



A Robust Multi-Objective Location–Allocation Model for Temporary Healthcare Centers under Demand Uncertainty and Medical Equipment Supply Constraints

Fatemeh Mojibian¹ 

Correspondence: Assistant Professor of Management Department, Faculty of Management and Financial Science, Khatam University, Tehran, Iran. Email Address: F.mojibian@khatam.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research Paper

Received: 23 September 2025

Received in revised form: 15 December 2025

Accepted: 6 June 2026

Available online: 16 September 2026

Keywords:

Healthcare Facility Location

Medical Equipment Supply Chain

Robust Optimization

Health System Resilience

Demand uncertainty

ABSTRACT

The increasing frequency of health crises, pandemics, and constraints on medical equipment supply has highlighted the growing need to design robust and resilient healthcare networks. Under such conditions, decisions concerning the location of healthcare centers, patient allocation, capacity planning, and medical equipment procurement under uncertainty have become major challenges for healthcare systems. This study develops a multi-objective mixed-integer linear programming model for the robust location–allocation of temporary healthcare centers with service-oriented resilience considerations. The proposed model integrates facility location, service allocation, capacity planning, and medical equipment procurement decisions under demand uncertainty and medical equipment supply constraints. To address uncertainty, a robust optimization approach based on the Mulvey framework is employed, which accounts for both expected cost minimization and the stability of system performance across different scenarios. In addition, a service-shortage control constraint and a shortage penalty are incorporated to strengthen the service-oriented resilience of the network. The proposed model includes two objective functions: minimizing the total robust cost and minimizing the patient accessibility index. The model was solved using the ϵ -constraint method in GAMS with the HiGHS solver. For computational evaluation, in addition to an illustrative example, 15 test instances in three sizes—small, medium, and large—were examined. The proposed model was also compared with a deterministic expected-value model and a scenario-based model without the robustness term. The decisions generated by the three models were evaluated through a total of 750 out-of-sample assessments. The Pareto-front analysis showed that, at the compromise solution, a 7.44% increase in robust cost improved the accessibility index by 18.80%. Moreover, the out-of-sample results indicated that, compared with the deterministic model, the proposed model reduced the mean and worst observed costs by 56.12% and 83.90%, respectively, while maintaining full demand coverage, compared with 96.93% coverage under the deterministic model. The findings indicate that scenario-based planning and robustness control can strengthen the service-oriented resilience of healthcare networks by reducing service shortages and maintaining demand coverage.

Cite this article: G. Akbari Arbatan, M. Bashokouh Ajirlou, Gh. Zarei, and N. Seifollahi, “Identifying the requirements for supply chain in Fast-Moving Consumer Goods (FMCG): A Thematic Analysis Approach, vol. 28, no. 2, pp. 119-142, 2026. DOI: <https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1721>



Introduction

Health crises, pandemics, natural disasters, and constraints on medical equipment supply place healthcare systems under simultaneous pressure to expand service capacity, preserve access, and control costs. In such conditions, decisions on where to establish temporary healthcare centers, how much capacity to install, how patients should be allocated, and how medical equipment should be procured are strongly interdependent. Decisions based only on average demand may appear economical at the planning stage but can create substantial shortages and emergency costs when realized demand exceeds expectations. Conversely, highly conservative plans can protect service continuity but may impose excessive fixed and operating costs. This trade-off makes robust and multi-objective planning particularly relevant to temporary healthcare networks.

Previous healthcare location-allocation studies have addressed facility location, patient allocation, capacity planning, uncertainty, accessibility, and resilience from different perspectives. However, these decisions are often modeled separately, or uncertainty is represented without explicitly linking equipment supply constraints to service capacity and shortage control. The present study addresses this gap through an integrated multi-objective mixed-integer linear programming formulation. Its contribution is a modeling contribution rather than a new solution algorithm: strategic location and capacity decisions, tactical medical-equipment procurement decisions, and operational service-allocation and shortage decisions are coordinated within a single robust framework. Resilience is interpreted in a service-oriented sense, namely the ability of the network to maintain demand coverage and limit unmet service requirements across demand scenarios.

The study adopts the two-component robust optimization logic associated with the Mulvey framework. Solution robustness is represented by penalizing deviations of scenario-specific costs from expected cost, while model robustness is supported through controlled service-shortage variables and an explicit upper bound on allowable shortage. This structure differs from a pure min-max formulation because all scenarios contribute according to their probabilities and the model balances expected performance against dispersion across scenarios rather than optimizing only against the single worst case. The study therefore evaluates not only the cost of robustness but also its effects on accessibility, demand coverage, shortage, and out-of-sample stability.

Research Objectives and Contribution

The model pursues two objectives. The first minimizes total robust cost, including facility establishment, capacity-related and equipment-procurement costs, service costs, shortage penalties, and a robustness term that penalizes cost dispersion across scenarios. The second minimizes a weighted patient-accessibility index. Accessibility is defined so that lower values indicate better access, while unmet demand is assigned an explicit distance-equivalent penalty to prevent shortage from artificially improving the accessibility objective. The epsilon-constraint method is used to generate efficient solutions and to quantify the trade-off between the two objectives.

The empirical evaluation has three purposes. First, an illustrative instance is used to explain the structure of the Pareto frontier and the managerial meaning of alternative cost-accessibility compromises. Second, a scalability experiment evaluates the computational behavior of the exact formulation over

small, medium, and large test instances. Third, the proposed robust model is compared with a deterministic expected-value model and a scenario-based model without the robustness term. The resulting first-stage decisions are then tested under new, out-of-sample demand and cost conditions. This comparison separates the benefit of explicitly representing uncertainty from the incremental effect of the robustness penalty.

Methodology

The proposed formulation is a multi-objective mixed-integer linear programming model. Binary variables determine facility opening and capacity-level decisions, while continuous variables represent equipment procurement, service allocation, and unmet demand. Demand and service costs vary across discrete scenarios, whereas equipment-supply capacities are treated as deterministic constraints. A shortage variable records any portion of demand that cannot be served in a scenario. Its use is penalized by a shortage coefficient, and the maximum admissible shortage is bounded by a policy parameter. This design preserves feasibility under stressed conditions while preventing unlimited reliance on shortage.

Robustness is introduced through two complementary mechanisms. For solution robustness, the model calculates scenario-specific operating outcomes and penalizes their absolute deviation from expected cost. The robustness coefficient, denoted by λ , controls the importance assigned to cost stability relative to expected performance. A baseline value of $\lambda = 0.5$ is used to keep the robustness term active without allowing it to dominate expected cost, and sensitivity analysis varies λ between zero and one. For model robustness, the shortage variable provides controlled flexibility when full service is not possible, the shortage penalty discourages its use, and the allowable-shortage parameter imposes an explicit service-level ceiling. A service-oriented resilience indicator is also used to interpret the worst-scenario demand coverage; a value of one represents full service coverage in every scenario considered.

The model is implemented in GAMS and solved with the HiGHS solver. The epsilon-constraint procedure is applied to the accessibility objective to generate Pareto-efficient solutions. In the illustrative experiment, 21 epsilon levels yield 16 unique efficient solutions. Computational scalability is assessed using 15 independently generated instances divided into three size classes, with five instances per class and fixed random seeds for reproducibility. The small class contains 224 variables, including 8 binary variables, and 127 constraints; the medium class contains 635 variables, including 12 binary variables, and 251 constraints; and the large class contains 1,887 variables, including 24 binary variables, and 545 constraints. Seven optimization runs are performed for each instance, resulting in 105 mixed-integer optimization problems.

For comparative validation, five additional medium-sized instances are evaluated under three model structures: a deterministic expected-value model, a scenario-based model with $\lambda = 0$, and the full robust model with $\lambda = 0.5$. For each instance and each model, the selected location, capacity, and procurement decisions are fixed and then tested in 50 out-of-sample scenarios, while service-allocation and shortage decisions are reoptimized. This design produces 750 out-of-sample linear-program evaluations. Performance is assessed using mean out-of-sample cost, worst observed cost, within-instance cost variability, mean shortage, demand-coverage percentage, accessibility, and main-model solution time.

Results and Discussion

The Pareto-front analysis confirms a clear trade-off between robust cost and accessibility. The minimum-cost anchor has a robust cost of 18,478.68 and an accessibility value of 261.10, whereas the best-accessibility anchor has a robust cost of 26,080.16 and an accessibility value of 110.40. A compromise solution has a robust cost of 19,853.88 and an accessibility value of 212.00. Relative to the minimum-cost solution, this compromise requires a 7.44% increase in robust cost but improves the accessibility index by 18.80%. Moving all the way to the best-accessibility anchor improves accessibility by 57.72% but increases robust cost by 41.14%. These results provide a direct quantitative basis for managerial choice: modest additional expenditure can obtain a meaningful accessibility improvement, while progressively stronger accessibility targets require substantially higher expenditure.

The scalability experiment shows that the exact formulation remains solvable over the tested range, although computation time rises markedly with problem size. All 105 optimization runs terminate with proven optimality and effectively zero optimality gap. The mean total solution time is 0.8372 seconds for small instances, 4.2998 seconds for medium instances, and 34.3188 seconds for large instances. The corresponding standard deviations are 0.2007, 0.6221, and 2.8312 seconds, respectively, and the maximum observed times are 1.188, 5.299, and 36.532 seconds. The increase in computational burden is therefore substantial but remains manageable for the experimental sizes considered. The pattern also indicates that decomposition or advanced approximation methods may become relevant for substantially larger real-world networks.

The out-of-sample comparison provides stronger evidence about the value of explicitly representing uncertainty. The deterministic expected-value model opens an average of 2.6 centers and plans approximately 350.68 units of capacity, whereas both scenario-based models open an average of 3 centers with approximately 427.8 units of capacity. The lower-capacity deterministic network records a mean service shortage of 11.2806 units and covers 96.93% of demand on average. Both scenario-based models achieve 100% demand coverage in all out-of-sample evaluations. The result shows that planning only for average demand can create an apparently cheaper but more fragile network, while additional capacity acts as a preventive investment against shortage under demand surges.

Cost performance reinforces this conclusion. Mean out-of-sample cost is 177,817.30 for the deterministic model, compared with 78,027.70 for the scenario-based model without the robustness term and 78,030.20 for the full robust model. Relative to the deterministic benchmark, the proposed model reduces mean out-of-sample cost by approximately 56.12%. The worst observed out-of-sample cost falls from 604,848.10 under the deterministic model to 97,361.22 under the proposed model, a reduction of about 83.90%. Cost variability is also dramatically lower once scenario-based planning is introduced: the mean within-instance standard deviation decreases from 96,350.53 in the deterministic model to 514.64 in the scenario-based model and 511.72 in the full robust model.

The incremental effect of the robustness term is positive but deliberately interpreted with caution. Compared with the scenario-based model without the robustness term, the full robust formulation reduces the mean cost standard deviation from 514.64 to 511.72, an improvement of approximately 0.57%, and improves the accessibility index by about 0.65%. Mean out-of-sample cost increases by only about 0.003%, while worst observed cost remains unchanged. The main-model solution time rises from

0.4156 to 0.5094 seconds, approximately 22.57%, but remains well below one second for these comparison instances. Thus, most of the performance gain comes from incorporating uncertainty through scenarios, while the robustness term provides a smaller additional improvement in cost stability and accessibility at negligible expected-cost sacrifice.

These findings also clarify the role of the robustness coefficient. Increasing λ raises the weight assigned to scenario-cost dispersion, but an increase in the robust objective value alone should not be interpreted as evidence of greater robustness because the coefficient itself directly changes the objective. In the illustrative sensitivity analysis, the main network structure, expected cost, shortage, and accessibility remain relatively stable across the tested range of λ . The out-of-sample reduction in cost variability therefore provides the more direct empirical evidence of the robustness term. From a managerial perspective, λ should be viewed as a policy parameter that expresses how much importance the decision maker assigns to cost stability relative to expected performance.

Conclusions and Implications

This study develops an integrated robust multi-objective framework for temporary healthcare network design under demand uncertainty and medical equipment supply constraints. The model coordinates location, capacity, service-allocation, equipment-procurement, and shortage-management decisions while explicitly representing the cost-accessibility trade-off. Its primary contribution is the integrated formulation and the empirical assessment of robustness, rather than the introduction of a new optimization algorithm. The computational results show that scenario-based planning can substantially improve service continuity and out-of-sample economic performance compared with deterministic expected-value planning.

For healthcare managers, the results suggest that the lowest initial-cost network is not necessarily the most economical once uncertain demand is realized. Opening an additional center or installing greater capacity may prevent severe shortage penalties and extreme operating costs. The Pareto frontier can be used to select a solution consistent with available budgets and accessibility targets, while the allowable-shortage parameter, shortage penalty, and robustness coefficient provide additional policy levers for controlling service levels and stability. The distinction between scenario planning and the robustness penalty is also important: scenario representation delivers the dominant improvement, whereas the robustness term fine-tunes stability without materially increasing expected cost in the tested instances.

The study has several limitations. The data are experimental rather than drawn from a real healthcare network; equipment-supply capacity and travel conditions are treated as deterministic; service-oriented resilience focuses on maintaining demand coverage and does not explicitly model temporal recovery, adaptation, or infrastructure restoration; and the independent value of integrated decision making is not tested against a fully sequential planning approach. Future research should validate the formulation with field data, incorporate uncertainty in supply capacity, travel time, infrastructure availability, and workforce resources, compare integrated and sequential decision structures, and consider geographic and social equity criteria. For very large-scale networks, decomposition, hybrid exact-heuristic procedures, and other scalable solution approaches should also be investigated.

