008).

در تحقیق حاضر، عملگر جهش بدین صورت است که یک یا تعدادی متغیر به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و مقدار کنونی آنها با مقدار جدیدی همانند آنچه در ایجاد جواب‌های اولیه توضیح داده شد، جایگزین می‌شود. به عبارت دیگر، یک درایه از هر قسمت از کروموزوم به طور تصادفی انتخاب شده و مقدار آن تغییر داده می‌شود.



شکل ۵. نخبه‌گرایی در انتخاب جمعیت نسل بعد.

Figure 5. Elitism in next generation population selection.

تامین کالاهای پزشکی فسادپذیر در شرایط بحران نشان داده شده است که الگوریتم NSGA-II از نظر کیفیت جواب‌ها عملکرد بهتری نسبت به MOPSO دارد. همچنین، در پژوهش (Wang et al., 2023) بر روی توزیع چنددوره‌ای اقلام امدادی پس از بلایا نشان داده شده است که الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری نسبت به SPEA2 و MOPSO دارد. بر این اساس، الگوریتم NSGA-II به عنوان الگوریتم اصلی این پژوهش انتخاب شده است.

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱- مثال عددی و اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و الگوریتم‌های حل در شرایط کنترل‌شده، داده‌های ورودی منطبق با سناریوهای واقعی و بر اساس پیشینه پژوهش تولید شده است. این رویکرد امکان ارزیابی سیستماتیک رفتار مدل را در ابعاد و سناریوهای مختلف، پیش از پیاده‌سازی در دنیای واقعی، فراهم می‌آورد. داده‌هایی ورودی مسئله در جدول ۸ آورده شده است. محدوده و منطق حاکم بر این پارامترها، برگرفته از پژوهش‌های معتبر (Mete & Zabinsky, 2010; Rezaei-Malek et al., 2016b; Rezaei-Malek et al., 2016a) و متناسب با شرایط دنیای واقعی تنظیم شده است. سایر پارامترها نیز به صورت منطقی و در تناسب با این مقادیر تولید شده‌اند. مسئله مورد بررسی شامل یک مرکز توزیع اصلی و یا انبار اصلی (گره شماره ۱)، پنج موقعیت نامزد برای احداث انبار (گره‌های ۲ تا ۶) و سه بیمارستان (گره‌های ۷، ۸ و ۹)

عملکرد الگوریتم پرکاربرد NSGA-II با دو الگوریتم پرکاربرد دیگر در حوزه بهینه‌سازی چندهدفه یعنی MOPSO^۱ و SPEA2^۲ در جدول ۷ مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه بر اساس معیارهای استاندارد کیفیت جواب‌ها، زمان اجرا، تنوع جواب‌ها و پایداری الگوریتم انجام شده است (Hoang et al., 2026; Rahimi et al., 2023).

جدول ۷. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری

Table 7. Performance comparison of metaheuristic algorithms

معیار مقایسه	NSGA-II	MOPSO	SPEA2
کیفیت جواب‌ها	بالا	متوسط تا بالا	بالاتر
زمان اجرا	بهترین	متوسط	ضعیف‌ترین
تنوع جواب‌ها	خوب	متوسط	بهترین
پایداری الگوریتم	بالا	متوسط	متوسط

طبق نتایج جدول ۷، الگوریتم NSGA-II از نظر زمان اجرا و پایداری جواب‌ها نسبت به دو الگوریتم دیگر برتری دارد. الگوریتم SPEA2 اگرچه تنوع بالاتری در جواب‌های تولید شده ارائه می‌دهد، اما زمان اجرای بیشتری نیاز دارد که آن را برای مسائل با ابعاد بزرگ، کمتر مناسب می‌سازد. الگوریتم MOPSO نیز همگرایی سریعی دارد، اما جواب‌های آن پراکندگی بیشتری نشان می‌دهند و پایداری کمتری نسبت به NSGA-II دارند.

این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین در حوزه لجستیک پزشکی و زنجیره تامین کالاهای امدادی همخوانی دارد. در مطالعه‌ی (Shahrabadi et al., 2024) بر روی زنجیره

¹ Multi-Objective Particle Swarm Optimization

² Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2

می‌باشد. تعداد دوره‌های قبل از بحران برابر ۴ و تعداد دوره‌های پس از بحران برابر ۲ دوره در نظر گرفته می‌شود. همچنین یک نوع داروی نوع A و یک نوع داروی نوع B در نظر می‌گیریم که حداکثر عمر مفید آنها برابر ۴ دوره و حداکثر تعداد دوره‌های باقیمانده از عمر آنها برای خروج از انبار ۱ دوره در نظر گرفته می‌شود.

مسئله در شرایط تصادفی و تحت سه سناریو با احتمالات وقوع به ترتیب ۰/۳۶، ۰/۴۰ و ۰/۲۴ با استفاده از نرم‌افزار گمز بر روی سیستمی با پردازنده Core i5-6200U با فرکانس ۳/۲ گیگاهرتز و حافظه رم ۴ گیگابایت اجرا و بررسی شده است. حل مدل فوق به مدت زمان ۴۵/۴۷ ثانیه در نرم‌افزار گمز انجام شد و در ادامه، نتایج آن آورده شده است.

۴-۲- نتایج روش دقیق (نرم‌افزار گمز)

از بین ۵ مکان بالقوه، انبارهای ۲، ۳ و ۴ در جواب بهینه فعال می‌شوند و تخصیص انبارهای محلی به عنوان انبار محلی، موقت و پشتیبان به هر کدام از بیمارستان‌ها مطابق با نتایج جدول ۹ است. از نتایج این جدول ملاحظه می‌شود که محدودیت‌های تخصیص انبارها به بیمارستان‌ها برآورده شده است چرا که با توجه به شعاع پوشش و فاصله بیمارستان‌ها از انبارها در جدول ۱۰، انبارهای تخصیص داده شده در شعاع پوشش بیمارستان‌ها هستند. همچنین، طبق جدول ۱۰، هم بیمارستان‌ها در شعاع انبارهای تخصیص داده شده هستند و هم فاصله بیمارستان تا انبار محلی کمتر از پشتیبان و تا انبار پشتیبان کمتر از انبار موقت است.

سه تابع هدف در تحقیق حاضر مورد مطالعه قرار گرفت که مقدار هر کدام از توابع هدف در سناریوهای مختلف به شرح جدول ۱۱ است. باید توجه داشت که در حل مسئله، با استفاده از رابطه‌ی (۶۴)، نرم‌السازی اهداف لحاظ شده است.

در جدول ۱۲ میزان داروهای خریداری شده در دوره‌های قبل از بحران نشان داده شده است. مطابق با نتایج این جدول، بیشتر داروهای مورد استفاده توسط انبار مرکزی (با شماره ۱) خریداری می‌شود و توسط این انبار به انبارهای محلی در دوره‌های پس از بحران فرستاده می‌شود. همچنین انبار محلی شماره ۳ نیز مقدار قابل

بدیهی است که در دوره‌های قبل از بحران، تنها انبارهایی که خرید دارو در آنها انجام شده است، دارای موجودی می‌باشند. بیشترین موجودی قبل از بحران مربوط به انبار مرکزی (انبار شماره ۱) است که داروهای نوع A و B را نگهداری می‌کند. همچنین انبار محلی شماره ۳ نیز به عنوان یکی از انبارهای فعال، دارای موجودی داروی نوع B می‌باشد. الگوی توزیع موجودی در دوره‌های مختلف قبل از بحران به صورت چرخشی طراحی شده است. به طوری که داروهای خریداری شده در دوره اول، در پایان دوره چهارم (قبل از رسیدن به تاریخ انقضا) از انبار خارج می‌شوند و داروی تازه خریداری شده در دوره‌های بعدی جایگزین می‌گردد.