مدل چندهدفه استوار مکان‌یابی-تخصیص مراکز درمانی موقت تحت عدم قطعیت تقاضا و

محدودیت تأمین تجهیزات

فاطمه مجیبیان^۱

^۱ استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و علوم مالی، دانشگاه خاتم، تهران، (نویسنده مسئول). رایانامه: f.mojibian@khatam.ac.ir

چکیده

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۶

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۶/۲۵

کلیدواژه‌ها:

مکان‌یابی مراکز درمانی

زنجیره تأمین تجهیزات پزشکی

بهینه‌سازی استوار

تاب‌آوری سامانه سلامت

عدم قطعیت تقاضا

افزایش بحران‌های سلامت، همه‌گیری‌ها و محدودیت‌های تأمین تجهیزات پزشکی، ضرورت طراحی شبکه‌های درمانی تاب‌آور و استوار را بیش از پیش آشکار کرده است. در چنین شرایطی، تصمیم‌گیری درباره مکان‌یابی مراکز درمانی، تخصیص بیماران، ظرفیت‌گذاری و تأمین تجهیزات پزشکی تحت عدم قطعیت، به یکی از چالش‌های اصلی نظام سلامت تبدیل شده است. پژوهش حاضر یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح چندهدفه برای مکان‌یابی استوار مراکز درمانی با ملاحظات تاب‌آوری خدمت‌محور ارائه می‌دهد که تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص خدمات، ظرفیت‌گذاری و تأمین تجهیزات پزشکی را به صورت یکپارچه و تحت عدم قطعیت تقاضا و محدودیت تأمین تجهیزات در نظر می‌گیرد. برای مدل‌سازی عدم قطعیت، از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر چارچوب Mulvey استفاده شده است که علاوه بر حداقل‌سازی هزینه مورد انتظار، پایداری عملکرد سیستم در سناریوهای مختلف را نیز لحاظ می‌کند. همچنین، به منظور تقویت تاب‌آوری خدمت‌محور شبکه، محدودیت کنترل کمبود خدمات و جریمه کمبود در مدل اعمال شده است. مدل پیشنهادی دارای دو تابع هدف شامل حداقل‌سازی هزینه کل استوار و حداقل‌سازی شاخص دسترسی بیماران به خدمات درمانی است. مدل با استفاده از روش ϵ -constraint در محیط GAMS و حل‌کننده HiGHS حل شد. برای ارزیابی محاسباتی، علاوه بر مثال تشریحی، ۱۵ مسئله در سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ بررسی شد و مدل پیشنهادی با مدل قطعی ارزش مورد انتظار و مدل سناریومحور بدون جمله استواری مقایسه گردید. تصمیمات حاصل از سه مدل نیز در مجموع در ۷۵۰ ارزیابی خارج از نمونه آزمون شدند. نتایج جبهه پارتو نشان داد که در راه‌حل میانی جبهه پارتو، افزایش ۷/۴۴ درصدی هزینه استوار، شاخص دسترسی را ۱۸/۸۰ درصد بهبود می‌دهد. همچنین، در ارزیابی خارج از نمونه، مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل قطعی، متوسط هزینه و بیشترین هزینه مشاهده‌شده را به ترتیب ۵۶/۱۲ و ۸۳/۹۰ درصد کاهش داد و پوشش کامل تقاضا را در برابر پوشش ۹۶/۹۳ درصدی مدل قطعی حفظ کرد. یافته‌ها بیانگر آن است که برنامه‌ریزی سناریومحور و کنترل استواری تصمیمات می‌تواند با کاهش کمبود خدمات و حفظ پوشش تقاضا، تاب‌آوری خدمت‌محور شبکه سلامت را تقویت کند.

استناد: مجیبیان، فاطمه، "مدل چندهدفه استوار مکان‌یابی-تخصیص مراکز درمانی موقت تحت عدم قطعیت تقاضا و محدودیت تأمین

تجهیزات، دوره ۲۸، شماره ۲، صفحات ۱۱۹-۱۴۲، ۱۴۰۵. DOI: <https://doi.org/10.47176/scmj.2026.1721>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).



۱- مقدمه

رویکرد در شرایط بحران، که دسترسی به تجهیزات حیاتی محدود و بحرانی است، می‌تواند منجر به طرح‌هایی غیرواقع‌بینانه و غیرقابل اجرا شود. تنها تعداد معدودی از پژوهش‌ها، مانند هیهات و همکاران [۳]، به‌طور هم‌زمان به مکان‌یابی مراکز و برنامه‌ریزی تأمین منابع (از جمله پرسنل و تجهیزات) پرداخته‌اند. این مطالعه از چارچوب بهینه‌سازی توزیع‌ناپذیر^۵ (DRO) بهره می‌برد که برای شرایطی با اطلاعات توزیعی محدود (مانند بحران‌های جدیدالظهور^۶ مانند همه‌گیری کووید-۱۹) مناسب‌تر از برنامه‌ریزی تصادفی است. با این حال، مدل هیهات و همکاران [۳]، بر شبکه‌های سلامت عمومی با تمرکز بر بیمارستان‌های موجود و مراکز جایگزین طراحی شده و تصمیمات تأمین تجهیزات را به‌صورت خارج از مدل اصلی (به‌عنوان پارامتر ورودی) در نظر می‌گیرد، در حالی که مدل پیشنهادی ما تصمیمات تأمین تجهیزات پزشکی را به‌صورت درون‌مدل و هم‌زمان با سایر تصمیمات بهینه می‌کند.

علاوه بر این، مدیریت کمبود خدمات در مدل‌های موجود به‌صورت ناکافی مورد توجه قرار گرفته است. بسیاری از مدل‌ها یا کمبود را به‌طور کامل ممنوع اعلام می‌کنند [۸و۷]، که در شرایط بحران غیرواقع‌بینانه است یا تنها آن را در تابع هدف جریمه می‌کنند [۲]. این رویکرد، انعطاف‌پذیری لازم برای تصمیم‌گیری در شرایط منابع محدود را فراهم نمی‌کند. در مقابل، اعمال یک محدودیت فعال بر کمبود مجاز می‌تواند چارچوبی سیاست‌محور برای تعادل بین هزینه و سطح خدمات فراهم آورد.

در پاسخ به این شکاف‌های پژوهشی، این مقاله یک مدل یکپارچه و استوار چندهدفه برای طراحی شبکه مراکز درمانی موقت در پاسخ به بحران‌های طبیعی و بهداشتی ارائه می‌دهد. مدل پیشنهادی با بهره‌گیری از چارچوب استواری دو جزئی مالوی و همکاران [۹] به‌طور هم‌زمان دو هدف کلیدی را دنبال می‌کند: (۱) حداقل‌سازی هزینه کل استوار، شامل هزینه‌های احداث، تأمین تجهیزات و عملیات، (۲) حداقل‌سازی شاخص دسترسی وزنی برای بهبود دسترسی بیماران به خدمات درمانی. تاب‌آوری نیز در این پژوهش به‌صورت تاب‌آوری خدمت‌محور و از طریق توان شبکه در حفظ پوشش تقاضا و کنترل کمبود خدمات در سناریوهای مختلف تقاضا ارزیابی می‌شود. در چارچوب مالوی، استواری جواب از طریق جریمه انحراف هزینه‌های سناریویی از هزینه مورد انتظار و استواری مدل از طریق کنترل کمبود خدمت و محدودکردن آن در سطح مجاز اعمال می‌شود. بنابراین، مدل به‌طور هم‌زمان پایداری هزینه و قابلیت اجرای تصمیمات در شرایط مختلف تقاضا را مورد توجه قرار

سامانه‌های سلامت در مواجهه با بلایای طبیعی و بحران‌های بهداشتی عمومی، از جمله زلزله، سیل و همه‌گیری‌ها، با چالش‌های عظیمی در زمینه دسترسی به منابع محدود و پاسخ‌گویی به تقاضای ناگهانی و غیرقابل‌پیش‌بینی مواجه می‌شوند [۱و۲]. در چنین شرایطی، راه‌اندازی سریع مراکز درمانی موقت^۱ به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهبردهای مدیریت بحران، نقش حیاتی در کاهش مرگ‌ومیر و ارتقای کیفیت خدمات اضطراری ایفا می‌کند [۳و۴].

در دهه‌های اخیر، مطالعات متعددی به مسئله مکان‌یابی مراکز اورژانسی پرداخته‌اند. رویکردهای سنتی عمدتاً بر پایه مدل‌های پوششی (مانند مجموعه پوششی ماکزیمال) یا میانه‌یابی (مانند p-median) بوده‌اند که هدف اصلی آن‌ها حداقل‌سازی هزینه یا حداکثرسازی پوشش جغرافیایی است [۵]. با این حال، این مدل‌ها اغلب فرض قطعی بودن پارامترها را در نظر گرفته و از توانایی لازم برای مقابله با عدم قطعیت ذاتی بلایا برخوردار نیستند. در پاسخ به این محدودیت، پژوهشگران به سمت چارچوب‌هایی مانند برنامه‌ریزی تصادفی^۲ و بهینه‌سازی استوار^۳ گرایش یافته‌اند.

مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی، با در نظر گرفتن یک توزیع احتمالی برای پارامترهای نامعین (مانند تقاضا)، سعی در حداقل‌سازی هزینه مورد انتظار دارند [۴و۲]. در مقابل، رویکردهای استوار، مانند مدل پیشنهادی توسط لی و همکارانش [۱] با استفاده از معیار حداقل پشیمانی^۴، راه‌حلی ارائه می‌دهند که در بدترین سناریو نیز عملکرد قابل‌قبولی داشته باشد. با این وجود، این مدل‌ها عمدتاً بر یکی از اهداف «هزینه» یا «پوشش» متمرکز بوده و از یکپارچه‌سازی تصمیمات کلیدی در سطوح مختلف سیستم غفلت می‌کنند. به‌عنوان مثال، کو و همکاران [۶] تنها به مکان‌یابی و ظرفیت‌گذاری مراکز فوریت‌های پزشکی با هدف حداقل‌سازی هزینه پرداخته‌اند، در حالی که تصمیمات تأمین تجهیزات یا مدیریت کمبود در مدل آن‌ها وجود ندارد. همچنین، گائو و همکاران [۷] مسئله مکان‌یابی-تخصیص را با دو هدف زمان سفر و خطر مرگ‌ومیر، بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در زنجیره تأمین یا یکپارچه‌سازی تصمیمات عملیاتی حل نموده‌اند.

در بسیاری از مطالعات، ظرفیت مراکز به‌صورت پارامتر ورودی در نظر گرفته شده و زنجیره تأمین تجهیزات (مانند تخت، ICU، ونتیلاتور و پرسنل) خارج از مدل بهینه‌سازی قرار می‌گیرد [۵]. این

^۱ Temporary Medical Centers (TMCs)^۲ Stochastic Programming^۳ Robust Optimization^۴ minimax regret^۵ distributionally robust optimization^۶ Emerging Crises

چندهدفه استوار برای امداد رسانی اضطراری تحت عدم قطعیت تقاضا، منابع و هزینه توسعه دادند و از ترکیب NSGA-II و روش-ε constraint برای حل مدل استفاده کردند. اگرچه پژوهش آن‌ها مفهوم استواری را وارد مدل نمود، اما مسئله تأمین تجهیزات درمانی و یکپارچه‌سازی تصمیمات زنجیره تأمین سلامت همچنان مورد توجه قرار نگرفت.

در حوزه تاب‌آوری، اردکانی و همکاران [۱۵] مدلی مقاوم و تاب‌آور برای مقابله با بحران کووید-۱۹ ارائه کردند که از منابع جایگزین نظیر بیمارستان‌های صحرایی و نیروهای انسانی پشتیبان استفاده می‌کرد. همچنین پارک و همکاران [۱۶] یک مدل مکان‌یابی-تخصیص برای خدمات پزشکی اضطراری مبتنی بر پهباد ارائه دادند که در آن تاب‌آوری شبکه و آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در نظر گرفته شده بود. این پژوهش از معدود مطالعاتی است که هم‌زمان مفاهیم تاب‌آوری، کمبود مجاز و زنجیره تأمین را در سطحی محدود مدنظر قرار داده است.

در ادامه، مطالعات جدیدتر به سمت مدل‌های داده‌محور و شبکه‌های سلامت هوشمند حرکت کرده‌اند. لیو و همکاران [۲] مسئله یکپارچه مکان‌یابی مراکز درمانی و اعزام بیماران را تحت عدم قطعیت تقاضا، خودارجاعی بیماران و پیشرفت بیماری بررسی کردند. هوو و همکاران [۱۷] نیز شبکه لجستیک سلامت را تحت عدم قطعیت تقاضا با رویکرد استوار طراحی کردند. همچنین لی و همکاران [۱] اثر بلایای ثانویه بر مکان‌یابی مراکز درمانی موقت را در قالب یک مدل استوار بررسی نمودند. هیهات و همکاران [۳] نیز با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی توزیعی-استوار، برنامه‌ریزی تاب‌آور منابع سلامت را تحت اختلالات منابع و تقاضا توسعه دادند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در ادبیات، بر اساس مقایسه ارائه شده در جدول (۱)، اغلب مطالعات پیشین تنها بخشی از ابعاد مسئله را پوشش داده‌اند. بسیاری از پژوهش‌ها صرفاً بر مکان‌یابی و تخصیص تمرکز داشته‌اند و یا مؤلفه‌هایی نظیر تأمین تجهیزات پزشکی، کمبود مجاز، استواری و تاب‌آوری را به‌صورت هم‌زمان در نظر نگرفته‌اند. افزون بر این، در بسیاری از مدل‌ها عدم قطعیت تنها در قالب تقاضا مدل شده و اختلالات زنجیره تأمین سلامت کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در مقایسه با مطالعه بخشنده و همکاران [۵] که یک مدل مکان‌یابی-تخصیص استوار برای خدمات فوریت‌های پزشکی تحت عدم قطعیت تقاضا و منابع ارائه کردند، پژوهش حاضر چند تمایز اساسی دارد. نخست، مدل پیشنهادی از چارچوب استواری مالوی و وندربی [۹] استفاده می‌کند که به‌طور هم‌زمان «استواری جواب» و «استواری مدل» را پوشش می‌دهد؛ در حالی که در مطالعه بخشنده

می‌دهد. سهم اصلی پژوهش نیز در یکپارچه‌سازی تصمیمات استراتژیک شامل مکان‌یابی و ظرفیت‌گذاری، تصمیمات تاکتیکی تأمین تجهیزات پزشکی و تصمیمات عملیاتی تخصیص خدمات و مدیریت کمبود در یک چارچوب ریاضی است.

۲- مروری بر پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، مکان‌یابی و طراحی شبکه مراکز درمانی به یکی از موضوعات مهم در حوزه تحقیق در عملیات و مدیریت بحران تبدیل شده است. افزایش رخدادهای بحران‌زا نظیر همه‌گیری‌ها، بلایای طبیعی و اختلالات زنجیره تأمین موجب شده است که پژوهشگران توجه ویژه‌ای به توسعه مدل‌های تاب‌آور و استوار برای سامانه‌های سلامت داشته باشند [۱۰ و ۱۱]. در طول چنین بحران‌هایی، زیرساخت‌های سنتی مراقبت بهداشت ممکن است دچار فشار بیش از حد شده یا حتی از کار بیفتند، به همین دلیل ایجاد تأسیسات موقت اضطراری برای تضمین تداوم ارائه خدمات پزشکی حیاتی می‌شود [۱۲]. بخش عمده مطالعات اولیه، بر تصمیمات کلاسیک مکان‌یابی و تخصیص متمرکز بوده‌اند و عدم قطعیت یا اختلالات محیطی را به‌صورت محدود در نظر گرفته‌اند.

کو و همکاران [۶] یک مدل MILP برای طراحی مراکز فوریت‌های پزشکی با در نظر گرفتن چند نوع بیماری اضطراری ارائه کردند که تمرکز اصلی آن بر مکان‌یابی، تخصیص و ظرفیت مراکز بود. با وجود جامع بودن ساختار تصمیم‌گیری، مدل مذکور فاقد در نظرگیری عدم قطعیت، تاب‌آوری و استواری بود. گائو و همکاران [۷] نیز مسئله مکان‌یابی-تخصیص مراکز خدمات پزشکی در شرایط بحران را با استفاده از یک مدل MINLP چندهدفه و الگوریتم ژنتیک ترکیبی بررسی کردند، اما مدل آن‌ها بیشتر بر تخصیص و پوشش خدمات تمرکز داشت و مؤلفه‌های استوارسازی و زنجیره تأمین تجهیزات پزشکی در آن دیده نمی‌شد.

با گسترش پژوهش‌ها در حوزه مدیریت بحران، موضوع عدم قطعیت تقاضا و اختلال زیرساخت‌ها مورد توجه قرار گرفت. اوکسوز و ساتوگلو [۴] یک مدل تصادفی دومرحله‌ای برای مکان‌یابی مراکز درمانی موقت ارائه کردند که عدم قطعیت تقاضا و آسیب‌پذیری جاده‌ها و بیمارستان‌ها را در شرایط بحران لحاظ می‌کرد. با این حال، مدل مذکور همچنان فاقد ساختار تاب‌آور و تصمیمات مرتبط با تأمین تجهیزات پزشکی بود. در ادامه، هاشمی و همکاران [۱۳] با استفاده از خطوط تراز جغرافیایی، مسئله مکان‌یابی مراکز EMS را مدل‌سازی کردند، اما پژوهش آن‌ها نیز تنها بر ابعاد مکان‌یابی و تخصیص متمرکز بود.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها به سمت مدل‌های چندهدفه، استوار و تاب‌آور حرکت کرده‌اند. عشقی و همکاران [۱۴] یک مدل

و همکاران تمرکز اصلی بر کنترل هزینه مورد انتظار بوده است. دوم، در این پژوهش تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص، ظرفیت‌گذاری و تأمین تجهیزات پزشکی به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی شده‌اند، در حالی که در پژوهش مذکور زنجیره تأمین تجهیزات به‌صورت مستقل از مدل اصلی در نظر گرفته شده بود. سوم، مدل حاضر با تعریف محدودیت کمبود مجاز، امکان کنترل سیاست‌محور سطح خدمت را

فراهم می‌سازد و علاوه بر استواری، مفهوم تاب‌آوری شبکه سلامت را نیز وارد ساختار تصمیم‌گیری می‌کند. بنابراین، همان‌گونه که در جدول مقایسه پژوهش‌ها مشاهده می‌شود، پژوهش حاضر با توسعه یک مدل MILP چندهدفه، استوار و تاب‌آور تحت عدم قطعیت تقاضا و محدودیت تأمین تجهیزات پزشکی، بخشی از شکاف شناسایی شده در ادبیات را مورد توجه قرار می‌دهد.

جدول (۱): مقایسه پیشینه پژوهش‌های حوزه مکان‌یابی مراکز درمانی

روش حل	بهینه-سازی استوار	کمبود مجاز	تصمیمات ساختاری مدل				تاب-آوری	نوع عدم قطعیت	تعداد اهداف	نوع مدل	سال	پژوهش
			زنجیره تامین تجهیزات	ظرفیت	تخصیص	مکانیابی						
+ CPLEX GA	×	×	×	✓	✓	✓	×	ندارد	تک هدفه	MILP	۲۰۱۶	کو و همکاران [۶]
Hybrid GA + FCM	×	×	×	×	✓	✓	×	ندارد	چند هدفه	MINLP	۲۰۱۷	گائو و همکاران [۷]
CPLEX	×	✓	×	✓	✓	✓	×	تقاضا + آسپ پذیري بیمارستان	تک هدفه	MILP	۲۰۲۰	اوکسوز و ساتوغلو [۴]
NSGA-II + ε -constraint	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	تقاضا، منابع، هزینه	چند هدفه	MINLP	۲۰۲۲	عشقی و همکاران [۱۴]
+ CPLEX GA	×	✓	×	×	✓	✓	×	ندارد	تک هدفه	MILP	۲۰۲۲	هاشمی و همکاران [۱۳]
Multi-objective Tabu Search	×	×	×	✓	✓	✓	×	ندارد	چند هدفه	MILP	۲۰۲۲	ژانگ و همکاران [۱۸]
Hybrid TS+HS	×	×	×	✓	✓	✓	×	تقاضا	چند هدفه	MILP	۲۰۲۳	علینقیان و همکاران [۱۹]
CPLEX	✓	✓	×	✓	✓	✓	×	تقاضا	چند هدفه	MILP	۲۰۲۳	اردکانی و همکاران [۱۵]
Branch-and-Price + RMH	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	تقاضا + آسپ پذیري زیرساخت‌ها	تک هدفه	MILP	۲۰۲۳	پارک و همکاران [۱۶]

جدول (۱): مقایسه پیشینه پژوهش‌های حوزه مکان‌یابی مراکز درمانی

پژوهش	سال	نوع مدل	تعداد اهداف	نوع عدم قطعیت	تاب-آوری	تصمیمات ساختاری مدل				کمبود مجاز	بهینه‌سازی استوار	روش حل
						مکان‌یابی	تخصیص	ظرفیت	زنجیره تامین تجهیزات			
لیو و همکاران [۲]	۲۰۲۵	MILP	چند هدفه	تقاضا + رفتار بیمار	✓	✓	✓	✓	×	×	×	DDH algorithm
هوو و همکاران [۱۷]	۲۰۲۵	MILP	چند هدفه	تقاضا	×	✓	✓	×	×	✓	✓	Gray wolf algorithm
وان و همکاران [۲۰]	۲۰۲۶	MILP	چند هدفه	زمان حمل‌ونقل و هزینه‌ها	×	✓	✓	✓	✓	×	✓	CBA+TSA
المراج و همکاران [۲۱]	۲۰۲۶	MILP	چند هدفه	تقاضا + منابع	×	✓	✓	✓	×	✓	✓	Dijkstra + K-Means
فتاحی و همکاران [۲۲]	۲۰۲۳	MILP	چند هدفه	تقاضا، ظرفیت، هزینه	×	✓	×	✓	✓	×	✓	GAMS + CPLEX
شن و همکاران [۲۳]	۲۰۲۶	MILP	چند هدفه	تقاضا + زمان سفر	×	✓	✓	✓	×	×	×	الگوریتم حریصانه (EABG)
لی و همکاران [۱]	۲۰۲۶	MILP	چند هدفه	بلایای ثانویه	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	Scenario Relaxation

جمله نوسانات تقاضای بیماران، تغییرات هزینه‌های ارائه خدمت، اختلال در زنجیره تأمین تجهیزات پزشکی و محدودیت ظرفیت مراکز و تأمین‌کنندگان. در چنین شرایطی، اتکا به مدل‌های قطعی می‌تواند به تصمیماتی منجر شود که در شرایط واقعی از پایداری و قابلیت اجرا برخوردار نباشند.

بر این اساس، در پژوهش حاضر یک مدل ریاضی چندهدفه استوار برای مکان‌یابی مراکز درمانی در شرایط عدم قطعیت تدوین شده است. در این مدل، تصمیمات اصلی شامل انتخاب مراکز درمانی و سطوح ظرفیت آن‌ها، برنامه‌ریزی تأمین تجهیزات و ملزومات پزشکی، و تخصیص خدمات به مناطق تقاضا است. ساختار مدل به‌گونه‌ای طراحی شده است که هم‌زمان دو هدف اصلی را دنبال می‌کند: نخست، کمینه‌سازی هزینه‌های کل سیستم با در نظر گرفتن

سهم مدل‌سازی این پژوهش در یکپارچه‌سازی هم‌زمان تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص، ظرفیت‌گذاری و تأمین تجهیزات پزشکی همراه با کنترل کمبود مجاز است؛ موضوعی که بر اساس بررسی مطالعات منتخب، کمتر به‌صورت هم‌زمان و در قالب یک مدل چندهدفه استوار با معیار دسترسی و تاب‌آوری خدمت‌محور بررسی شده است.

۳- بیان مسئله و تشریح مدل ریاضی

مکان‌یابی مراکز درمانی یکی از تصمیمات راهبردی در برنامه‌ریزی و توسعه زیرساخت‌های سلامت به‌شمار می‌آید؛ زیرا انتخاب مکان مناسب، به‌طور مستقیم بر میزان دسترسی جمعیت به خدمات درمانی، سطح پوشش مناطق تقاضا، عدالت در توزیع خدمات و کارایی کلی شبکه درمانی اثر می‌گذارد. از سوی دیگر، این تصمیم‌گیری در عمل با عدم قطعیت‌های متعددی همراه است؛ از

$Cap_{j,r,s}^{sup}$: حداکثر ظرفیت تأمین تجهیز/ملزوم پزشکی r توسط
تأمین‌کننده j در سناریوی s
 $Cons_{m,r}$: مقدار تجهیز/ملزوم پزشکی r مورد نیاز برای ارائه
خدمت نوع m
 $Cap_{i,n}$: حداکثر ظرفیت قابل استقرار در مرکز i با سطح ظرفیت n
 $Dist_{i,k}$: فاصله مرکز درمانی i تا منطقه k
 w_k : وزن اهمیت منطقه k
 π_s : احتمال وقوع سناریوی s
 ω : ضریب جریمه کمبود خدمت
 λ : وزن استواری جواب
 α : حداکثر نسبت کمبود مجاز
متغیرهای تصمیم:

$x_{i,n} \in \{0,1\}$: اگر مرکز درمانی i با ظرفیت n انتخاب شود
معادل ۱؛ در غیر این صورت صفر
 $Q_{i,m} \geq 0$: تعداد خدمت نوع m برنامه‌ریزی شده برای مرکز i
 $y_{j,i,r} \geq 0$: مقدار تجهیز r تحویلی از تأمین‌کننده j به مرکز i
 $z_{i,c,m,s} \geq 0$: مقدار خدمت نوع m تخصیص یافته از مرکز i
منطقه c در سناریو s
 $\delta_{c,m,s} \geq 0$: کمبود خدمت نوع m در منطقه c در سناریوی s
 $\theta_s^+, \theta_s^- \geq 0$: انحراف مثبت و منفی هزینه سناریو s

۳-۲- مدل‌سازی توابع هدف و محدودیت‌ها

در این بخش فرمول‌بندی مسئله طراحی مدل مکان‌یابی استوار ارائه می‌گردد. هدف از این مدل، تعیین هم‌زمان مکان و ظرفیت مراکز درمانی، برنامه‌ریزی تأمین تجهیزات و تخصیص خدمت به مناطق تقاضا در شرایط عدم قطعیت است. از این‌رو، برخی تصمیم‌ها به صورت قطعی و مرحله اول و برخی دیگر به صورت سناریومحور و مرحله دوم مدل‌سازی شده‌اند.

تابع هدف اول: کمینه سازی هزینه کل استوار

$$\bullet \text{ هزینه سناریویی } Z_s$$

$$Z_s = \sum_{i \in I} \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} TC_{i,c,m,s}^{serv} \cdot z_{i,c,m,s} + \omega \sum_{c \in C} \sum_{m \in M} \delta_{c,m,s} \quad (1)$$

هزینه‌های احداث، تأمین و ارائه خدمت؛ و دوم، کمینه‌سازی عدم جذابیت مکانی مراکز درمانی بر اساس فاصله آن‌ها از نواحی مهم جمعیتی و خدماتی. به این ترتیب، مدل قادر است میان ملاحظات اقتصادی و مکانی تعادل برقرار کند.

برای انعکاس شرایط واقعی، عدم قطعیت‌های مسئله در قالب سناریوهای مختلف مدل‌سازی شده‌اند و از رویکرد استوار سناریومحور برای حفظ پایداری جواب‌ها در برابر تغییرات پارامترها استفاده شده است. در این چارچوب، بخشی از تصمیم‌ها پیش از تحقق سناریوها اتخاذ می‌شوند و بخشی دیگر پس از مشخص شدن شرایط هر سناریو تنظیم می‌گردند. همچنین، برای جلوگیری از غیرقابل‌حل شدن مدل در سناریوهای نامطلوب، متغیرهای کمبود با جریمه مناسب در تابع هدف لحاظ شده‌اند تا مدل ضمن حفظ قابلیت اجرا، انعطاف لازم را نیز داشته باشد.

۳-۱- مدل‌سازی ریاضی

ابتدا نمادهای به‌کاررفته در مدل‌سازی معرفی می‌گردند.

شاخص‌ها:

$i \in I$: مراکز درمانی/بیمارستان‌های کاندید
 $j \in J$: تأمین‌کنندگان تجهیزات و ملزومات پزشکی
 $c \in C$: مناطق تقاضا/مناطق جمعیتی
 $r \in R$: انواع تجهیزات و ملزومات پزشکی
 $m \in M$: انواع ظرفیت/خدمات درمانی (تخت عادی، ICU، اورژانس و ...)
 $k \in K$: مراکز جمعیتی/مناطق با اهمیت خدمت‌رسانی
 $s \in S$: سناریوهای عدم قطعیت
 $n \in N$: سطوح ظرفیت پروژه

پارامترها:

$D_{c,m,s}$: تقاضای منطقه c برای خدمت نوع m در سناریوی s
 $TC_{i,c,m,s}^{serv}$: هزینه ارائه خدمت/انتقال بیمار از مرکز i به منطقه c
در سناریوی s
 $PC_{j,r}$: هزینه خرید تجهیز/ملزوم پزشکی r از تأمین‌کننده j
 $TC_{j,i,r}^{mat}$: هزینه حمل تجهیز/ملزوم پزشکی r از تأمین‌کننده j به مرکز i
 $ES_{i,n}$: هزینه احداث/راه‌اندازی مرکز درمانی i با سطح ظرفیت n

اهمیت هر مرکز را نشان می‌دهد و انتخاب مکان‌هایی با فاصله کمتر از نقاط مهم را مطلوب‌تر می‌سازد.

محدودیت تعادل تجهیزات پزشکی:

$$\sum_{j \in J} y_{j,i,r} = \sum_{m \in M} \text{Cons}_{m,r} \cdot Q_{i,m} \quad \forall i \in I, r \in R \quad (4)$$

این محدودیت تضمین می‌کند که مقدار تجهیزات و ملزومات دریافتی هر مرکز درمانی دقیقاً با میزان موردنیاز برای اجرای برنامه‌ریزی شده آن مرکز برابر باشد. به این ترتیب، تعادل میان تأمین و مصرف تجهیزات حفظ می‌شود.

محدودیت پاسخ‌گویی به تقاضای مناطق:

$$\sum_{i \in I} z_{i,c,m,s} + \delta_{c,m,s} \geq D_{c,m,s} \quad \forall c \in C, m \in M, s \in S \quad (5)$$

این محدودیت بیان می‌کند که تقاضای هر منطقه در هر سناریو باید تا حد امکان پاسخ داده شود. در صورتی که تأمین کامل تقاضا ممکن نباشد، متغیر $\delta_{c,m,s}$ کمبود را ثبت می‌کند تا مدل همچنان شدنی باقی بماند.