شکل ۶ خلاصه موجودی انبارها در انتهای دوره‌ی پس از بحران ($t'=2$) را که در واقع همان موجودی باقیمانده پس از پاسخگویی به تقاضا است، در سه سناریوی مختلف نشان می‌دهد. مطابق با نتایج این شکل، در سناریوی ۲ که تقاضای بیمارستان‌ها بیشترین مقدار را دارد، موجودی انبار مرکزی (انبار ۱) برای هر دو نوع داروی A و B به صفر رسیده است. این در حالی است که در سناریوهای ۱ و ۳، به ترتیب حدود ۱۵,۷۰۰ و ۱۱,۳۰۰ واحد داروی نوع A در انبار مرکزی باقی می‌ماند.

در انبارهای محلی نیز الگوی مشابهی مشاهده می‌شود. انبار محلی شماره ۳ در هر سه سناریو دارای موجودی داروی نوع B است که بیشترین مقدار آن مربوط به سناریوی ۳ (حدود ۶,۷۰۰ واحد) می‌باشد. انبار محلی شماره ۲ موجودی کمتری دارد و عمدتاً در سناریوهای ۲ و ۳ فعال است. انبار محلی شماره ۴ نیز تنها در سناریوی ۱ و آن هم مقدار ناچیزی موجودی (۷۶۸ واحد) دارد. به طور کلی، مدل پیشنهادی موفق شده است موجودی انبارها را به گونه‌ای تنظیم کند که تقاضای بیمارستان‌ها در همه سناریوها پاسخ داده شود. در سناریو با تقاضای بالاتر (سناریو ۲)، موجودی انبارها به صفر رسیده و در سناریوهای دیگر، موجودی مازاد عمدتاً در انبار مرکزی و انبار محلی شماره ۳ متمرکز شده است. این رفتار نشان‌دهنده اولویت‌بندی هزینه کمبود نسبت به هزینه نگهداری موجودی در تابع هدف است.

اصلی، مسئولیت پاسخگویی به تقاضای بیمارستان‌ها را بر عهده دارد. انبار محلی شماره ۲ به عنوان انبار محلی بیمارستان‌های ۷ و ۹، ۲ دستگاه و انبار محلی شماره ۴ به عنوان انبار محلی بیمارستان ۸، ۱ دستگاه وسیله نقلیه در اختیار دارد.

همانطور که در جدول ۱۳ مشاهده می‌شود، مجموع وسایل نقلیه تخصیص‌یافته به انبار مرکزی و انبارهای محلی برابر ۱۶ دستگاه است. بیشترین سهم از این ناوگان مربوط به انبار مرکزی با ۷ دستگاه و انبار محلی شماره ۳ با ۶ دستگاه می‌باشد. دلیل تخصیص بالای ناوگان به انبار محلی شماره ۳، نقش آن به عنوان انبار پشتیبان هر سه بیمارستان است که در صورت خرابی انبارهای محلی

جدول ۸. پارامترهای مسئله

Table 8. Problem parameters

پارامتر	مقدار نسبت داده شده	پارامتر	مقدار نسبت داده شده
w_1	۰/۳۳	$CC2_{c,j}$	$0.9 \times CCI_{c,j} \times Cap2_{c,j}$
w_2	۰/۳۴	$CC3_{c,j}$	$0.7 \times CCI_{c,j} \times Cap3_{c,j}$
w_3	۰/۳۳	PSd_c	Uniform (۲۰۰,۰۰۰, ۲۵۰,۰۰۰)
FJ_j	Uniform (۲۰,۰۰۰, ۵۶,۵۰۰)	PS_c	Uniform (۲,۰۰۰,۰۰۰, ۲,۵۰۰,۰۰۰)
$ds_{u,w}$	Uniform (۱۰, ۶۰)	H_c	Uniform (۵۰,۰۰۰, ۶۵,۰۰۰)
e_c	Uniform (۴,۵۰۰, ۶,۰۰۰)	IP_{c,e_c}	Uniform (۶۰,۰۰۰, ۲۰۰,۰۰۰)
$R1_j$	Uniform (۴۰, ۵۰)	CP_c	Uniform (۱۲۰,۰۰۰, ۲۰۰,۰۰۰)
$R2_j$	Uniform (۴۵, ۵۰)	FV_v	Uniform (۳,۰۰۰,۰۰۰, ۶,۰۰۰,۰۰۰)
$R3_j$	Uniform (۵۰, ۶۰)	$MV_{v,t}$	Uniform (۲۰,۰۰۰, ۳۰,۰۰۰)
$Cap1_{c,j}$	Uniform (۲,۰۰۰, ۴,۰۰۰)	Q_v	Uniform (۲,۰۰۰, ۲,۵۰۰)
$Cap2_{c,j}$	Uniform (۸,۰۰۰, ۱۲,۰۰۰)	$D_{ckt\tau\Omega}$	Uniform (۱,۰۰۰, ۵,۰۰۰)
$Cap3_{c,j}$	Uniform (۱۵,۰۰۰, ۲۰,۰۰۰)	$ac_{c,j\Omega}$	Uniform (۰/۵, ۱)
$CCI_{c,j}$	Uniform (۸,۰۰۰, ۱۲,۰۰۰)	$ar_{uwt\tau\Omega}$	پارامتری با احتمال ۰/۳۵ صفر و ۰/۶۵ برابر ۱

جدول ۹. تخصیص انبارهای محلی، پشتیبان و موقت به بیمارستان‌ها

Table 9. Allocation of local, backup, and temporary warehouses to hospitals

بیمارستان	انبار محلی	انبار پشتیبان	انبار موقت سناریوی ۱	انبار موقت سناریوی ۲	انبار موقت سناریوی ۳
۷	۲	۳	۴	۴	۴
۸	۴	۳	۲	۲	۲
۹	۲	۳	۴	۴	۴

جدول ۱۰. فاصله و شعاع انبارهای محلی به بیمارستان‌های تخصیص داده شده

Table 10. Distance and coverage radius of local warehouses to assigned hospitals

بیمارستان	شعاع پوشش انبار محلی	شعاع پوشش انبار پشتیبان	شعاع پوشش انبار موقت	شعاع پوشش انبار موقت	شعاع پوشش انبار موقت
۷	۴۲ (۱۶/۶)	۴۸ (۱۷/۵)	۵۸ (۳۹/۵)	۵۸ (۳۹/۵)	۵۸ (۳۹/۵)
۸	۴۶ (۱۵/۵)	۴۸ (۲۵/۲)	۵۵ (۴۸/۸)	۵۵ (۴۸/۸)	۵۵ (۴۸/۸)
۹	۴۲ (۲۴/۳)	۴۸ (۳۹/۷)	۵۸ (۴۶/۱)	۵۸ (۴۶/۱)	۵۸ (۴۶/۱)

جدول ۱۱. مقدار توابع هدف در سناریوهای مختلف

Table 11. Objective function values under different scenarios

توابع هدف	سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳
زمان حمل و نقل	۲,۵۵۸	۸,۵۱۴	۲,۸۳۲
قابلیت‌های اطمینان انبارهای فعال	۹۳/۱۳	۹۴/۲۶	۹۴/۱۶
هزینه	۶,۸۱۵,۰۰۰,۰۶۵	۳,۴۰۲,۵۰۷,۳۰۸	۵,۷۳۴,۲۹۵,۰۲۳