محدودیت استواری:

$$Z_s - \sum_{s \in S} \pi_s Z_s = \theta_s^+ - \theta_s^- \quad \forall s \in S \quad (6)$$

این رابطه برای سنجش انحراف هزینه هر سناریو از میانگین وزن‌دار به مدل اجازه θ_s^+ و θ_s^- هزینه‌ها استفاده می‌شود. متغیرهای می‌دهند تا میزان نوسان هزینه را به‌صورت خطی کنترل کرده و جواب پایدارتری به دست آید.

ارتباط بین ظرفیت برنامه‌ریزی شده و تخصیص خدمت:

$$Q_{i,m} \geq \sum_{c \in C} z_{i,c,m,s} \quad \forall i \in I, m \in M, s \in S \quad (7)$$

این محدودیت نشان می‌دهد که تعداد خدمات یا ظرفیت تخصیص‌یافته از هر مرکز نباید از ظرفیت برنامه‌ریزی شده آن مرکز بیشتر شود. بنابراین، مقدار خدمت تخصیص‌یافته در هر سناریو در چارچوب ظرفیت از پیش تعیین‌شده باقی می‌ماند.

ظرفیت تأمین‌کنندگان:

$$\sum_{i \in I} y_{j,i,r} \leq \text{Cap}_{j,r,s}^{\sup} \quad \forall j \in J, r \in R, s \in S \quad (8)$$

این قید ظرفیت تأمین تجهیزات و ملزومات را برای هر تأمین‌کننده و هر سناریو محدود می‌کند. به این معنا که مقدار کل تجهیز تحویلی از هر تأمین‌کننده نمی‌تواند از ظرفیت در دسترس آن فراتر رود.

ظرفیت مراکز درمانی:

$$\sum_{m \in M} Q_{i,m} \leq \sum_{n \in N} \text{Cap}_{i,n} \cdot x_{i,n} \quad \forall i \in I \quad (9)$$

این بخش هزینه‌های وابسته به سناریو را نشان می‌دهد. جمله اول هزینه ارائه خدمت یا انتقال بیمار از مراکز درمانی به مناطق تقاضا را در هر سناریو محاسبه می‌کند و جمله دوم نیز کمبود تقاضا را با یک ضریب جریمه در تابع هزینه وارد می‌کند تا مدل در شرایط عدم قطعیت همچنان پاسخ‌گو باقی بماند.

• **تابع هدف استوار:**

$$\min Z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} ES_{i,n} \cdot x_{i,n} + \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{r \in R} (PC_{j,r} + TC_{j,i,r}^{\text{mat}}) \cdot y_{j,i,r} + \sum_{s \in S} \pi_s \cdot Z_s + \lambda \sum_{s \in S} \pi_s (\theta_s^+ + \theta_s^-)$$

در این تابع، هزینه‌های احداث مراکز درمانی و خرید و حمل تجهیزات، بخش قطعی هزینه را تشکیل می‌دهند و هزینه‌های خدمت‌رسانی و کمبود مربوط به هر سناریو با احتمال وقوع آن سناریو وزن‌دهی می‌شوند. بخش نخست تابع هدف، در نتیجه، عملکرد مورد انتظار سیستم را منعکس می‌کند. بخش پایانی تابع هدف، یعنی $\lambda \sum_{s \in S} \pi_s (\theta_s^+ + \theta_s^-)$ ، مؤلفه استواری جواب است. متغیرهای θ_s^+ و θ_s^- به کمک رابطه (۶)، انحراف مثبت و منفی هزینه سناریوی s از هزینه مورد انتظار را اندازه‌گیری می‌کنند؛ بنابراین مجموع آن‌ها معیاری خطی از پراکندگی هزینه میان سناریوها فراهم می‌سازد. ضریب λ وزن این پراکندگی را در تابع هدف تعیین می‌کند. در $\lambda = 0$ ، مدل صرفاً هزینه مورد انتظار را در نظر می‌گیرد، در حالی که با افزایش λ ، اهمیت کاهش اختلاف عملکرد اقتصادی میان سناریوها بیشتر می‌شود. از این‌رو، λ پارامتر تنظیم‌کننده مبادله میان عملکرد مورد انتظار و پایداری هزینه در شرایط عدم قطعیت است.

لازم به ذکر است که ساختار استوار مورد استفاده با رویکرد حداقل‌سازی بدترین حالت (min-max) متفاوت است. در رویکرد min-max، تصمیم عمدتاً بر اساس سناریویی با نامطلوب‌ترین پیامد تعیین می‌شود، در حالی که در مدل حاضر تمام سناریوها با احتمال وقوع خود در هزینه مورد انتظار مشارکت دارند و جمله استواری، پراکندگی هزینه حول این مقدار مورد انتظار را جریمه می‌کند. بنابراین، مدل به‌جای تمرکز صرف بر بدترین سناریو، میان‌کارایی مورد انتظار و ثبات عملکرد در مجموعه سناریوها تعادل برقرار می‌کند.

تابع هدف دوم: کمینه سازی مجموع فواصل وزنی بین مراکز درمانی و مناطق جمعیتی

$$\min Z_2 = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} w_k \cdot \text{Dist}_{i,k} \cdot \sum_{n \in N} x_{i,n} \quad (11)$$

این تابع هدف، عدم جذابیت مکانی مراکز درمانی را بر اساس فاصله آن‌ها از مراکز یا مناطق مهم جمعیتی اندازه‌گیری می‌کند. وزن w_k

ضایده‌آل اهداف تعیین گردد. سپس یکی از توابع هدف به‌عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده و تابع هدف دیگر به‌صورت محدودیت با پارامتر ε وارد مدل می‌شود. با تغییر تدریجی مقدار ε ، مجموعه‌ای از جواب‌های کارای پارتو استخراج می‌شود که بیانگر مبادلات میان اهداف مدل هستند.

در این پژوهش، تابع هدف اول یعنی هزینه کل استوار به‌عنوان تابع هدف اصلی انتخاب شده و تابع هدف دوم در قالب محدودیت ε وارد مدل شده است. بدین ترتیب، مدل در هر مرحله تلاش می‌کند کمترین هزینه ممکن را تحت سطح مشخصی از کیفیت مکانی و دسترسی خدماتی به دست آورد.

مراحل حل مدل به‌صورت زیر انجام شده است:

۱. حل جداگانه هر تابع هدف و تعیین مقادیر بهینه منفرد؛
۲. تعیین بازه تغییرات پارامتر ε بر اساس مقادیر بهینه تابع هدف دوم؛
۳. حل تکراری مدل برای مقادیر مختلف ε ؛
۴. استخراج جواب‌های کارای پارتو؛
۵. تحلیل نتایج و انتخاب راه‌حل مناسب بر اساس تعادل میان هزینه و کیفیت مکانی.

مدل ریاضی پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی شد و با استفاده از روش محدودیت اِپسِلون (ε -constraint) و حل‌کننده HiGHS حل گردیده است. انتخاب این نرم‌افزار به دلیل توانایی آن در حل مدل‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و مسائل استوار در ابعاد متوسط و بزرگ صورت گرفته است. نتایج حاصل از اجرای مدل، مبنایی برای تحلیل عملکرد سیستم، ارزیابی استواری تصمیمات و بررسی رفتار مدل در سناریوهای مختلف عدم قطعیت فراهم می‌سازد.

۴- مثال عددی و ارزیابی محاسباتی مدل

۴-۱- مثال عددی تشریحی و تحلیل رفتار مدل

برای تشریح نحوه عملکرد مدل پیشنهادی و بررسی ارتباط میان تصمیمات مکان‌یابی، ظرفیت‌گذاری، تأمین تجهیزات و تخصیص خدمات، یک مثال عددی فرضی در حوزه مکان‌یابی مراکز درمانی طراحی شده است. این مثال با هدف تبیین سازوکار مدل ارائه شده و به‌تنهایی مبنایی برای نتیجه‌گیری درباره مقیاس‌پذیری یا کارایی محاسباتی مدل محسوب نمی‌شود. به همین دلیل، در بخش‌های بعدی، عملکرد مدل روی مجموعه‌ای از مسائل کوچک، متوسط و بزرگ و در مقایسه با صورت‌بندی‌های مبنا ارزیابی شده است.

در این مثال، سه مرکز درمانی کاندید $I = \{i_1, i_2, i_3\}$ با دو سطح ظرفیت، دو تأمین‌کننده تجهیزات پزشکی $J = \{j_1, j_2\}$ برای دو نوع تجهیز حیاتی $R = \{r_1, r_2\}$ ، دو منطقه جمعیتی

این محدودیت بیان می‌کند که ظرفیت کل برنامه‌ریزی شده برای هر مرکز درمانی نباید از ظرفیت مجاز آن مرکز در سطح انتخاب‌شده بیشتر باشد. به این ترتیب، سازگاری میان انتخاب مرکز و حجم خدمات قابل ارائه حفظ می‌شود.

انتخاب حداکثر یک سطح ظرفیت برای هر مرکز:

$$\sum_{n \in N} x_{i,n} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (10)$$

این قید تضمین می‌کند که هر مرکز درمانی حداکثر با یک سطح ظرفیت انتخاب شود. بنابراین، برای هر مرکز تنها یک گزینه از میان سطوح ظرفیت مختلف قابل انتخاب است.

سقف کمبود مجاز:

$$\delta_{c,m,s} \leq \alpha D_{c,m,s} \quad \forall c \in C, m \in M, s \in S \quad (11)$$

این محدودیت مقدار کمبود مجاز را به‌صورت درصدی از تقاضا کنترل می‌کند. هدف از این قید آن است که کمبود تقاضا از حد مشخصی فراتر نرود و مدل در شرایط بدبینانه نیز از نظر عملی قابل اجرا باقی بماند. این محدودیت، همراه با متغیر کمبود $\delta_{c,m,s}$ و جریمه ω ، مؤلفه استواری مدل را تقویت می‌کند؛ به‌گونه‌ای که ضمن حفظ قابلیت اجرای مدل در سناریوهای مختلف، میزان کمبود خدمات از سطح مجاز α فراتر نمی‌رود.

۳-۳- رویکرد حل مدل پیشنهادی

با توجه به ماهیت چندهدفه و استوار مدل پیشنهادی، حل مستقیم مدل به‌صورت هم‌زمان برای تمامی اهداف و سناریوهای عدم قطعیت، پیچیدگی محاسباتی قابل توجهی ایجاد می‌کند. از این‌رو، در این پژوهش از ترکیب رویکرد بهینه‌سازی استوار سناریومحور مبتنی بر چارچوب مالوی و همکاران [۹] و روش ε -constraint برای حل مدل استفاده شده است. این ترکیب، امکان مدیریت هم‌زمان عدم قطعیت و ایجاد تعادل میان اهداف متعارض مدل را فراهم می‌سازد.

در مدل حاضر، عدم قطعیت پارامترهای تقاضا، هزینه ارائه خدمات و ظرفیت تأمین از طریق مجموعه‌ای از سناریوهای گسسته مدل‌سازی شده است. هر سناریو بیانگر یک وضعیت محتمل از شرایط آینده بوده و با احتمال وقوع مشخصی در مدل وارد می‌شود. استفاده از رویکرد استوار سبب می‌شود تصمیمات حاصل، علاوه بر بهینگی اقتصادی، در برابر تغییرات شرایط محیطی و نوسانات پارامترها نیز پایداری مناسبی داشته باشند.

از آنجا که مدل شامل دو تابع هدف «کمینه‌سازی هزینه کل استوار» و «کمینه‌سازی عدم جذابیت مکانی» است، برای حل مدل چندهدفه از روش ε -constraint استفاده شده است. در این روش، ابتدا هر تابع هدف به‌صورت جداگانه بهینه‌سازی می‌شود تا مقادیر ایده‌آل و

جدول (۳): ظرفیت برنامه‌ریزی شده خدمات

مرکز	خدمت m_1	خدمت m_2	مجموع ظرفیت
i_1	۴۲	۲۸	۷۰

مرکز i_1 برای ارائه ۴۲ واحد خدمت نوع m_1 و ۲۸ واحد خدمت نوع m_2 برنامه‌ریزی شده است. مجموع ظرفیت استفاده‌شده برابر ۷۰ واحد است که کمتر از ظرفیت سطح n_2 می‌باشد، بنابراین محدودیت ظرفیت رعایت شده است.

جدول (۴): تخصیص خدمات به مناطق در سناریوهای مختلف

منطقه	خدمت	s_1	s_2	s_3
c_1	m_1	۱۴	۱۸	۲۲
c_1	m_2	۱۰	۱۲	۱۶
c_2	m_1	۱۲	۱۶	۲۰
c_2	m_2	۸	۱۰	۱۲

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد تمام تقاضاها در هر سه سناریو به‌طور کامل پوشش داده شده است.

افزایش مقدار تخصیص خدمات از سناریوی s_1 به s_3 نشان‌دهنده واکنش متغیرهای عملیاتی مدل به افزایش تقاضاست. در عین حال، تصمیم مکان‌یابی و سطح ظرفیت مرکز پیش از مشخص شدن سناریو اتخاذ می‌شود؛ از این‌رو، مدل باید ظرفیتی را انتخاب کند که امکان پاسخ‌گویی به تقاضای سناریوهای مختلف را فراهم سازد.

جدول (۵): تأمین تجهیزات پزشکی

تأمین‌کننده	مرکز	تجهیز r_1	تجهیز r_2
j_1	i_1	۱۶۸	-
j_2	i_1	-	۹۸

تجهیز r_1 به‌طور کامل از تأمین‌کننده j_1 و تجهیز r_2 از تأمین‌کننده j_2 تأمین شده است. مدل ترکیب بهینه خرید را بر اساس هزینه خرید و حمل انتخاب کرده است.

تخصیص دو نوع تجهیز به دو تأمین‌کننده متفاوت، در این نمونه بیشتر ناشی از تفاوت هزینه‌ها و ظرفیت‌های تأمین است و نباید لزوماً به‌عنوان تنوع‌بخشی کامل منابع تأمین تفسیر شود. ارزیابی تاب‌آوری در برابر اختلال تأمین مستلزم بررسی عملکرد این تصمیم‌ها در سناریوهای کاهش ظرفیت یا عدم دسترسی به تأمین‌کنندگان است.

جدول (۶): مقادیر کلیدی توابع هدف

شاخص	مقدار
هزینه کل استوار (Z_1)	۱۸۴۷۸/۶۸
شاخص دسترسی (Z_2)	۲۶۱/۱
هزینه مورد انتظار	۱۷۵۵/۶۰
کمبود خدمات	۰

$C = \{c_1, c_2\}$ با دو نوع تقاضای خدمات $M = \{m_1, m_2\}$ و

سه سناریوی عدم قطعیت $S = \{s_1, s_2, s_3\}$ در نظر گرفته شده است. این سناریوها به ترتیب شرایط عادی، افزایش تقاضا و بحران همه‌گیری را شبیه‌سازی می‌کنند.

پارامترهای کلیدی مدل شامل تقاضای بیماران، هزینه‌های انتقال، ظرفیت تأمین‌کنندگان و میزان مصرف تجهیزات به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که روابط میان تصمیمات مکان‌یابی، تأمین و تخصیص خدمات را به خوبی نشان دهند. احتمال وقوع سناریوها به ترتیب $\pi = [0.3, 0.5, 0.2]$ در نظر گرفته شده است. همچنین، ضرایب

استواری $\lambda = 0.5$ برای اهمیت ثبات هزینه، $\omega = 200$ برای جریمه کمبود خدمات، و $\alpha = 0.2$ برای سقف کمبود مجاز تعیین شده‌اند. مقدار $\lambda = 0.5$ به‌عنوان مقدار پایه و میانی برای مثال عددی انتخاب شد تا جمله استواری در تابع هدف فعال باشد، بدون آنکه وزن آن نسبت به هزینه مورد انتظار غالب شود. این مقدار به‌عنوان یک مقدار بهینه یا عمومی برای همه مسائل تلقی نمی‌شود؛ از این‌رو، در بخش تحلیل حساسیت، λ در بازه صفر تا یک تغییر داده شده است تا وابستگی نتایج به میزان تأکید تصمیم‌گیرنده بر استواری بررسی شود.

مدل با استفاده از روش محدودیت افسیلون در محیط نرم‌افزار GAMS و با بهره‌گیری از حل‌کننده HiGHS حل شد. پس از تعیین حدود پایین و بالای توابع هدف، مجموعه‌ای از مقادیر افسیلون برای تابع دسترسی در نظر گرفته شد و راه‌حل‌های غیرمغلوب مدل استخراج گردید. نتایج زیر مربوط به راه‌حل سازشی منتخب از میان مجموعه راه‌حل‌های کارا است.

جدول (۲): تصمیم افتتاح مراکز درمانی

مرکز	سطح ظرفیت انتخاب‌شده	وضعیت
i_1	n_2	افتتاح شد
i_2	-	افتتاح نشد
i_3	-	افتتاح نشد

براساس داده‌های این نمونه، مدل مرکز i_1 را با سطح ظرفیت n_2 انتخاب کرده است. انتخاب این مرکز ناشی از ترکیب هزینه ثابت احداث، ظرفیت قابل دسترس، هزینه ارائه خدمات و فاصله آن تا مناطق تقاضا است. بنابراین، این نتیجه نباید به‌صورت یک قاعده کلی مبنی بر برتری همیشگی شبکه متمرکز تفسیر شود؛ بلکه نشان می‌دهد در ساختار هزینه و ظرفیت این نمونه، تمرکز فعالیت‌ها در مرکز i_1 نسبت به افتتاح هم‌زمان چند مرکز، راه‌حل اقتصادی‌تری بوده است.

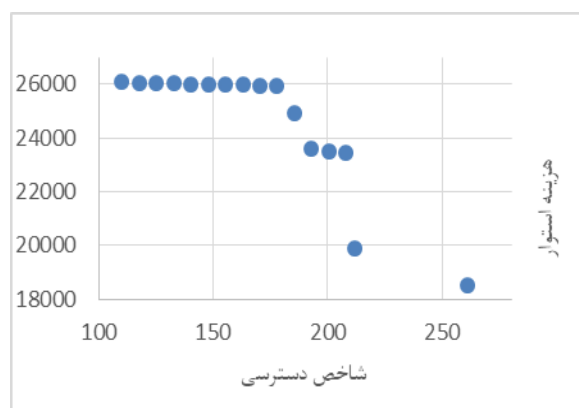
مقدار Z_1 شامل هزینه‌های احداث و ظرفیت‌گذاری مراکز، خرید و حمل تجهیزات، هزینه‌های خدمت‌رسانی سناریو محور و جریمه تغییرپذیری هزینه میان سناریوها است. مقدار Z_2 نیز شاخص فاصله وزنی خدمت‌رسانی از مراکز فعال به مناطق تقاضا را نشان می‌دهد؛ بنابراین، کاهش آن به معنای بهبود نسبی دسترسی مکانی است.

۴-۱-۱- تحلیل مبادله میان توابع هدف

برای تحلیل تعارض میان هزینه استوار و دسترسی مکانی، ابتدا هر یک از توابع هدف به صورت مستقل بهینه شد تا نقاط انتهایی جبهه پارتو تعیین شوند. در راه حل هزینه محور، مقدار هزینه استوار برابر با

جدول (۷): راه حل‌های غیرمغلوب حاصل از روش محدودیت افسیلون

راه حل	Z_1	Z_2	تعداد مراکز فعال	ساختار مراکز
P_1	۲۶،۰۸۰/۱	۱۱۰/۴۰	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_2	۲۶،۰۴۳/۴	۱۱۷/۹۴	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_3	۲۶،۰۲۳/۵	۱۲۵/۴۷	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_4	۲۶،۰۰۵/۸	۱۳۳/۰۱	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_5	۲۵،۹۸۹/۰	۱۴۰/۵۴	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_6	۲۵،۹۷۲/۲	۱۴۸/۰۸	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_7	۲۵،۹۵۶/۷	۱۵۵/۶۱	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_8	۲۵،۹۴۶/۹	۱۶۳/۱۵	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_9	۲۵،۹۴۰/۸	۱۷۰/۶۸	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_{10}	۲۵،۹۳۶/۱	۱۷۸/۲۲	۲	$i_3(n_1)i_2(n_1)$
P_{11}	۲۴،۹۱۰/۴	۱۸۵/۷۵	۲	$i_3(n_1)i_1(n_1)$
P_{12}	۲۳،۵۵۱/۵	۱۹۳/۲۹	۲	$i_2(n_1)i_1(n_1)$
P_{13}	۲۳،۴۷۴/۸	۲۰۰/۸۲	۲	$i_2(n_1)i_1(n_1)$
P_{14}	۲۳،۴۰۹/۴	۲۰۸/۳۶	۲	$i_2(n_1)i_1(n_1)$
P_{15}	۱۹،۸۵۳/۸	۲۱۲/۰۰	۱	$i_2(n_2)$
P_{16}	۱۸،۴۷۸/۶	۲۶۱/۱۰	۱	$i_1(n_2)$



شکل (۲): جبهه پارتوی هزینه استوار و شاخص دسترسی

شکل (۲) مبادله میان هزینه استوار و دسترسی را نشان می‌دهد. حرکت از راه حل هزینه محور P_{16} به سمت راه حل دسترسی محور P_1 ، مقدار شاخص دسترسی را از ۲۶۱/۱۰ به ۱۱۰/۴۰ کاهش می‌دهد که معادل بهبود حدود ۵۷،۷۲ درصدی دسترسی است. با این حال، این بهبود با افزایش هزینه استوار از ۱۸،۴۷۸/۶ به ۲۶،۰۸۰/۱، معادل ۴۱/۱۴ درصد، همراه است. بنابراین، بهبود دسترسی مکانی مستلزم پذیرش هزینه بیشتر و در برخی نقاط، افتتاح مراکز اضافی است.

دسترسی ایجاد کند، دو هدفی که در ادبیات به عنوان متضاد شناخته می‌شوند.

۵) کارایی محاسباتی

مدل در کسری از ثانیه و بدون نیاز به الگوریتم‌های فرابتنکاری، به جواب بهینه دست یافت. این موضوع، کاربردپذیری مدل را در تصمیم‌گیری‌های بلادرنگ (مانند برنامه‌ریزی بحران) تقویت می‌کند. در مجموع، نتایج مثال تشریحی نشان می‌دهد روابط ریاضی مدل قادرند تصمیم‌هایی سازگار میان مکان‌یابی، ظرفیت‌گذاری، تأمین تجهیزات و تخصیص خدمات ایجاد کنند. با این حال، ارزیابی قابلیت حل، مقیاس‌پذیری و ارزش افزوده مدل مستلزم آزمایش‌های گسترده‌تر و مقایسه با صورت‌بندی‌های مبناست که در ادامه ارائه می‌شود.

۴-۲- طراحی مسائل آزمایشی

برای ارزیابی مقیاس‌پذیری مدل، ۱۵ مسئله آزمایشی در سه گروه کوچک، متوسط و بزرگ طراحی شد. در هر گروه، ۵ نمونه مستقل با استفاده از بذره‌های تصادفی ثابت تولید شد. استفاده از چند نمونه در هر اندازه، امکان کنترل اثر ویژگی‌های خاص یک مجموعه داده و ارائه ارزیابی باثبات‌تری از زمان حل و کیفیت جواب را فراهم می‌کند. ابعاد مسائل در جدول (۸) ارائه شده است.

جدول (۸): ابعاد مسائل آزمایشی

تعداد نمونه	N	S	R	M	C	J	I	حجم
کوچک	۲	۳	۲	۲	۶	۲	۴	۵
متوسط	۲	۴	۲	۲	۱۰	۳	۶	۵
بزرگ	۳	۴	۳	۳	۱۶	۴	۸	۵

مختصات مراکز کاندید، مناطق تقاضا و تأمین‌کنندگان از توزیع یکنواخت در یک فضای دوبعدی با دامنه $[0, 100]$ تولید شد و فاصله میان نقاط براساس فاصله اقلیدسی محاسبه گردید. تقاضای پایه هر ترکیب منطقه-خدمت از توزیع یکنواخت گسسته در بازه $[8, 20]$ ایجاد شد. سپس تقاضای پایه با ضرایب شدت سناریویی بین 0.9 و 1.5 تعدیل گردید. در مسائل سه‌سناریویی، ضرایب 0.9 ، 1.2 و 1.5 و در مسائل چهارسناریویی، ضرایب 0.9 ، 1.1 ، 1.3 و 1.5 به کار رفت. هزینه پایه خدمت از بازه $[15, 30]$ ، هزینه خرید تجهیزات از بازه $[15, 35]$ و ضریب مصرف تجهیزات از مجموعه اعداد صحیح 1 تا 3 تولید شد. هزینه خدمت‌رسانی با توجه به نوع خدمت، فاصله مرکز از منطقه تقاضا و شدت سناریو و هزینه حمل تجهیزات نیز متناسب با

۴-۱-۲- تفسیر تصمیم‌های حاصل از مثال تشریحی

۱) تمرکز ظرفیت در یک مرکز؛ تصمیمی اقتصادی اما وابسته به داده‌های نمونه

انتخاب تنها مرکز i_1 نشان می‌دهد که در شرایط این مثال، صرفه‌های ناشی از تمرکز ظرفیت و اجتناب از هزینه ثابت افتتاح مراکز اضافی بر مزیت کاهش فاصله از طریق گسترش شبکه غلبه کرده است. با این حال، تمرکز ظرفیت در یک مرکز می‌تواند در صورت وقوع خرابی مرکز یا اختلال محلی، آسیب‌پذیری شبکه را افزایش دهد. بنابراین، نتیجه حاضر صرفاً کارایی اقتصادی ساختار متمرکز را در داده‌های این نمونه نشان می‌دهد و برای استنباط درباره تاب‌آوری شبکه باید سناریوهای اختلال مرکز نیز بررسی شوند.

۲) پوشش کامل تقاضا در سناریوهای بررسی‌شده

با وجود مجازبودن بخشی از کمبود تقاضا براساس پارامتر α ، مدل در این مثال هیچ کمبودی ایجاد نکرده است. این نتیجه ناشی از ترکیب ظرفیت کافی مرکز منتخب، ساختار هزینه‌های خدمت‌رسانی و جریمه کمبود است. از این رو، صفرشدن کمبود را نمی‌توان صرفاً به یک پارامتر نسبت داد یا آن را به همه نمونه‌ها تعمیم داد. تحلیل حساسیت پارامترهای α و ω در بخش پنجم، شرایطی را مشخص می‌کند که در آن پذیرش کمبود برای مدل اقتصادی می‌شود.

۳) یکپارچگی تصمیمات در سطوح مختلف

نتایج نشان می‌دهد که مدل قادر است تصمیمات استراتژیک (مکان‌یابی)، تاکتیکی (تأمین تجهیزات) و عملیاتی (تخصیص خدمات) را به‌صورت یکپارچه اتخاذ کند:

- تمام تقاضای مناطق C_1 و C_2 در سه سناریوی مختلف به‌طور کامل توسط مرکز i_1 پاسخ داده شده است.
- تجهیزات نوع r_1 (تخصیص) به‌طور کامل از تأمین‌کننده j_1 و تجهیزات نوع r_2 (درمانی) از تأمین‌کننده j_2 تأمین شده‌اند. این انتخاب نشان‌دهنده توجه مدل به بهینه‌سازی هزینه‌های ترکیبی خرید و حمل است.

۴) تعادل بین هزینه و دسترسی

مدل موفق به برقراری تعادلی بین دو هدف متضاد شده است:

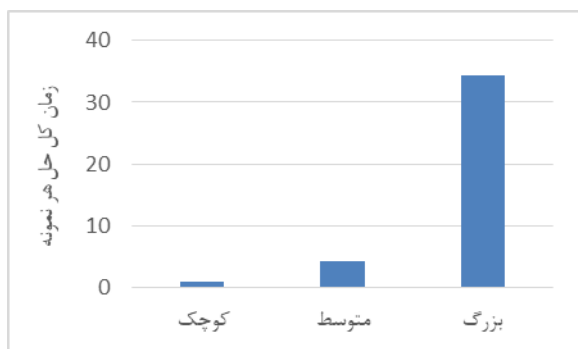
- هزینه کل استوار $Z_1 = 18478.68$ (شامل هزینه‌های احداث، تأمین و عملیاتی است).

- شاخص دسترسی $Z_2 = 261.1$ (بیانگر میانگین وزنی فاصله بین مرکز منتخب و مناطق تقاضا است. این یافته تأیید می‌کند که مدل قادر است مبادله معناداری بین کارایی اقتصادی و کیفیت

نتایج جدول (۹) نشان می‌دهد با افزایش ابعاد مسئله، زمان محاسباتی مدل به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. میانگین زمان کل تولید جبهه پنج نقطه‌ای از ۰/۸۳۷۲ ثانیه در مسائل کوچک به ۴/۲۹۹۸ ثانیه در مسائل متوسط و ۳۴/۳۱۸۸ ثانیه در مسائل بزرگ افزایش یافت. به بیان دیگر، زمان حل مسائل متوسط حدود ۵/۱۴ برابر مسائل کوچک و زمان حل مسائل بزرگ حدود ۷/۹۸ برابر مسائل متوسط بود. میانگین زمان مسائل بزرگ نیز تقریباً ۴۰/۹۹ برابر مسائل کوچک به دست آمد.

افزایش زمان حل ناشی از رشد هم‌زمان تعداد متغیرهای تخصیص سناریومحور، متغیرهای تأمین تجهیزات، گزینه‌های مکان‌یابی و محدودیت‌های پیوندهنده ظرفیت، تقاضا و تأمین است. تعداد متغیرها از ۲۲۴ در مسائل کوچک به ۱۸۸۷ در مسائل بزرگ و تعداد محدودیت‌ها از ۱۲۷ به ۵۴۵ افزایش یافته است.