جدول ۱۲. میزان داروهای خریداری شده در دوره‌های قبل از بحران

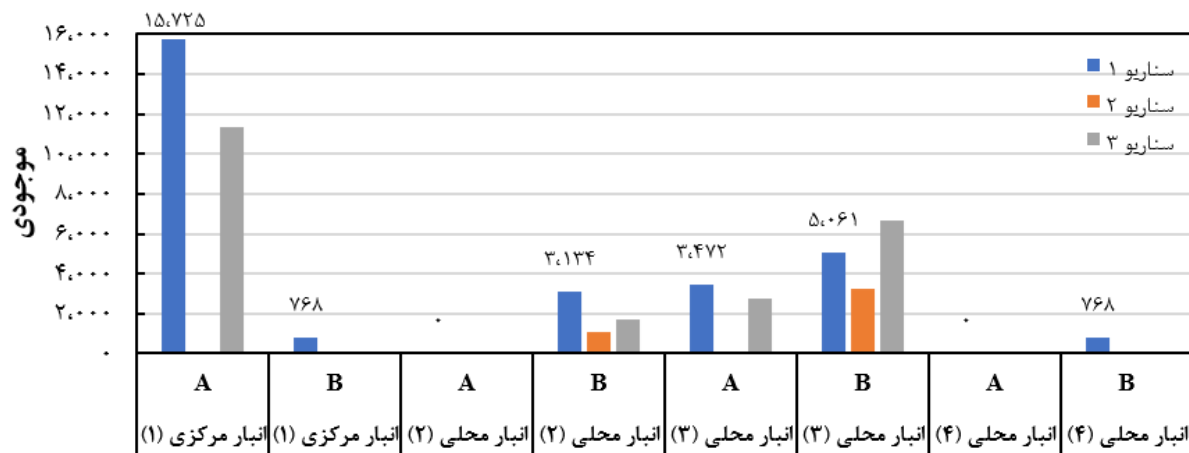
Table 12. Purchased drug quantities in pre-crisis periods

دارو	انبار	مقدار
۱ (A)	۱	۳۰,۹۸۳
۲ (B)	۱	۴,۹۶۸
۲ (B)	۳	۱۳,۴۷۲

جدول ۱۳. تعداد وسایل نقلیه تخصیص یافته به انبارها

Table 13. Number of vehicles allocated to each warehouse

انبار	۱ (انبار مرکزی)	انبار محلی ۲	انبار محلی ۳	انبار محلی ۴	جمع
تعداد وسایل نقلیه	۷	۲	۶	۱	۱۶



شکل ۶. موجودی انبارها در پایان دوره پس از بحران در سناریوهای مختلف.

Figure 6. Warehouse inventory at the end of the post-crisis period under different scenarios.

در این رابطه، نمایانگر مقدار هر تابع هدف برای مسئله مورد نظر، تحت ترکیب مشخصی از پارامترهاست. همچنین، کمترین مقدار آن تابع هدف را در بین تمامی ترکیب‌های پارامتری بررسی شده برای آن مسئله نشان می‌دهد.

در الگوریتم پیشنهادی، احتمال تقاطع و جهش دو پارامتری هستند که عملکرد الگوریتم متأثر از آنها است. در نمودار میانگین اثرات اصلی برای فاکتورهای احتمال تقاطع و احتمال جهش در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به اینکه هر چقدر مقدار PRD کمتر باشد عملکرد

۳-۴- تنظیم پارامترهای الگوریتم NSGA-II

در تحقیق حاضر از معیار درصد انحراف نسبی به منظور ارزیابی الگوریتم بهره می‌گیریم. این معیار که شاخص بسیار پر کاربرد در تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری است، نشان می‌دهد که به طور متوسط یک الگوریتم نسبت به بهترین راه بدست آمده، چه میزان اختلاف دارد. رابطه‌ی (۶۹) نحوه‌ی محاسبه‌ی این معیار را نشان می‌دهد.

$$RPD = \left(\sum \frac{alg_{sol} - min_{sol}}{min_{sol}} \right) \times 100 \quad (69)$$

نتایج جدول ۱۵ نشان می‌دهد که الگوریتم دقیق در مسائل با اندازه کوچک (مسئله ۱، ۲ و ۳) قادر به استخراج جواب پارتویی است و در جواب‌های پارتویی حاصل از روش دقیق، مقدار تابع هدف، نسبت به الگوریتم *NSGA-II* بهتر است. با افزایش ابعاد مسئله، کیفیت جواب‌های دقیق که در زمان از قبل تعیین شده (۲۰,۰۰۰ ثانیه) حاصل می‌شود، نسبت به جواب‌های الگوریتم *NSGA-II* کاهش می‌یابد (مسئله ۴). با افزایش بیشتر سائز مسئله‌ها، برخلاف الگوریتم *NSGA-II*، روش دقیق در زمان کمتر از ۲۰,۰۰۰ ثانیه قادر به حل مسائل نیست (مسئله‌های ۵ تا ۹). همچنین، به دلیل تعداد متغیرهای زیاد در ابعاد بزرگ، زمانی که سائز مسئله از یک میزان مشخص بیشتر شود (مسئله ۱۰)، حافظه اصلی کامپیوتر قادر به پردازش متغیرها و انجام عملیات ریاضی نیست و پیاده‌سازی چنین مسائلی نیاز به سیستم‌های سخت افزاری قدرتمند دارد.

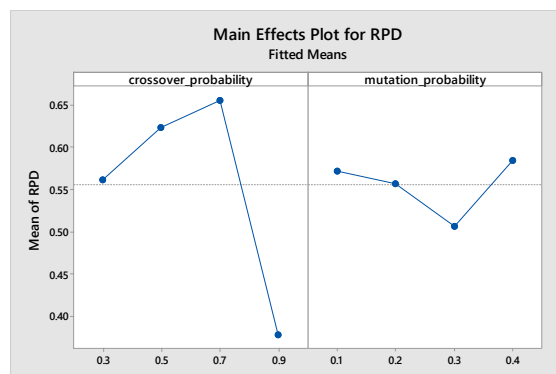
۴-۵- آنالیز حساسیت

یکی از پارامترهای کلیدی که در زمان وقوع بحران تأثیر مستقیمی بر عملکرد شبکه لجستیک دارو دارد، درصد سالم ماندن اقلام دارویی در انبارها پس از بحران است. در مدل پیشنهادی، این موضوع توسط پارامتر ac_{cjd} (درصدی از داروی c که در انبار محلی z در سناریوی Ω سالم باقی مانده) مدل‌سازی شده است. در این بخش، به تحلیل حساسیت نتایج مدل نسبت به تغییرات این پارامتر پرداخته می‌شود.

بدین منظور، پارامتر مذکور در پنج سطح مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد: افزایش ۵۰٪، افزایش ۲۵٪، حالت پایه (بدون تغییر)، کاهش ۲۵٪ و کاهش ۵۰٪. تغییرات اعمال شده به صورت $(1 \pm x/100) \times ac_{cjd}$ محاسبه می‌شود، با این شرط که مقادیر حاصل از ۱ تجاوز نکنند. تحلیل حساسیت بر روی مسائلی معرفی شده در بخش سایر پارامترها مطابق با مقادیر اولیه خود ثابت نگه داشته شده‌اند. نتایج تحلیل حساسیت در جدول ۱۶ ارائه شده است.

با توجه به نتایج جدول ۱۶، مشاهدات زیر قابل تحلیل است:

الگوریتم بهتر است، بهترین مقدار برای احتمال تقاطع برابر ۰/۹ و بهترین مقدار برای احتمال جهش برابر ۰/۳ انتخاب می‌شود.