با وجود افزایش زمان محاسباتی، تمام ۱۰۵ مسئله برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط با اثبات بهینگی حل شدند و شکاف متوسط در هر سه گروه عملاً صفر بود. بنابراین، روش دقیق محدودیت اسیلون و حل‌کننده HiGHS در دامنه ابعاد بررسی شده از قابلیت حل قابل قبولی برخوردار است. باین‌حال، رشد بیش از ۴۰ برابری زمان از گروه کوچک به بزرگ نشان می‌دهد افزایش بیشتر تعداد مراکز، مناطق، خدمات و سناریوها می‌تواند بار محاسباتی مدل را به سرعت افزایش دهد. از این رو، نتایج حاضر مقیاس‌پذیری مدل را در محدوده مسائل آزمایش شده تأیید می‌کند و نباید به عنوان اثبات کارایی آن برای شبکه‌های بسیار بزرگ تفسیر شود.



شکل (۳): میانگین زمان حل مدل در مسائل کوچک، متوسط و بزرگ
در شکل (۳)، میانگین زمان کل حل هفت زیرمسئله مربوط به هر نمونه، همراه با انحراف معیار، نمایش داده شده است. افزایش ارتفاع ستون‌ها نشان‌دهنده رشد بار محاسباتی با افزایش اندازه مسئله است.

۴-۴- مقایسه مدل پیشنهادی با مدل‌های مبنا

برای بررسی ارزش افزوده عدم قطعیت سناریومحور و جمله استواری، مدل پیشنهادی با دو صورت‌بندی مبنا مقایسه شد. مدل نخست، مدل قطعی ارزش مورد انتظار است که در آن تقاضا و هزینه

فاصله تأمین‌کننده از مرکز تعیین گردید. هزینه ثابت تأسیس مراکز با توجه به سطح ظرفیت و یک مؤلفه تصادفی تولید شد.

ظرفیت مراکز و تأمین‌کنندگان براساس تقاضای شدیدترین سناریو تنظیم شد. به منظور جلوگیری از ایجاد مسائل غیرشدنی، مجموع ظرفیت بالقوه مراکز و تأمین‌کنندگان به گونه‌ای تعیین شد که امکان پوشش بخش الزامی تقاضا با توجه به مقدار $\alpha = 0.2$ وجود داشته باشد. برای تضمین تکرارپذیری، بذرها ۱۰۱ تا ۱۰۵، ۲۰۱ تا ۲۰۵ و ۳۰۱ تا ۳۰۵ به ترتیب برای نمونه‌های کوچک، متوسط و بزرگ استفاده شدند.

برای هر نمونه، ابتدا دو تابع هدف به صورت مستقل بهینه شدند تا حدود جبهه پارتو مشخص شود. سپس پنج مقدار اسیلون میان دو حد تابع دسترسی ایجاد و مدل محدودیت اسیلون برای هر مقدار حل شد. بنابراین، برای هر نمونه هفت مسئله برنامه‌ریزی عددصحيح مختلط و در مجموع ۱۰۵ مسئله حل گردید.

۴-۳- ارزیابی مقیاس‌پذیری و عملکرد محاسباتی

تمام مسائل با استفاده از نرم‌افزار GAMS نسخه ۵۴،۲،۱ و حل‌کننده HiGHS روی یک رایانه با پردازنده ۱۲ هسته‌ای Intel Core i5-13500H، حافظه رم ۸ گیگابایت و سیستم‌عامل ویندوز حل شدند. محدودیت زمانی هر حل ۳۶۰۰ ثانیه، شکاف نسبی هدف صفر و تعداد رشته‌های پردازشی برابر با یک در نظر گرفته شد. تنظیمات حل برای تمام نمونه‌ها یکسان بوده است.

برای هر نمونه، تعداد متغیرها، تعداد متغیرهای دودویی، تعداد محدودیت‌ها، زمان کل هفت حل، بیشترین زمان حل یک زیرمسئله، شکاف نهایی و وضعیت حل ثبت شد. نتایج تجمیعی در جدول (۹) ارائه شده است.

جدول (۹): نتایج ارزیابی محاسباتی در ابعاد مختلف

اندازه	تعداد نمونه	متغیرها	دودویی	محدودیت‌ها	میانگین زمان	انحراف معیار	بیشترین زمان	شکاف متوسط	حل شده تا بهینگی
کوچک	۵	۲۲۴	۸	۱۲۷	۰/۸۳۷۲	۰/۲	۱۱/۸۸	۰	۳۵ از ۳۵
متوسط	۵	۶۳۵	۱۲	۲۵۱	۴/۲۹۹۸	۰/۶۲	۵/۲۹	۰	۳۵ از ۳۵
بزرگ	۵	۱۸۸۷	۲۴	۵۴۵	۳۴/۳۱۸۸	۲/۸۳	۳۶/۵۲	۰	۳۵ از ۳۵

جدول (۱۱): مقایسه عملکرد مدل پیشنهادی و مدل‌های مبنا

شاخص	مدل قطعی ارزش مورد انتظار	مدل سناریومحور بدون استواری	مدل پیشنهادی
متوسط هزینه خارج از نمونه	۱۷۷,۸۱۷/۳۰	۷۸,۰۲۷/۷۰	۷۸,۰۳۰/۲۰
بیشترین هزینه خارج از نمونه	۶۰۴,۸۴۸/۱۰	۹۷,۳۶۱/۲۲	۹۷,۳۶۱/۲۲
میانگین انحراف معیار هزینه	۹۶,۳۵۰/۵۳	۵۱۴/۶۴	۵۱۱/۷۲
متوسط کمبود خدمات در هر سناریو	۱۱/۲۸۰۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰
درصد پوشش تقاضا	۹۶/۹۲۹۸	۱۰۰/۰۰۰۰	۱۰۰/۰۰۰۰
شاخص دسترسی تعدیل شده	۱۶,۸۳۷/۷۳	۱۳,۵۲۱/۴۰	۱۳,۴۳۳/۳۷
میانگین زمان حل مدل اصلی (ثانیه)	۰/۲۱۵۶	۰/۴۱۵۶	۰/۵۰۹۴
میانگین تعداد مراکز فعال	۲/۶۰	۳/۰۰	۳/۰۰

نتایج جدول (۱۱) تفاوت قابل توجهی میان مدل قطعی و دو مدل سناریو محور نشان می‌دهد. مدل قطعی به‌طور متوسط ۲/۶ مرکز با ظرفیت ۳۵۰/۶۸ واحد ایجاد کرده است، در حالی که دو مدل سناریومحور سه مرکز با ظرفیت ۴۲۷/۸ واحد پیشنهاد داده‌اند. ظرفیت کمتر مدل قطعی موجب شده است این مدل در سناریوهای خارج از نمونه با متوسط کمبود ۱۱/۲۸ واحد و پوشش ۹۶/۹۳ درصدی تقاضا مواجه شود؛ در مقابل، هر دو مدل سناریومحور پوشش کامل تقاضا را حفظ کرده‌اند.

متوسط هزینه خارج از نمونه در مدل قطعی ۱۷۷,۸۱۷/۳۰ بوده، در حالی که این مقدار در مدل سناریومحور بدون استواری و مدل پیشنهادی به ترتیب ۷۸,۰۲۷/۷۰ و ۷۸,۰۳۰/۲۰ به دست آمده است.

خدمت‌رسانی با میانگین موزون مقادیر سناریویی جایگزین می‌شوند. مدل دوم، صورت‌بندی سناریومحور بدون جمله استواری است که با قرار دادن $\lambda = 0$ حل می‌شود. مدل سوم، صورت‌بندی کامل پیشنهادی است که سناریوهای عدم قطعیت و جریمه انحراف هزینه با مقدار $\lambda = 0/5$ را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد.

برای جداسازی اثر استواری از اثر روش چندهدفه، هر سه مدل در این بخش براساس تابع هزینه حل شدند و شاخص دسترسی به عنوان یکی از معیارهای ارزیابی ثبت گردید. محدودیت‌های ظرفیت، تأمین تجهیزات، کنترل کمبود و سایر پارامترهای سیاستی در هر سه مدل یکسان در نظر گرفته شدند.

جدول (۱۰): مشخصات مدل‌های مورد مقایسه

مدل	عدم قطعیت سناریومحور	جمله استواری	کنترل کمبود	تصمیمات یکپارچه
مدل قطعی ارزش موردانتظار	خیر	خیر	بله	بله
مدل سناریومحور بدون استواری	بله	خیر	بله	بله
مدل پیشنهادی	بله	بله	بله	بله

مقایسه روی پنج مسئله متوسط با بذره‌های تصادفی ۲۰۱ تا ۲۰۵ انجام شد. هر سه مدل برای هر مسئله با مجموعه داده‌های یکسان حل شدند. سپس تصمیمات مکان‌یابی، سطح ظرفیت و تأمین تجهیزات حاصل از هر مدل تثبیت و در ۵۰ سناریوی خارج از نمونه ارزیابی شدند. این سناریوها در مرحله بهینه‌سازی مورد استفاده قرار نگرفته بودند.

در سناریوهای خارج از نمونه، ضریب شدت تقاضا از توزیع یکنواخت در بازه $[0/85, 1/6]$ و ضریب تغییر هزینه خدمت‌رسانی از توزیع یکنواخت در بازه $[0/95, 1/10]$ تولید شد. برای تضمین مقایسه منصفانه، هر سه مدل روی دقیقاً همان سناریوهای خارج از نمونه ارزیابی شدند. در مرحله ارزیابی، تصمیمات مکان‌یابی x ، ظرفیت برنامه‌ریزی شده Q و تأمین تجهیزات y ثابت نگه داشته شدند و تنها متغیرهای تخصیص خدمت z و کمبود تقاضا δ برای هر سناریوی جدید مجدداً بهینه شدند.

بنابراین، مزیت اصلی آن در ایجاد تعادلی قابل کنترل میان هزینه، دسترسی، پوشش تقاضا و پایداری عملکرد است.

۵- تحلیل حساسیت

به منظور بررسی پایداری و رفتار مدل پیشنهادی در شرایط مختلف، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی مدل انجام شد. در این راستا، اثر تغییرات پارامترهای کمبود مجاز (α) ، ضریب جریمه کمبود (ω) و ضریب استواری (λ) بر عملکرد شبکه درمانی بررسی گردید.

۵-۱- تحلیل حساسیت پارامتر کمبود مجاز (α)

حداکثر درصد تقاضای پاسخ داده نشده را مشخص می‌کند. برای بررسی اثر این پارامتر، مقدار آن از ۰/۵ تا ۰/۵ تغییر داده شد و تأثیر آن بر هزینه کل، دسترسی، کمبود خدمات و ساختار شبکه بررسی گردید.

جدول (۱۲): نتایج تحلیل حساسیت نسبت به α

پارامتر α	Z_1	Z_2	هزینه مورد انتظار	کمبود کل خدمات	تعداد مراکز فعال
۰/۵	۳۱،۵۶۵/۳۶	۲۱۱/۶۱	۱،۷۲۲/۲۰	۴/۲	۲
۰/۱۰	۳۱،۲۶۳/۴۴	۲۰۷/۶۲	۱،۷۷۶/۸۰	۸/۴	۲
۰/۲۰	۳۰،۶۹۲/۲۴	۱۹۶/۹۴	۹۲۶،۱/۸۰	۱۸/۰	۲
۰/۳۰	۲۷،۳۰۶/۰۰	۱۷۰/۷۱	۲،۳۰۸/۰۰	۳۴/۴	۲
۰/۴۰	۲۷،۰۴۹/۹۳	۱۳۵/۷۲	۲،۸۲۳/۷۶	۵۶/۸	۲
۰/۵۰	۱۸،۲۷۱/۶۴	۲۰۱/۱۵	۳،۸۷۸/۸۰	۸۲/۰	۱

نتایج جدول (۱۲) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار α ، هزینه کل استوار کاهش می‌یابد، زیرا مدل مجاز است بخشی از تقاضا را بدون پاسخ باقی بگذارد و در نتیجه نیاز کمتری به ظرفیت و مراکز درمانی اضافی خواهد داشت. به همین دلیل، مقدار کمبود خدمات به صورت تدریجی افزایش یافته و در سطح $\alpha = ۰/۵$ ، مدل تنها یک مرکز درمانی را فعال نگه داشته است.

همچنین مشاهده می‌شود که شاخص دسترسی ابتدا روند کاهشی دارد، اما در سطوح بالای α مجدداً افزایش می‌یابد. این رفتار

همچنین بیشترین هزینه سناریویی از ۶۰۴،۸۴۸/۱۰ در مدل قطعی به ۹۷،۳۶۱/۲۲ در دو مدل سناریومحور کاهش یافته است. بنابراین، در نظر گرفتن صریح عدم قطعیت، متوسط و بیشترین هزینه خارج از نمونه را به ترتیب حدود ۵۶/۱۲ و ۸۳/۹۰ درصد کاهش داده و از بروز هزینه‌های شدید ناشی از کمبود خدمات جلوگیری کرده است.

میانگین انحراف معیار هزینه در مدل قطعی ۹۶،۳۵۰/۵۳ بوده، اما در مدل سناریومحور بدون استواری و مدل پیشنهادی به ترتیب به ۵۱۴/۶۴ و ۵۱۱/۷۲ کاهش یافته است. مقایسه مستقیم دو مدل سناریومحور نشان می‌دهد جمله استواری، انحراف معیار هزینه و شاخص دسترسی را به ترتیب حدود ۰/۵۷ و ۰/۶۵ درصد بهبود داده است، در حالی که متوسط هزینه خارج از نمونه تنها ۰/۰۳ درصد افزایش یافته است. از این رو، بخش عمده بهبود عملکرد ناشی از ورود سناریوهای عدم قطعیت است و جمله استواری نقش تکمیلی در کاهش نوسان و متعادل سازی تصمیمات دارد. کاهش انحراف معیار هزینه از ۵۱۴/۶۴ در مدل سناریومحور بدون جمله استواری به ۵۱۱/۷۲ در مدل کامل، معادل حدود ۰/۵۷ درصد، شاهد مستقیمی از اثر جمله استواری بر کاهش تغییرپذیری عملکرد اقتصادی در ارزیابی خارج از نمونه است. هرچند اندازه این بهبود محدود است، وقوع آن همراه با افزایش تنها ۰/۰۳ درصدی متوسط هزینه خارج از نمونه نشان می‌دهد که در مسائل بررسی شده، استواری اضافی با هزینه مورد انتظار بسیار اندکی به دست آمده است.

میانگین زمان حل مدل پیشنهادی ۰/۵۰۹۴ ثانیه بوده که از مدل سناریومحور بدون استواری و مدل قطعی بیشتر است؛ با این حال، زمان مطلق حل همچنان کمتر از یک ثانیه باقی مانده و تمام مدل‌های اصلی و ۷۵۰ ارزیابی خارج از نمونه با اثبات بهینگی حل شده‌اند. از دید مدیریتی، نتایج نشان می‌دهد ظرفیت‌گذاری بر مبنای تقاضای متوسط ممکن است در ابتدا کم‌هزینه‌تر به نظر برسد، اما در شرایط تقاضای بالا به کمبود خدمات و هزینه‌های سنگین منجر می‌شود. بنابراین، پیش‌بینی ظرفیت بیشتر و افتتاح مراکز اضافی را می‌توان نوعی سرمایه‌گذاری برای حفظ سطح خدمت و کاهش ریسک عملیاتی دانست.