شکل ۷. میانگین اثرات احتمال تقاطع و جهش.

Figure 7. Mean effects of crossover and mutation probabilities.

پس از تنظیم پارامترهای الگوریتم، حل مسئله توسط نرم‌افزار گمز و الگوریتم پیشنهادی، منجر به جواب‌های یکسان می‌شود. از بین ۵ مکان بالقوه، انبارهای ۲، ۳ و ۴ در جواب بهینه فعال می‌شوند و تخصیص انبارهای محلی به عنوان انبار محلی، موقت و پشتیبان به هر کدام از بیمارستان‌ها مطابق با نتایج جدول ۹ است.

۴-۴- مقایسه روش دقیق و الگوریتم فراابتکاری

در این قسمت، عملکرد الگوریتم پیشنهادی *NSGA-II* در مسائل مختلف بررسی می‌شود. این بررسی از نظر توابع هدف، توانایی حل و دستیابی به جواب در زمان حداکثر ۲۰,۰۰۰ ثانیه و شکاف بین جواب‌ها است. مسائل نمونه که بدین منظور در نظر گرفته شده است، به شرح جدول ۱۴ است که پارامترهای آنها مطابق با جدول ۸ ایجاد شده است.

نتایج اجرای این مسائل در نرم افزار گمز و همینطور الگوریتم *NSGA-II* اجرا شده در نرم افزار متلب به شرح جدول ۱۵ است. در استخراج جواب‌های پارتویی با روش دقیق، وزن‌های مختلفی برای توابع هدف در نظر گرفته شده است و سعی شده است تا تعداد جواب‌های پارتویی روش دقیق با روش ابتکاری برابر باشد. همچنین، در حل مسائل، نرم‌السازی اهداف لحاظ شده است.

جدول ۱۴. مسائل نمونه برای اعتبارسنجی نتایج الگوریتم دقیق و فراابتکاری

Table 14. Sample problems for validating the results of exact and metaheuristic algorithms

تعداد بیمارستان ها	تعداد مکان های بالقوه (انبارها)	ابعاد مسئله	شماره مسئله	تعداد داروها		تعداد دوره ها		تعداد انواع وسایل نقلیه
				نوع A	نوع B	قبل از بحران	پس از بحران	
۱	کوچک	۴	۶	۱	۱	۴	۲	۲
۲	کوچک	۶	۸	۱	۱	۴	۲	۲
۳	کوچک	۶	۸	۲	۲	۱۲	۳	۲
۴	متوسط	۱۰	۱۵	۲	۲	۱۲	۳	۴
۵	متوسط	۱۵	۲۰	۲	۲	۱۲	۳	۴
۶	متوسط	۱۵	۳۰	۲	۲	۱۲	۳	۴
۷	بزرگ	۲۵	۳۰	۲	۲	۱۲	۳	۴
۸	بزرگ	۳۰	۴۰	۲	۲	۱۲	۳	۴
۹	بزرگ	۳۵	۵۰	۲	۲	۱۲	۳	۴
۱۰	بزرگ	۴۰	۶۰	۲	۲	۱۲	۳	۴

جدول ۱۵. نتایج پیاده سازی روش دقیق و الگوریتم فراابتکاری بر روی مسائل نمونه

Table 15. Implementation results of exact and metaheuristic algorithms on sample problems

شماره مسئله	ابعاد مسئله	نتایج GAMS (روش دقیق)					نتایج Matlab (روش فراابتکاری NSGA-II)				
		زمان حل (ثانیه)	میانگین تابع هدف اول	میانگین تابع هدف دوم	میانگین مجموع وزنی اهداف نرمال شده	میانگین تابع هدف سوم	زمان حل (ثانیه)	میانگین تابع هدف اول	میانگین تابع هدف دوم	میانگین مجموع وزنی اهداف نرمال شده	میانگین تابع هدف سوم
۱	کوچک	۱۲.۱۶۲	۹۴/۵۶	۴,۱۸۶,۵۵۸,۲۵۶	۰/۸۵	۲۸۵	۱۱,۹۸۷	۹۴/۰۸	۴,۸۵۳,۱۲۸,۲۷۱	۰/۸۷	۱۵۰
۲	کوچک	۱۷.۰۵۴	۹۳/۸۴	۵,۷۳۶,۴۸۳,۲۹۸	۰/۷۶	۳۵۷	۱۶,۱۸۸	۹۱/۸۹	۶,۲۶۹,۰۶۹,۹۹۷	۰/۷۹	۲۱۹
۳	کوچک	۱۲۱.۶۳۲	۹۰/۳۴	۱۵,۶۸۴,۸۲۱,۳۵۴	۰/۷۲	۷,۸۶۴	۱۰۳,۵۱۵	۸۹/۵۵	۱۷,۶۰۴,۷۹۱,۰۶۳	۰/۷۵	۱,۱۲۸
۴	متوسط	۲۰۵.۴۲۸	۸۹/۳۱	۳۹,۴۹۸,۱۵۶,۶۸۴	۰/۸	۲۰,۰۰۰	۱۲۴,۰۰۱	۸۸/۶۹	۲۹,۴۰۶,۳۶۲,۲۸۶	۰/۷۳	۱,۹۸۸
۵	متوسط	-	-	-	-	-	۴۸۹,۱۵۸	۹۰/۰۷	۴۹,۱۷۰,۱۷۸,۴۱۰	-	۶,۸۴۲
۶	متوسط	-	-	-	-	-	۶۲۱,۸۵۲	۸۹/۲۶	۶۴,۵۸۵,۰۸۹,۲۰۵	-	۷,۱۵۰
۷	بزرگ	-	-	-	-	-	۷۱۳,۶۳۶	۸۷/۳۸	۸۰,۷۳۱,۷۲۵,۸۲۰	-	۸,۷۵۲
۸	بزرگ	-	-	-	-	-	۲,۰۹۸,۷۰۵	۸۵/۷۴	۱۳۶,۴۰۸,۷۷۸,۱۰۹	-	۱۳,۴۵۹
۹	بزرگ	-	-	-	-	-	۶,۵۰۶,۸۱۵	۸۳/۳۱	۲۵۴,۹۰۴,۳۴۷,۴۰۸	-	۱۹,۱۶۷
۱۰	بزرگ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

جدول ۱۶. تأثیر تغییرات درصد سالم ماندن داروها بر متغیرهای کلیدی مدل

Table 16. Effect of changes in drug survival percentage on key model variables

متغیر	+۵۰٪	+۲۵٪	پایه (۰٪)	-۲۵٪	-۵۰٪
تعداد انبارهای فعال	۴	۴	۴	۴	۴
موجودی انبارها قبل از بحران	۱۴۵,۹۰۰	۱۶۲,۶۹۸	۱۹۷,۶۹۸	۲۶۳,۵۹۸	۳۱۱,۲۳۶
میزان خرید داروها	۳۶,۴۷۵	۴۰,۶۷۵	۴۹,۴۲۵	۶۵,۸۹۹	۷۵,۱۳۲
مقدار کمبود قبل از بحران	۰	۰	۰	۰	۰
تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده	۱۵	۱۵	۱۶	۱۶	۱۶
موجودی انبارها پس از بحران	۲۹۹,۸۱۰	۳۵۲,۸۸۰	۳۹۸,۱۲۶	۳۹۸,۱۲۶	۴۱۲,۳۶۵
حمل و نقل از انبار مرکزی به انبارهای محلی	۱۹۰,۰۵۲	۱۹۹,۳۷۳	۲۴۲,۳۵۸	۲۴۵,۳۳۸	۲۵۱,۱۶۴
محصولات تحویلی به بیمارستان‌ها	۳۷۲,۷۳۲	۳۷۲,۷۳۲	۳۷۲,۷۳۲	۳۷۲,۷۳۲	۳۷۲,۷۳۲
محصولات مازاد (بلااستفاده) پس از بحران	۶۲,۰۷۵	۸۸,۶۱۰	۱۱۱,۲۳۳	۱۱۱,۲۳۳	۱۱۸,۹۳۱
شاخص وزنی ظرفیت انبارها	۸	۸	۹	۹	۹

(۱) تأثیر بر موجودی انبارها (قبل و پس از

بحران): با افزایش درصد محصولات سالم (افزایش ac_{czm})، موجودی انبارها قبل و پس از بحران به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با افزایش ۵۰٪ این پارامتر، موجودی قبل از بحران از ۱۹۷,۶۹۸ به ۱۴۵,۹۰۰ واحد کاهش می‌یابد (حدود ۲۶٪ کاهش). این رفتار منطقی است، زیرا با سالم ماندن بیشتر داروها در انبارها، نیاز به خرید و انباشت موجودی اضافی کاهش می‌یابد.

(۲) تأثیر بر میزان خرید داروها: الگوی مشابهی

برای متغیر خرید داروها مشاهده می‌شود. افزایش سطح سلامت داروها، نیاز به خرید مجدد را کاهش می‌دهد. این یافته از نظر مدیریت منابع مالی در فاز آمادگی حائز اهمیت است.

(۳) کمبود قبل از بحران: مطابق با نتایج جدول

۱۶، کمبود قبل از بحران در تمام سناریوها برابر صفر است. این نتیجه نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن جریمه مناسب برای کمبود، توانسته است موجودی داروها را به گونه‌ای تنظیم کند که در هیچ دوره‌ای قبل از بحران با کمبود مواجه نباشیم. این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا وجود کمبود قبل از بحران می‌تواند در زمان وقوع بحران وضعیت را بحرانی‌تر کند.

(۴) تأثیر بر حمل و نقل و ناوگان: با افزایش

درصد محصولات سالم، میزان حمل و نقل از انبار مرکزی به انبارهای محلی و همچنین تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که بهبود قابلیت اطمینان انبارها می‌تواند به طور غیرمستقیم هزینه‌های حمل و نقل را نیز کاهش دهد.

(۵) تأثیر بر پاسخگویی به تقاضا: نکته قابل توجه

این است که میزان محصولات تحویلی به بیمارستان‌ها در تمام سناریوها ثابت مانده است (۳۷۲,۷۳۲ واحد). این موضوع نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی با اولویت‌بندی هزینه کمبود، توانسته است تقاضای بیمارستان‌ها را در همه شرایط تأمین کند و از بروز کمبود جلوگیری نماید.

(۶) تأثیر بر محصولات بلااستفاده پس از

بحران: با افزایش درصد محصولات سالم، میزان محصولات بلااستفاده پس از بحران کاهش می‌یابد، به طوری که در سطوح بالای این پارامتر (افزایش ۵۰٪)، محصول این مقدار به ۶۲,۰۷۵ واحد می‌رسد که نسبت به حالت پایه (۱۱۱,۲۳۳) کاهش قابل توجهی داشته است. این نشان‌دهنده کارایی مدل در مدیریت موجودی و کاهش ضایعات دارویی است.

(۷) عدم تغییر در تعداد انبارهای فعال: تعداد

انبارهای فعال در همه سطوح ثابت مانده است

بیشتر برای کاهش هزینه حمل و نقل و بهبود پوشش جغرافیایی است. این موضوع اهمیت سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های مقاوم‌سازی انبارها در برابر بحران را نشان می‌دهد. همچنین، مقدار صفر برای کمبود قبل از بحران در تمام سناریوها، گویای کارایی مدل در تأمین موجودی مورد نیاز پیش از وقوع بحران است.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل ریاضی یکپارچه برای طراحی شبکه لجستیک دارو در دو فاز آمادگی و واکنش بحران ارائه شد. مدل پیشنهادی سه هدف کاهش زمان خدمت‌رسانی، کاهش هزینه‌های تسهیلات و افزایش قابلیت اطمینان زنجیره را دنبال می‌کند. با توجه به عدم قطعیت در پارامترهایی نظیر تقاضا و وضعیت مسیرها، از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شد. مفروضاتی نظیر تخصیص انبارهای پشتیبان و موقت، مدیریت موجودی داروهای فسادپذیر و مسیریابی پویا، مدل را به شرایط دنیای واقعی نزدیک کرده است. با توجه به NP-hard بودن مسئله، حل مدل با روش‌های دقیق تنها برای ابعاد کوچک امکان‌پذیر بود و در ابعاد بزرگ از الگوریتم فراابتکاری NSGA-II استفاده شد.

۵-۱- یافته‌های کلیدی

پایه‌سازی مدل بر روی یک مثال عددی با ۵ مکان بالقوه برای احداث انبار و ۳ بیمارستان، نتایج ارزشمندی را به همراه داشت:

الف) تخصیص انبارها: از بین ۵ مکان بالقوه، انبارهای ۲، ۳ و ۴ در جواب بهینه فعال شدند. انبار شماره ۲ به عنوان انبار محلی بیمارستان‌های ۷ و ۹، انبار شماره ۳ به عنوان انبار پشتیبان هر سه بیمارستان، و انبار شماره ۴ به عنوان انبار محلی بیمارستان ۸ و انبار موقت بیمارستان‌های ۷ و ۹ تخصیص یافت. این تخصیص نشان‌دهنده طراحی انعطاف‌پذیر شبکه با قابلیت پشتیبانی در شرایط خرابی است.

ب) موجودی پس از بحران: در سناریوی ۲ که تقاضای بیمارستان‌ها بیشترین مقدار را دارد، موجودی انبار مرکزی برای هر دو نوع داروی A و B به

که نشان می‌دهد این تصمیم استراتژیک کمتر تحت تأثیر تغییرات درصد سلامت داروها قرار می‌گیرد و بیشتر به عوامل دیگری مانند پوشش جغرافیایی و هزینه‌های ثابت وابسته است.

۸) شاخص وزنی سطح ظرفیت انبارها:

شاخص به صورت $\sum_c \sum_j z1_{cj} + 2z2_{cj} + 3z3_{cj}$ تعریف می‌شود که در آن $z1_{cj}$ ، $z2_{cj}$ و $z3_{cj}$ به ترتیب بیانگر انتخاب سطوح ظرفیت ۱ (کوچک)، ۲ (متوسط) و ۳ (بزرگ) برای انبارها هستند. مطابق با نتایج جدول ۱۶، در حالت پایه و حالت‌های کاهش درصد سالم ماندن داروها، مقدار این شاخص برابر ۹ است که نشان‌دهنده انتخاب سه انبار با سطح ظرفیت ۳ (بزرگ) می‌باشد. در حالت‌های افزایش درصد سالم ماندن داروها، مقدار شاخص به ۸ کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده انتخاب چهار انبار با سطح ظرفیت ۲ (متوسط) است. با توجه به وجود انبارهای پشتیبان و موقت در مدل پیشنهادی، این رفتار قابل توجیه است: در شرایط با قابلیت اطمینان پایین (درصد سالم ماندن داروها کمتر)، مدل ترجیح می‌دهد داروها را در چند انبار بزرگ متمرکز کند تا هماهنگی بین انبارهای محلی، پشتیبان و موقت ساده‌تر شده و ریسک خرابی بهتر مدیریت شود. در مقابل، با افزایش قابلیت اطمینان (درصد سالم ماندن داروها بیشتر)، مدل می‌تواند داروها را در انبارهای بیشتر با ظرفیت متوسط پخش کند تا هزینه‌های حمل و نقل کاهش یافته و پوشش جغرافیایی بهتری حاصل شود.