در مجموع، نتایج بخش چهارم نشان داد بهبود دسترسی با افزایش هزینه و گاه افتتاح مراکز بیشتر همراه است، اما مدل در تمام ابعاد آزمایش شده با جواب بهینه قابل حل باقی می‌ماند. همچنین مقایسه خارج از نمونه نشان داد مدل‌های سناریومحور نسبت به مدل قطعی، پوشش تقاضای بالاتر، هزینه کمتر و پایداری بیشتری دارند. مدل پیشنهادی نیز با افزودن جمله استواری، بدون افزایش محسوس هزینه، نوسان عملکرد و شاخص دسترسی را اندکی بهبود می‌دهد؛

ناشی از تمرکز خدمات در تعداد کمتری از مراکز درمانی است که فاصله متوسط بیماران تا مراکز خدمت‌رسانی را افزایش می‌دهد. بنابراین، نتایج بیانگر وجود یک مبادله مستقیم میان هزینه، سطح خدمت و دسترسی در طراحی شبکه درمانی است.

۵-۲- تحلیل حساسیت ضریب جریمه کمبود (ω)

به‌منظور بررسی تأثیر اهمیت سیاستی کمبود خدمات بر تصمیمات مدل، تحلیل حساسیت نسبت به ضریب جریمه کمبود (ω) انجام

جدول (۱۳): نتایج تحلیل حساسیت نسبت به ω

ω	Z_1	Z_2	هزینه مورد انتظار	کمبود کل خدمات	تعداد مراکز فعال
۱۰	۲۹,۹۴۷/۴۷	۱۵۱/۴۸	۱,۳۷۳/۵۲	۴۱/۶	۲
۵۰	۳۰,۳۶۵/۸۴	۱۹۶/۹۴	۱,۷۲۸/۸۰	۱۸/۰	۲
۱۰۰	۳۰,۶۹۲/۲۴	۱۹۶/۹۴	۱,۹۲۶/۸۰	۱۸/۰	۲
۵۰۰	۳۱,۸۶۹/۲۹	۲۱۵/۵۶	۱,۶۷۲/۰۰	۰/۰۴۷	۲
۱۰۰۰	۳۱,۸۶۹/۴۸	۲۱۵/۶۰	۱,۶۶۷/۶۰	۰/۰	۲
۱۰۰۰۰	۳۱,۸۶۹/۴۸	۲۱۵/۶۰	۱,۶۶۷/۶۰	۰/۰	۲

افزایش ω ، مقدار تابع هدف اول (Z_1) افزایش می‌یابد. دلیل این موضوع آن است که مدل برای جلوگیری از کمبود، ناچار به تخصیص ظرفیت و منابع بیشتر می‌شود. بنابراین، بین هزینه اقتصادی و سطح خدمت یک رابطه مبادله‌ای^۱ وجود دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ω ، شاخص دسترسی (Z_2) افزایش یافته است. این نتیجه بیانگر آن است که مدل برای حذف کمبود خدمات، بیماران را به مراکز دورتر نیز تخصیص می‌دهد و در نتیجه فاصله متوسط خدمت‌رسانی افزایش می‌یابد.

در نهایت، تعداد مراکز فعال در تمام سطوح ω ثابت باقی مانده است. این موضوع نشان می‌دهد که در مثال حاضر، ساختار مکانی شبکه نسبت به تغییرات جریمه کمبود حساسیت کمتری داشته و تغییرات عمدتاً در سطح تخصیص خدمات و مدیریت ظرفیت رخ داده است.

نتایج جدول (۱۳) نشان می‌دهد که ضریب جریمه کمبود تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار مدل و سطح خدمت سیستم دارد. با مقادیر پایین ω ، مدل ترجیح می‌دهد بخشی از تقاضا را پاسخ ندهد تا هزینه‌های کلی سیستم کاهش یابد. به‌عنوان مثال، در $\omega = 10$ ، مقدار کمبود خدمات برابر ۴۱/۶ واحد است و هزینه کل استوار در کمترین مقدار خود قرار دارد. این رفتار بیانگر آن است که زمانی که جریمه کمبود ناچیز باشد، مدل کمبود خدمات را به‌عنوان راهکاری اقتصادی برای کاهش هزینه‌ها در نظر می‌گیرد.

با افزایش مقدار ω ، کمبود خدمات به‌تدریج کاهش یافته و مدل به سمت تأمین کامل تقاضا حرکت می‌کند. در بازه $\omega \geq 500$ ، تقریباً تمام تقاضا پوشش داده شده و کمبود خدمات به صفر نزدیک می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که در سامانه‌های سلامت، اعمال جریمه بالا برای کمبود خدمات می‌تواند مدل را به سمت سیاست‌های خدمت‌محور و تاب‌آور سوق دهد. از سوی دیگر، با

^۱ Trade-off

۵-۳- تحلیل حساسیت ضریب استواری (λ)

به منظور بررسی تأثیر میزان اهمیت استواری در تابع هدف، تحلیل حساسیت نسبت به ضریب استواری (λ) انجام شد. این پارامتر میزان حساسیت مدل به نوسانات هزینه در سناریوهای مختلف را کنترل می‌کند؛ به گونه‌ای که مقادیر بزرگ‌تر λ مدل را به سمت جواب‌های پایدارتر و کم‌ریسک‌تر سوق می‌دهند. برای این منظور، مقدار λ در بازه ۰ تا ۱ تغییر داده شد و اثر آن بر هزینه کل استوار، شاخص دسترسی، هزینه مورد انتظار، کمبود خدمات و تعداد مراکز فعال بررسی گردید.

جدول (۱۴): نتایج تحلیل حساسیت نسبت به λ

λ	Z_1	Z_2	هزینه مورد انتظار	کمبود کل خدمات	تعداد مراکز فعال
۰/۰	۱۴,۲۰۴/۰۰	۲۴۶/۹۶	۱,۹۵۱/۲۰	۱۴/۴	۱
۰/۱	۱۴,۲۶۰/۳۵	۲۴۶/۹۶	۱,۹۵۱/۲۰	۱۴/۴	۱
۰/۳	۱۴,۳۷۳/۰۶	۲۴۶/۹۶	۱,۹۵۱/۲۰	۱۴/۴	۱
۰/۵	۱۴,۴۸۵/۷۶	۲۴۶/۹۶	۱,۹۵۱/۲۰	۱۴/۴	۱
۰/۷	۱۴,۵۹۸/۴۶	۲۴۶/۹۶	۱,۹۵۱/۲۰	۱۴/۴	۱
۱/۰	۱۴,۷۶۷/۵۲	۲۴۶/۹۶	۱,۹۵۱/۲۰	۱۴/۴	۱

نتایج جدول (۱۴) نشان می‌دهد که با افزایش ضریب استواری (λ)، مقدار تابع هدف استوار Z_1 به تدریج افزایش می‌یابد، در حالی که هزینه مورد انتظار، شاخص دسترسی، میزان کمبود خدمات و تعداد مراکز فعال در مثال تشریحی تقریباً ثابت باقی می‌مانند. افزایش Z_1 در این وضعیت نباید به تنهایی به عنوان شواهدی بر افزایش استواری تفسیر شود؛ زیرا با افزایش λ ، وزن جمله مربوط به پراکندگی هزینه در خود تابع هدف نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه مقدار تابع هدف می‌تواند حتی بدون تغییر اساسی در تصمیمات افزایش یابد. ثبات سایر شاخص‌ها نشان می‌دهد که در این مثال کوچک، ساختار راه حل نسبت به تغییر λ حساسیت محدودی دارد و افزایش وزن استواری در بازه بررسی شده موجب تغییر در مکان مراکز، سطح پوشش یا هزینه مورد انتظار نشده است. بنابراین، اثر واقعی جمله استواری باید با معیارهای مستقیم‌تر تغییرپذیری عملکرد و نیز ارزیابی خارج از نمونه بررسی شود.

از این رو، λ را می‌توان پارامتر سیاستی برای تعیین میزان اهمیت پایداری هزینه نسبت به عملکرد مورد انتظار دانست، اما اثر آن به ساختار و ابعاد مسئله وابسته است. در مثال تشریحی، تغییر این پارامتر ساختار تصمیمات را تغییر نداد؛ در مقابل، نتایج مقایسه خارج از نمونه در بخش ۴-۴ امکان ارزیابی مستقیم‌تر ارزش افزوده جمله استواری را فراهم می‌کند.

۶- بینش‌های مدیریتی

نتایج حاصل از مثال عددی و تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی مدل، چندین بینش مدیریتی مهم را برای برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران نظام سلامت در شرایط بحران فراهم می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که طراحی شبکه‌های درمانی بحران صرفاً یک مسئله کاهش هزینه نبوده، بلکه نیازمند ایجاد تعادل میان کارایی اقتصادی، سطح خدمت و تاب‌آوری عملیاتی است.

۶-۱- سیاست «کمبود صفر» مستلزم هزینه‌های حفاظتی بالا است.

نتایج تحلیل حساسیت پارامتر جریمه کمبود خدمات (ω) نشان داد که تنها در مقادیر بالای این پارامتر ($\omega \geq 500$)، مدل به سمت حذف کامل کمبود خدمات حرکت می‌کند. در مقادیر پایین‌تر، سیستم بخشی از تقاضا را بدون پاسخ باقی می‌گذارد تا هزینه‌های عملیاتی و توسعه ظرفیت را کاهش دهد. این یافته بیانگر آن است که دستیابی به سطح خدمت بسیار بالا در بحران‌های سلامت، مستلزم پذیرش هزینه‌های حفاظتی قابل توجه از سوی سیاست‌گذاران است. به بیان دیگر، اگر ارزش اجتماعی دسترسی به خدمات درمانی به صورت صریح در مدل لحاظ نشود، راه‌حل‌های حاصل صرفاً اقتصادی بوده و ممکن است در شرایط بحرانی از منظر اجتماعی قابل قبول نباشند.

۶-۲- سطح کمبود مجاز، ساختار شبکه درمانی را تغییر می‌دهد.

تحلیل حساسیت نسبت به پارامتر کمبود مجاز (α) نشان داد که افزایش میزان کمبود قابل قبول، باعث کاهش هزینه کل سیستم و کاهش تعداد مراکز فعال می‌شود. به طور مشخص، در سطوح پایین α ، مدل برای تضمین پوشش تقاضا چند مرکز درمانی را فعال نگه می‌دارد، در حالی که با افزایش این پارامتر، تمرکز ظرفیت در تعداد کمتری از مراکز اقتصادی‌تر می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که سیاست تعیین سطح خدمت، مستقیماً بر ساختار شبکه درمانی،

۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این پژوهش، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه استوار برای مکان‌یابی مراکز درمانی تحت عدم قطعیت تقاضا و محدودیت تأمین تجهیزات پزشکی ارائه شد. مدل پیشنهادی با هدف ایجاد تعادل میان هزینه‌های سیستم، سطح دسترسی بیماران و پایداری عملکرد شبکه سلامت در شرایط بحرانی طراحی گردید. در این چارچوب، تصمیمات مربوط به مکان‌یابی مراکز درمانی، تخصیص خدمات، ظرفیت‌گذاری و تأمین تجهیزات پزشکی به‌صورت یکپارچه مدل‌سازی شدند.

برای مواجهه با عدم قطعیت، از رویکرد بهینه‌سازی استوار مبتنی بر چارچوب مالوی و همکاران [۹] استفاده شد تا علاوه بر کمینه‌سازی هزینه مورد انتظار، پایداری عملکرد مدل در سناریوهای مختلف نیز تقویت شود. همچنین، با در نظر گرفتن محدودیت کمبود مجاز خدمات، امکان کنترل سیاست‌محور سطح خدمت در شرایط بحران فراهم شد.

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل، علاوه بر یک مثال عددی تشریحی، ۱۵ مسئله آزمایشی در سه اندازه کوچک، متوسط و بزرگ طراحی شد و عملکرد مدل پیشنهادی با دو مدل مبنا در ۷۵۰ ارزیابی خارج از نمونه مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مدل قادر است با اتخاذ تصمیمات هماهنگ در سطوح استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی، پاسخ‌گویی مناسبی به تقاضاهای متغیر ارائه دهد. همچنین، تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی مدل ضمن تأیید اعتبار رفتاری آن، نشان داد که:

- افزایش سطح کمبود مجاز (α) موجب کاهش هزینه کل سیستم، اما افزایش کمبود خدمات می‌شود؛ از این‌رو، مقدار این پارامتر باید با توجه به حداقل سطح خدمت مورد قبول سیاست‌گذار تعیین شود.

- افزایش ضریب جریمه کمبود (ω) مدل را به سمت پوشش کامل تقاضا و افزایش سطح خدمت سوق می‌دهد؛ بنابراین، این پارامتر می‌تواند برای بازنمایی اهمیت مدیریتی جلوگیری از تقاضای پاسخ‌داده‌نشده مورد استفاده قرار گیرد.

- افزایش ضریب استواری λ ، وزن کنترل پراکندگی هزینه‌های سناریویی را در تابع هدف افزایش می‌دهد؛ باین‌حال، در مثال تشریحی تغییر محسوسی در ساختار تصمیمات مشاهده نشد. نتایج خارج از نمونه نشان داد جمله استواری موجب کاهش محدود تغییرپذیری هزینه شده است؛ بنابراین، λ را می‌توان پارامتری برای

میزان تمرکز ظرفیت و سطح دسترسی بیماران اثرگذار است. بنابراین، انتخاب مقدار مناسب α باید بر اساس ملاحظات اقتصادی، عدالت در دسترسی و میزان ریسک‌پذیری سیستم انجام گیرد.

۶-۳- یکپارچه‌سازی زنجیره تأمین با مکان‌یابی، عامل کلیدی تاب‌آوری است.

یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش، اهمیت هم‌زمان تصمیمات مکان‌یابی مراکز درمانی و تأمین تجهیزات پزشکی است. نتایج نشان داد که تاب‌آوری سیستم تنها از طریق افزایش ظرفیت درمانی حاصل نمی‌شود، بلکه قابلیت دسترسی پایدار به تجهیزات حیاتی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد شبکه دارد. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن هم‌زمان انتخاب مراکز، تخصیص بیماران و تأمین تجهیزات، امکان ایجاد هماهنگی میان بخش درمان و زنجیره تأمین را فراهم می‌کند. این موضوع به‌ویژه در بحران‌هایی مانند همه‌گیری‌ها که اختلال در زنجیره تأمین تجهیزات پزشکی بسیار محتمل است، اهمیت بالایی دارد.

۶-۴- ضریب استواری (λ) ابزاری برای کنترل ریسک سیستم است.