در مجموع، نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی از پایداری مناسبی در مواجهه با تغییرات پارامتر درصد سالم ماندن داروها برخوردار است. مهم‌ترین یافته این است که با افزایش سطح سلامت داروها در انبارها، هزینه‌های خرید، نگهداری و حمل و نقل کاهش می‌یابد، در حالی که سطح خدمات‌رسانی به بیمارستان‌ها بدون تغییر باقی می‌ماند. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش قابلیت اطمینان، مدل استراتژی خود را از سه انبار با ظرفیت بزرگ به چهار انبار با ظرفیت متوسط تغییر می‌دهد که بیانگر پخش دارو در انبارهای

۱۰ با ۴۰ مکان بالقوه و ۶۰ بیمارستان)، محدودیت حافظه مانع از حل مسئله شد.

۵-۲- مفاهیم نظری

این پژوهش از چند جنبه دارای مشارکت نظری است. اول، معرفی ساختار چهارسطحی انبارش (مرکزی، محلی، پشتیبان و موقت) که در مطالعات پیشین لجستیک دارو در شرایط بحران به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. دوم، مدلسازی قابلیت اطمینان از طریق احتمال خرابی انبارها و مسیرها و تعریف آن به عنوان تابع هدف مستقل، رویکردی نوین در این حوزه محسوب می‌شود. سوم، تلفیق بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو با مدیریت موجودی داروهای فسادپذیر و مسیریابی پویا، چارچوبی جامع برای طراحی شبکه لجستیک دارو در شرایط عدم قطعیت ارائه می‌دهد.

مدل ارائه‌شده در این پژوهش، یک سیستم مهندسی پیچیده را با رویکرد تفکر سیستمی مدلسازی کرده است که در آن تعاملات بین فاز آمادگی (تصمیمات استراتژیک مکان‌یابی، ظرفیت‌گذاری و مدیریت موجودی) و فاز واکنش (تصمیمات عملیاتی مسیریابی و توزیع پویا) به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده است. توجه به احتمال خرابی تسهیلات و مسیرها و تعریف قابلیت اطمینان به عنوان تابع هدف، این پژوهش را به حوزه مدیریت ریسک و قابلیت اطمینان شبکه نزدیک می‌سازد. روش بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو و حل مدل چندهدفه نیز نمونه‌ای از کاربرد سیستم‌های تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است.

۵-۳- مفاهیم عملی

زنجیره تامین اقلام امدادی با در نظر گرفتن تصمیماتی از قبیل فعال کردن تسهیلات، تخصیص و نگهداری موجودی قبل از بحران (فاز آماده‌سازی) و تصمیمات مربوط به توزیع اقلام دارویی و مسیریابی وسایل نقلیه بعد از بحران (فاز واکنش)، مدلسازی شد. مفروضات به کار گرفته شده در توسعه مدل از جمله تخصیص انبارها به عنوان انبار محلی، انبار پشتیبان و انبار موقت باعث افزایش انعطاف‌پذیری زنجیره تامین و فعال شدن تسهیلات به اندازه کافی می‌شود تا در صورت نقص در یکی از انبارها و

صفر رسید که نشان‌دهنده تخصیص کامل منابع به نقاط تقاضا است. در مقابل، در سناریوهای ۱ و ۳ با تقاضای کمتر، به ترتیب حدود ۱۵,۷۰۰ و ۱۱,۳۰۰ واحد داروی نوع A در انبار مرکزی باقی ماند. انبار محلی شماره ۳ در هر سه سناریو دارای موجودی داروی نوع B بود که بیشترین مقدار آن (حدود ۶,۷۰۰ واحد) مربوط به سناریوی ۳ می‌باشد.

ج) تخصیص ناوگان: مجموع وسایل نقلیه تخصیص‌یافته به انبارها برابر ۱۶ دستگاه است. بیشترین سهم از این ناوگان مربوط به انبار مرکزی با ۷ دستگاه و انبار محلی شماره ۳ با ۶ دستگاه می‌باشد. دلیل تخصیص بالای ناوگان به انبار محلی شماره ۳، نقش آن به عنوان انبار پشتیبان هر سه بیمارستان است که در صورت خرابی انبارهای محلی اصلی، مسئولیت پاسخگویی به تقاضا را بر عهده دارد. انبار محلی شماره ۲ و ۴ نیز به ترتیب ۲ و ۱ دستگاه وسیله نقلیه در اختیار دارند.

د) تحلیل حساسیت: بررسی پارامتر درصد سالم ماندن داروها در پنج سطح مختلف نشان داد که افزایش ۵۰٪ این پارامتر، موجودی انبارها قبل از بحران را حدود ۲۶٪ کاهش می‌دهد و هزینه‌های خرید و نگهداری دارو را به طور قابل توجهی کاهش می‌بخشد. همچنین، با افزایش قابلیت اطمینان، استراتژی ظرفیت‌گذاری مدل از سه انبار با ظرفیت بزرگ به چهار انبار با ظرفیت متوسط تغییر می‌کند که بیانگر پخش دارو در انبارهای بیشتر برای کاهش هزینه حمل و نقل و بهبود پوشش جغرافیایی است. نکته قابل توجه اینکه میزان محصولات تحویلی به بیمارستان‌ها در تمام سناریوها ثابت مانده است (۳۷۲,۷۳۲ واحد) که نشان‌دهنده اولویت‌بندی هزینه کمبود نسبت به هزینه نگهداری موجودی در تابع هدف است.

ه) مقایسه روش‌های حل: الگوریتم دقیق (GAMS) تنها در مسائل کوچک (۱ تا ۳) قادر به استخراج جواب پارتویی بود، در حالی که الگوریتم NSGA-II در مسائل متوسط و بزرگ (۴ تا ۹) با زمان محاسباتی مناسب (حداکثر ۱۹,۱۶۷ ثانیه) جواب‌های با کیفیت قابل قبول ارائه داد. در مسائل بسیار بزرگ (مسئله

بنابراین، به منظور افزایش قابلیت پاسخگویی زنجیره تامین به هنگام وقوع حادثه، از برنامه‌ریزی تصادفی برای ارائه تصمیمات مرتبط به سناریوهای مختلف استفاده شد. از سوی دیگر، از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو (Mulvey et al., 1995) برای استوار بودن تصمیمات نسبت به رویدادهای تصادفی استفاده شد. مطابق با این رویکرد، تصمیماتی که برای هر سناریو گرفته می‌شود، باید به نحوی باشد که اگر آن سناریو اتفاق نیفتاد، انحراف کمی نسبت به سایر سناریوها داشته باشد. همچنین، جریمه‌ی ناشی از برآورده نشدن تقاضای بیمارستان‌ها در هر سناریو در تابع هدف لحاظ شد تا به ازای همه سناریوها تصمیمات مدل حتی الامکان شدنی باشد.

از آنجایی که به دلیل NP-hard بودن مسئله، حل مدل با روش‌های دقیق تنها برای ابعاد کوچک امکان‌پذیر بود، الگوریتم فراابتکاری NSGA-II برای حل مدل در ابعاد بزرگ ارائه و پیاده‌سازی شد. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی قادر است در مسائل با ابعاد بزرگ که روش دقیق قادر به حل آنها نیست، جواب‌های پارتویی با کیفیت قابل قبول استخراج کند. مقایسه نتایج در مسائل کوچک نیز همگرایی الگوریتم پیشنهادی با جواب‌های دقیق را تأیید می‌کند.

با توجه به محدودیت‌های حافظه در کامپیوترهای شخصی، الگوریتم NSGA-II نیز در ابعاد بسیار بزرگ (مانند مسئله با ۴۰ مکان بالقوه و ۶۰ بیمارستان) قادر به استخراج جواب نبود.

جهت‌گیری‌های اصلی برای تحقیقات آتی به شرح زیر است:

- (۱) **توسعه روش‌های حل:** برای حل مسائل در ابعاد بسیار بزرگ، چندین راهکار قابل پیشنهاد است: (الف) استفاده از سیستم‌های سخت‌افزاری قدرتمندتر با حافظه بالاتر، (ب) تجزیه مسئله به چندین مسئله مجزا و حل جداگانه هر مسئله (هر چند که بهینگی جواب‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد)، (ج) دریافت بازخورد از مدل‌های سایر سطوح در مسئله تجزیه شده و اصلاح راه‌حل‌ها برای بهبود کیفیت جواب‌ها، (د) توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری ترکیبی.

همین طور مسیرهای ارتباطی شبکه، امکان خدمت‌رسانی به بیمارستان از سوی سایر انبارهای محلی وجود داشته باشد. از سوی دیگر، مفروضات در نظر گرفته شده در توسعه مدل مانند دسته‌بندی داروها و محدود کردن نگهداری داروهای خاص تنها در انبار مرکزی باعث می‌شود تا مدل پیشنهادی به مسئله دنیای واقعی هر چه بیشتر نزدیک شود. نتایج این پژوهش برای مدیران بحران و سیاست‌گذاران حوزه سلامت کاربرد مستقیم دارد:

- (۱) **مکان‌یابی بهینه:** مدیران می‌توانند با استفاده از این مدل، مکان بهینه انبارهای محلی، پشتیبان و موقت را با در نظر گرفتن شعاع پوشش، فاصله، امنیت و هزینه تعیین کنند.
- (۲) **سرمایه‌گذاری در مقاوم‌سازی:** یافته‌های تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در مقاوم‌سازی انبارها (افزایش درصد سالم ماندن داروها) نه تنها قابلیت اطمینان را افزایش می‌دهد، بلکه هزینه‌های خرید و نگهداری دارو را نیز کاهش می‌دهد.
- (۳) **تخصیص ناوگان:** تخصیص بالای ناوگان به انبار پشتیبان نشان می‌دهد که در طراحی شبکه لجستیک، باید به انبارهایی که نقش پشتیبانی دارند، توجه ویژه‌ای شود.
- (۴) **مدیریت موجودی:** الگوی چرخشی موجودی (خروج داروهای نزدیک به انقضا و جایگزینی با داروی تازه) می‌تواند به عنوان یک سیاست عملی در انبارهای دارویی قبل از بحران اجرا شود.

- (۵) **اولویت‌بندی منابع:** مدل نشان می‌دهد که با اولویت‌بندی هزینه کمبود نسبت به هزینه نگهداری، می‌توان پاسخگویی کامل به تقاضا را در سناریوهای مختلف تضمین کرد.

۵-۴- محدودیت‌ها و تحقیقات آینده

با توجه به اینکه سناریوهای مختلفی می‌تواند برای وقوع یک حادثه تعریف شود و در هر سناریو، شدت حادثه و پارامترهای تاثیرگذار بر آن متفاوت است، برنامه‌ریزی لجستیک باید قادر به پاسخگویی در هر سناریو باشد.

استفاده کرد و نتایج را با رویکرد حاضر مقایسه نمود.

مشارکت‌های نویسندگان

حمید مؤکدی: تهیه پیش‌نویس خطی، بازنگری اولیه گزارش، بررسی ادبیات نظری و پیشینه مرتبط، تجزیه و تحلیل داده‌ها، بازبینی متن، راهنمایی؛ **فاطمه قاسم‌زاده:** روش‌شناسی پژوهش، مدل مفهومی پژوهش، پیش‌نویس تحلیل آماری، بازبینی متن.

تعارض 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 صمیمانه از عوامل اجرایی نشریه مهندسی سیستم و بهره‌وری، داوران محترم و سایر افرادی که در بهبود کیفیت این مقاله همکاری داشته‌اند، قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- Abbasian, M., Sazvar, Z., & Mohammadisiahroudi, M. (2023). A hybrid optimization method to design a sustainable resilient supply chain in a perishable food industry. *Environmental science and pollution research*, 30(3), 6080-6103. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22115-8>
- Bai, X. (2016). Two-stage multiobjective optimization for emergency supplies allocation problem under integrated uncertainty. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2016/2823835>
- Baskaya, S., Ertem, M. A., & Duran, S. (2017). Pre-positioning of relief items in humanitarian logistics considering lateral transshipment opportunities. *Socio-Economic Planning Sciences*, 57, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2016.09.001>
- Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. *International journal of disaster risk reduction*, 24, 485-498. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2017.01.017>

(۲) **مطالعه موردی واقعی:** علی‌رغم اعتبارسنجی جامع مدل پیشنهادی بر اساس داده‌های واقعی از منابع معتبر، مدل مذکور هنوز با داده‌های عینی از یک منطقه خاص بلاخیز کالیبره نشده است. همانطور که یکی از داوران محترم نیز اشاره نمودند، انجام مطالعه موردی با داده‌های واقعی (برای مثال در استان‌های زلزله‌خیزی مانند کرمانشاه یا آذربایجان شرقی، یا استان‌های سیل‌خیز مانند گلستان یا خوزستان) به عنوان جهتی ضروری برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود.

(۳) **گسترش مدل از نظر ابعاد و اهداف:** (الف) در نظر گرفتن بیش از دو نوع دارو و بیش از یک نوع وسیله نقلیه همگن، (ب) اضافه کردن اهداف پایداری و زیست‌محیطی مانند حداقل‌سازی انتشار کربن و پسماند دارویی، (ج) در نظر گرفتن عدالت در توزیع به عنوان یک هدف جداگانه در کنار اهداف کارایی، (د) لحاظ کردن محدودیت‌های مالی و بودجه‌ای در فاز آمادگی.

(۴) **در نظر گرفتن همکاری افقی:** در مدل فعلی، انبارها به صورت مستقل عمل می‌کنند. در تحقیقات آینده می‌توان امکان تبادل کالا بین انبارهای محلی در زمان بحران را به مدل اضافه کرد تا انعطاف‌پذیری شبکه افزایش یابد.

(۵) **پویاسازی بیشتر پارامترها:** در مدل فعلی، برخی پارامترها مانند زمان سفر و احتمال خرابی مسیرها در طول بحران پویا در نظر گرفته شده‌اند. در آینده می‌توان سایر پارامترها مانند قیمت خرید دارو، هزینه نگهداری و هزینه کمبود را نیز به صورت وابسته به زمان مدل کرد.