نتایج تحلیل حساسیت پارامتر استواری (λ) نشان داد که افزایش این ضریب، هزینه کل استوار را افزایش می‌دهد، اما در مقابل، موجب افزایش پایداری عملکرد سیستم در سناریوهای مختلف می‌شود. نکته مهم آن است که تغییر λ بدون تغییر اساسی در ساختار شبکه، سطح محافظه‌کاری مدل را تنظیم می‌کند. در واقع، این پارامتر به‌عنوان یک اهرم سیاستی برای کنترل ریسک عمل می‌کند و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند متناسب با شدت بحران و میزان عدم قطعیت، سطح مناسبی از استواری را انتخاب کنند.

۶-۵- ضرورت حرکت از «بهینه‌سازی هزینه» به «تصمیم‌گیری تاب‌آور»

در مجموع، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی شبکه‌های درمانی بحران نباید صرفاً بر حداقل‌سازی هزینه متمرکز باشد. در شرایط بحرانی، معیارهایی نظیر دسترسی عادلانه، پایداری خدمت‌رسانی، قابلیت پاسخ‌گویی و محدودیت‌های تأمین تجهیزات پزشکی اهمیت راهبردی دارند. از این‌رو، مدل‌های تصمیم‌یار حوزه سلامت باید بتوانند به‌صورت هم‌زمان ابعاد اقتصادی، اجتماعی و عملیاتی را در فرآیند تصمیم‌گیری لحاظ کنند تا شبکه‌ای تاب‌آور و قابل‌انکاد در برابر بحران‌ها ایجاد شود.

تنظیم میزان اهمیت پایداری هزینه نسبت به عملکرد مورد انتظار دانست.

تحلیل کمی جبهه پارتو نشان داد که در مقایسه با راه‌حل حداقل هزینه، افزایش ۷/۴۴ درصدی هزینه استوار، شاخص دسترسی را ۱۸/۸۰ درصد بهبود می‌دهد. همچنین، دستیابی به بهترین سطح دسترسی با افزایش ۴۱/۱۴ درصدی هزینه همراه است و بهبود ۵۷/۷۲ درصدی شاخص دسترسی را ایجاد می‌کند. این نتایج امکان انتخاب یک راه‌حل میانی را برای مدیران فراهم می‌کند؛ به‌گونه‌ای که میزان افزایش هزینه با سطح بهبود مورد انتظار در دسترسی مقایسه شود.

این نتایج نشان می‌دهد که میان هزینه، سطح خدمت و پایداری عملکرد سامانه‌های سلامت یک رابطه مبادله‌ای وجود دارد و سیاست‌گذاران باید بر اساس شرایط بحران، منابع در دسترس و میزان ریسک‌پذیری، تعادل مناسبی میان این اهداف برقرار نمایند. از منظر مدیریتی، کاهش ظرفیت و اتکا به تقاضای متوسط ممکن است هزینه اولیه شبکه را کاهش دهد، اما در شرایط افزایش تقاضا می‌تواند به کمبود خدمات و تحمیل هزینه‌های بسیار بالاتر منجر شود. بنابراین، افتتاح مراکز بیشتر یا پیش‌بینی ظرفیت بالاتر را می‌توان نوعی سرمایه‌گذاری پیشگیرانه برای حفظ سطح خدمت در شرایط نامطمئن دانست.

نتایج مقایسه خارج از نمونه نیز نشان داد مدل پیشنهادی در مقایسه با مدل قطعی، متوسط هزینه خارج از نمونه را حدود ۵۶/۱۲ درصد و بیشترین هزینه سناریویی را حدود ۸۳/۹۰ درصد کاهش داده است. مدل قطعی به‌طور متوسط تنها ۹۶/۹۳ درصد تقاضا را پوشش داد و با ۱۱/۲۸ واحد کمبود خدمات مواجه شد، در حالی که دو مدل سناریومحور پوشش کامل تقاضا را حفظ کردند. همچنین، افزودن جمله استواری به مدل سناریومحور، انحراف معیار هزینه و شاخص دسترسی را به ترتیب حدود ۵۷/۰ و ۶۵/۰ درصد بهبود داد، در حالی که متوسط هزینه خارج از نمونه تنها ۰/۰۳ درصد افزایش یافت. این یافته نشان می‌دهد بخش عمده بهبود عملکرد از ورود سناریوهای عدم قطعیت حاصل شده و جمله استواری نقش تکمیلی در کاهش نوسان و متعادل‌سازی تصمیمات دارد.

آزمون‌های مقیاس‌پذیری نیز نشان داد هر ۱۰۵ زیرمسئله مربوط به ۱۵ نمونه آزمایشی با اثبات بهینگی حل شدند. میانگین زمان تولید جبهه پارتو از ۸۳۷۲/۰ ثانیه در مسائل کوچک به ۲۹۹۸/۴ ثانیه در مسائل متوسط و ۳۴۳۱۸۸/۳ ثانیه در مسائل بزرگ افزایش یافت. بنابراین، مدل در دامنه ابعاد بررسی‌شده قابل حل است، هرچند افزایش اندازه مسئله به رشد محسوس زمان محاسباتی منجر می‌شود.

از مهم‌ترین نوآوری‌های پژوهش حاضر می‌توان به یکپارچه‌سازی هم‌زمان تصمیمات مکان‌یابی، تخصیص، ظرفیت‌گذاری و تأمین تجهیزات پزشکی در قالب یک مدل استوار با ملاحظات تاب‌آوری خدمت محور اشاره کرد. همچنین، در نظر گرفتن محدودیت تأمین تجهیزات پزشکی در کنار عدم قطعیت تقاضا، مدل را به چارچوبی کاربردی‌تر برای برنامه‌ریزی بحران‌های سلامت تبدیل کرده است.

با وجود قابلیت‌های مدل پیشنهادی، پژوهش حاضر نیز دارای محدودیت‌هایی است. از جمله اینکه داده‌های مورد استفاده آزمایشی بوده و مدل با داده‌های واقعی یک شبکه درمانی اعتبارسنجی نشده است. همچنین برخی فرضیات ساده‌کننده نظیر قطعی بودن زمان حمل‌ونقل و ظرفیت ثابت تأمین‌کنندگان در نظر گرفته شده است. تاب‌آوری در پژوهش حاضر از منظر حفظ سطح خدمت در برابر نوسانات تقاضا بررسی شده است و ابعاد زمانی بازایی، سازگاری پس از اختلال و تحول ساختاری شبکه به‌طور صریح مدلسازی نشده‌اند. مقایسه انجام‌شده نیز اثر عدم قطعیت سناریومحور و جمله استواری را بررسی می‌کند و اثر مستقل یکپارچه‌سازی تصمیمات نسبت به یک رویکرد مرحله‌ای را مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌کند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی:

- مدل در ابعاد واقعی و با داده‌های میدانی پیاده‌سازی شود؛
- عدم قطعیت‌های دیگری نظیر زمان سفر، خرابی زیرساخت‌ها و محدودیت نیروی انسانی در مدل لحاظ گردد؛
- الگوریتم‌های فراابتکاری و روش‌های ترکیبی برای حل نمونه‌های بزرگ مقیاس توسعه یابد؛
- و در نهایت، ملاحظات عدالت در دسترسی و معیارهای اجتماعی نیز به مدل افزوده شود.

در مجموع، مدل پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تصمیم‌یار مؤثر برای برنامه‌ریزان نظام سلامت در شرایط بحران، همه‌گیری‌ها و محدودیت‌های تأمین تجهیزات پزشکی مورد استفاده قرار گیرد و به بهبود پایداری، سطح خدمت و کارایی شبکه‌های درمانی کمک نماید.

۸- مراجع

- [1] H. Li, D. Qu, and T. Luo, "A robust model on the location of temporary medical centers considering secondary disasters," *Expert Syst. Appl.*, vol. 312, Art. no. 131532, Feb. 2026, doi: [10.1016/j.eswa.2026.131532](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.131532).
- [2] H. Liu, Y. Wang, S. Zhou, Y. Chen, and J.-K. Hao, "Integrated emergency medical facility location and patient dispatching under uncertainty," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 26, no. 9, pp. 13159–13173, Sep. 2025, doi: [10.1109/TITS.2025.3584100](https://doi.org/10.1109/TITS.2025.3584100).
- [3] S. Heyhat, D. Rahmani, and S. Shahparvari, "Data-driven distributionally robust optimization for resilient healthcare resource planning and crisis mitigation," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 205, Art. no. 104449, Jan. 2026, doi: [10.1016/j.tre.2025.104449](https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104449).

- [14] A. A. Eshghi, R. Tavakkoli-Moghaddam, S. Ebrahimnejad, and V. R. Ghezavati, "Multi-objective robust mathematical modeling of emergency relief in disaster under uncertainty," *Sci. Iran. Trans. E Ind. Eng.*, vol. 29, no. 5, pp. 2670–2695, Oct. 2022, doi: [10.24200/sci.2020.54485.3770](https://doi.org/10.24200/sci.2020.54485.3770).
- [15] E. S. Ardakani, N. G. Larimi, M. O. Nejad, M. Madani Hosseini, and M. Zargoush, "A resilient, robust transformation of healthcare systems to cope with COVID-19 through alternative resources," *Omega*, vol. 114, Art. no. 102750, Jan. 2023, doi: [10.1016/j.omega.2022.102750](https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102750).
- [16] Y. Park, S. Lee, I. Sung, P. Nielsen, and I. Moon, "Facility location-allocation problem for emergency medical service with unmanned aerial vehicle," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 1465–1477, Feb. 2023, doi: [10.1109/TITS.2022.3223509](https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3223509).
- [17] Y. Hu, Q. Liu, S. Li, and W. Wu, "Robust emergency logistics network design for pandemic emergencies under demand uncertainty," *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.*, vol. 196, Art. no. 103957, Apr. 2025, doi: [10.1016/j.tre.2024.103957](https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103957).
- [18] H. Zhang, K. Zhang, and L. Ma, "Multi-objective two-level medical facility location problem and tabu search algorithm," *J. Healthc. Eng.*, vol. 2021, Art. no. 6618537, 2021, doi: [10.1155/2021/6618537](https://doi.org/10.1155/2021/6618537).
- [19] M. Alinaghian, S. R. Hejazi, N. Bajoul, and K. Sadeghi Velnib, "A novel robust model for location-allocation of healthcare facilities considering pre-disaster and post-disaster characteristics," *Sci. Iran. Trans. E Ind. Eng.*, vol. 30, no. 2, pp. 619–641, Apr. 2023, doi: [10.24200/sci.2022.59876.3241](https://doi.org/10.24200/sci.2022.59876.3241).
- [20] M. Wan, S. Liu, R. Allmendinger, and R. Su, "Multi-objective robust optimization for facility location problem of personalized medicine supply chain," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 333, no. 3, pp. 807–822, Sep. 2026, doi: [10.1016/j.ejor.2026.01.003](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2026.01.003).
- [21] I. I. Almaraj, M. H. Al-Yagoub, T. B. Trafalis, and D. H. Wu, "A multi-objective integrated supply chain model under dynamic allocation of temporary vaccine centers and uncertain demand," *Appl. Math. Model.*, vol. 150, Art. no. 116328, Jan. 2026, doi: [10.1016/j.apm.2025.116328](https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.116328).
- [22] M. Fattahi, E. Keyvanshokoo, D. Kannan, and K. Govindan, "A robust optimization approach for the design of a sustainable and resilient healthcare supply chain under disruption risks," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 304, no. 1, pp. 192–206, Jan. 2023, doi: [10.1016/j.ejor.2022.01.023](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.01.023).
- [23] L. Shen, Q. Yang, X. Xu, T. Wu, S. Zhang, and H. Shao, "A generalized three-stage optimization model for emergency medical services under uncertainties: Integrating rescue station locations, ambulance deployment, and vehicle dispatch," *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.*, vol. 205, Art. no. 104499, Jan. 2026, doi: [10.1016/j.tre.2025.104499](https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104499).
- [4] M. K. Oksuz and S. I. Satoglu, "A two-stage stochastic model for location planning of temporary medical centers for disaster response," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 44, Art. no. 101426, Mar. 2020, doi: [10.1016/j.ijdrr.2019.101426](https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101426).
- [5] H. Bakhshandeh, M. Kamalabadi, M. Mehrabad, and E. Mohammadi, "Robust location-allocation modeling of emergency medical services considering uncertainty in demand and resources," *Modares Mech. Eng.*, vol. 19, no. 6, pp. 1483–1494, 2019 (in Persian).
- [6] Y. D. Ko, B. D. Song, and H. Hwang, "Location, capacity and capability design of emergency medical centers with multiple emergency diseases," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 101, pp. 10–20, Nov. 2016, doi: [10.1016/j.cie.2016.08.011](https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.011).
- [7] X. Gao, Y. Zhou, M. I. H. Amir, F. A. Rosyidah, and G. M. Lee, "A hybrid genetic algorithm for multi-emergency medical service center location-allocation problem in disaster response," *Int. J. Ind. Eng.*, vol. 24, no. 6, pp. 663–679, 2017.
- [8] O. Alisan, M. B. Ulak, E. E. Ozguven, and M. W. Homer, "Location selection of field hospitals amid COVID-19 considering effectiveness and fairness: A case study of Florida," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 93, Art. no. 103794, Jul. 2023, doi: [10.1016/j.ijdrr.2023.103794](https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103794).
- [9] J. M. Mulvey, R. J. Vanderbei, and S. A. Zenios, "Robust optimization of large-scale systems," *Oper. Res.*, vol. 43, no. 2, pp. 264–281, Mar.–Apr. 1995, doi: [10.1287/opre.43.2.264](https://doi.org/10.1287/opre.43.2.264).
- [10] Y. Zaree Mehrjerdi and M. Heidari Meybodi, "A robust optimization model of facility location-reliable network design in competitive environment under uncertainty," *Adv. Ind. Eng.*, vol. 51, no. 3, pp. 325–337, 2017, doi: [10.22059/aieng.2017.212469.1175](https://doi.org/10.22059/aieng.2017.212469.1175). (in Persian).
- [11] F. Alibakhshi, M. Modiri, C. Valmohammadi, and G. R. Hashemzadeh, "Presenting a model for supply chain resilience assessment in the country's medical centers (qualitative and quantitative approach)," *Supply Chain Manag.*, vol. 25, no. 80, pp. 65–88, 2023. (in Persian).
- [12] M. Acar and O. Kaya, "A healthcare network design model with mobile hospitals for disaster preparedness: A case study for Istanbul earthquake," *Transp. Res. Part E: Logist. Transp. Rev.*, vol. 130, pp. 273–292, Oct. 2019, doi: [10.1016/j.tre.2019.09.007](https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.09.007).
- [13] S. E. Hashemi, M. Jabbari, and P. Yaghoubi, "A mathematical optimization model for location Emergency Medical Service (EMS) centers using contour lines," *Healthc. Anal.*, vol. 2, Art. no. 100026, Nov. 2022, doi: [10.1016/j.health.2022.100026](https://doi.org/10.1016/j.health.2022.100026).