(۶) **استفاده از رویکردهای دیگر برای مدلسازی عدم قطعیت:** در این پژوهش از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر سناریو استفاده شده است. در تحقیقات آینده می‌توان از رویکردهای دیگری مانند برنامه‌ریزی فازی نیز

- time, health services, and hygiene items for sustainable development goals. *Annals of Operations Research*, 351(3), 2191-2232. <https://doi.org/10.1007/s10479-025-06747-w>
- Hasanzadeh, H., & Bashiri, M. (2016). An efficient network for disaster management: Model and solution. *Applied Mathematical Modelling*, 40(5-6), 3688-3702. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.09.113>
- Hoang, S., Tran, C. C., Pham, V. T., & Tran, V. T. (2026). Multi-objective Optimization of the 7075 Aluminum Alloy Milling Process: A Comparative Study of MOPSO, NSGA-II, SPEA2, and MOACO. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 15(2), 211-221. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.15.2.211-221>
- Klibi, W., Ichoua, S., & Martel, A. (2018). Prepositioning emergency supplies to support disaster relief: a case study using stochastic programming. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 56(1), 50-81. <https://doi.org/10.1080/03155986.2017.1335045>
- Liu, A., Zhu, Q., Xu, L., Lu, Q., & Fan, Y. (2021). Sustainable supply chain management for perishable products in emerging markets: An integrated location-inventory-routing model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 150, 102319. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102319>
- Lobato, F. S., and Valder Steffen Jr. . (2017). *Multi-objective optimization problems: concepts and self-adaptive parameters with mathematical and engineering applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58565-9>
- Lu, C.-C., Ying, K.-C., & Chen, H.-J. (2016). Real-time relief distribution in the aftermath of disasters—A rolling horizon approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.05.002>
- Manopiniwes, W., & Irohara, T. (2017). Stochastic optimisation model for integrated decisions on relief supply chains: preparedness for disaster response. *International Journal of Production Research*, 55(4), 979-996. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1211340>
- Mete, H. O., & Zabinsky, Z. B. (2010). Stochastic optimization of medical supply location and distribution in disaster management. *International journal of production economics*, 126(1), 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.10.004>
- Mohammadi, R., Ghomi, S. F., & Jolai, F. (2016). Prepositioning emergency earthquake response supplies: A new multi-objective particle swarm optimization algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 40(9-10), 5183-5199. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.10.022>
- Bozorgi-Amiri, A., & Khorsi, M. (2016). A dynamic multi-objective location-routing model for relief logistic planning under uncertainty on demand, travel time, and cost parameters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1633-1648. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7923-3>
- Caunhye, A. M., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-economic planning sciences*, 46(1), 4-13. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004>
- Chan, F. T., Wang, Z., Goswami, A., Singhanian, A., & Tiwari, M. K. (2020). Multi-objective particle swarm optimisation based integrated production inventory routing planning for efficient perishable food logistics operations. *International Journal of Production Research*, 58(17), 5155-5174. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1701202>
- Cheng, C., Qi, M., Wang, X., & Zhang, Y. (2016). Multi-period inventory routing problem under carbon emission regulations. *International journal of production economics*, 182, 263-275. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.09.001>
- Deb, K. (2011). Multi-objective optimisation using evolutionary algorithms: an introduction. In *Multi-objective evolutionary optimisation for product design and manufacturing* (pp. 3-34). Springer London. https://doi.org/10.1007/978-0-85729-652-8_1
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II *IEEE transactions on evolutionary computation*, 30(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Ducatti, A. P. S., Doneda, L. R. Z. D. C., Lima, I. A. d. S., Cazane, A. L., Bertazzo, T. R., & Brito Junior, I. d. (2026). Games for humanitarian logistics and disaster management: a systematic review. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 16(1), 89-117. <https://doi.org/10.1108/JHLSCM-03-2025-0042>
- Foroozesh, N., Karimi, B., & Mousavi, S. (2022). Green-resilient supply chain network design for perishable products considering route risk and horizontal collaboration under robust interval-valued type-2 fuzzy uncertainty: A case study in food industry. *Journal of environmental management*, 307, 114470. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114470>
- Gen, M., Runwei Cheng, & Lin, a. L. (2008). *Network models and optimization: Multiobjective genetic algorithm approach*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-181-7>
- Ghaebi Panah, M., Khancheh-zarrin, S., Boyer, O., & Mahdavi-Amiri, N. (2025). A resilient model for humanitarian relief logistics: integrating relief

- Tofghi, S., Torabi, S. A., & Mansouri, S. A. (2016). Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty. *European journal of operational research*, 250(1), 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.059>
- Toregas, C., Swain, R., ReVelle, C., & Bergman, L. (1971). The location of emergency service facilities. *Operations research*, 19(6), 1363-1373. <https://doi.org/10.1287/opre.19.6.1363>
- Wang, F., Ge, X., Li, Y., Zheng, J., & Zheng, W. (2023). Optimising the distribution of multi-cycle emergency supplies after a disaster. *Sustainability*, 15(2), 902. <https://doi.org/10.3390/su15020902>
- Zhang, F., Liu, Y., Yun, H., Cao, C., & Liu, X. (2025a). Pre-and post-disaster allocation strategies of relief items in the presence of resilience. *Systems*, 13(8), 704. <https://doi.org/10.3390/systems13080704>
- Zhang, L., Yuan, N., Wang, J., & Li, J. (2025b). Research on location-inventory-routing optimization of emergency logistics based on multiple reliability under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 200, 110826. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110826>
- Zhu, X., Yao, K., Li, T., Guo, A., & Gao, X. (2025). Joint reserve-dispatch optimization for emergency supplies: a dual-penalty NSGA-II approach under fuzzy transportation uncertainty. *Systems Science & Control Engineering*, 13(1), 2567883. <https://doi.org/10.1080/21642583.2025.2567883>
- Moreno, A., Alem, D., & Ferreira, D. (2016). Heuristic approaches for the multiperiod location-transportation problem with reuse of vehicles in emergency logistics. *Computers & Operations Research*, 69, 79-96. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.12.002>
- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281. <https://doi.org/10.1287/opre.43.2.264>
- Pishvaei, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and systems*, 206, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010>
- Pradhananga, R., Mutlu, F., Pokharel, S., Holguín-Veras, J., & Seth, D. (2016). An integrated resource allocation and distribution model for pre-disaster planning. *Computers & Industrial Engineering*, 91, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.11.010>
- Rahimi, I., Gandomi, A. H., Nikoo, M. R., & Chen, F. (2023). A comparative study on evolutionary multi-objective algorithms for next release problem. *Applied Soft Computing*, 144, 110472. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110472>
- Rekabi, S., Sazvar, Z., & Goodarzi, F. (2023). A machine learning model with linear and quadratic regression for designing pharmaceutical supply chains with soft time windows and perishable products. *Decision Analytics Journal*, 9, 100325. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100325>
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Cheikhrouhou, N., & Taheri-Moghaddam, A. (2016a). An approximation approach to a trade-off among efficiency, efficacy, and balance for relief pre-positioning in disaster management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 93, 485-509. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.07.003>
- Rezaei-Malek, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Bozorgi-Amiri, A. (2016b). An interactive approach for designing a robust disaster relief logistics network with perishable commodities. *Computers & industrial engineering*, 94, 201-215. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.014>
- Rivera-Royero, D., Galindo, G., & Yie-Pinedo, R. (2016). A dynamic model for disaster response considering prioritized demand points. *Socio-economic planning sciences*, 55, 59-75. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2016.07.001>
- Shahrabadi, F., Kia, H., Heidari, A., & Khalilzadeh, M. (2024). A Fuzzy Bi-objective Mathematical Model for Perishable Medical Goods Supply Chain Network Considering Crisis Situations : An Empirical Study. *Health Services Insights*, 17, 11786329241288772. <https://doi.org/10.1177/11786329241288772>