Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 19-29

Sharif University of Technology

https://sjie.journals.sharif.edu/

Research Article

A Multi-Objective Model for Environmentally Sustainable Healthcare Facility Location-Allocation: Child Cancer Hospitals Establishment in Iran in 2030

Mohammad Fattahi and Arash Nemati *

Department of Industrial Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
* corresponding author: (r.nemati@nit.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:13 August 2024

Revised:9 November 2024

Accepted:26 November 2024

Keywords:

Sustainability,
healthcare facility location-allocation,
child cancer hospital,
carbon footprint effect,
hospital capacity planning.

Abstract

An unbalanced healthcare facility system causes patients to travel between areas to reach qualified treatment resources, resulting in patient fatigue, unnecessary expenses, delays in disease diagnosis and treatment, and environmental destruction due to CO_2 emissions. The environmentally sustainable healthcare facility location-allocation problem focusing on minimizing the carbon footprint resulting from patients' movement has not been considered. Cancer hospitals provide cancer patients with comprehensive treatment services helpful for avoiding cancer patients referring to different healthcare centers. Child cancer hospitals with a child-centered design can facilitate the cancer disease curing period for children. Although cancer hospital network design has been noticed in recent years, the child cancer hospital location- allocation problem has received no attention. This paper contributes to the environmentally sustainable healthcare facility location-allocation problem by introducing a multi-objective, mixed-integer linear mathematical model to minimize hospital establishment costs, surplus established beds, and the carbon footprint effect for child cancer hospitals' network design. The newly developed model is solved in a case study to propose a child cancer network establishment for Iran in 2030 using the CPLEX solver due to the significant shortage of specialized cancer treatment capacities in cancer hospitals, particularly those for children. The results indicated the necessity of establishing new child cancer hospitals in 9 provinces, with the highest number of new beds required in Isfahan province and existing beds in Tehran province. The validation of the carbon footprint effect demonstrates that reducing the carbon footprint could lead to a 50% decrease in CO_2 emissions. Additionally, the sensitivity analysis reveals that overlooking certain cost and efficiency factors could significantly reduce the carbon footprint effect, highlighting the potential for improved healthcare equity in cancer treatment by reducing the need for child cancer patients and their families to travel between provinces. In addition, several managerial insights and recommendations for future research are proposed.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Fattahi, M. and Nemati, A. 2026. A multi-objective model for environmentally sustainable healthcare facility location-allocation: child cancer hospitals establishment in Iran in 2030, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.19-29. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64965.2410

E-ISSN: 2676-475X © 2026 The Author(s). Sharif Industrial Engineering and Management Journal, Published by Sharif University of Technology This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی صنایع و مدیریت شریف

https://sjie.journals.sharif.edu

مقاله‌ی پژوهشی

یک مدل چندهدفه برای مکان‌یابی- تخصیص پایدار زیست‌محیطی تسهیلات سلامت: احداث بیمارستان سرطان کودکان در ایران در سال ۱۴۰۸

محمد فتاحی و آرش نعمتی *

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران.

*نویسنده مسئول (r.nemati@nit.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۹/۰۶

واژگان کلیدی:

پایداری،

مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت،

بیمارستان سرطان کودکان،

اثر ردپای کربن،

برنامه‌ریزی ظرفیت بیمارستان.

چکیده

توزیع نامناسب تسهیلات سلامت، سفرهای اجباری را به بیماران تحمیل می‌کند، که منجر به خستگی، فشار اقتصادی، تأخیر در اقدام‌های تشخیصی و درمانی موردنیاز و همچنین تخریب محیط‌زیست از طریق انتشار گاز دی‌اکسیدکربن غیرضروری می‌شود. پژوهش حاضر بر مسئله‌ی پایداری زیست‌محیطی در مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت، از جمله بیمارستان‌ها متمرکز بوده است. بدین منظور، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه‌ی عدد صحیح مخلوط برای مسئله‌ی مکان‌یابی بیمارستان‌های تخصصی درمان سرطان کودکان و تخصیص بیماران با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی احداث، تعداد تخت‌های مازاد، و اثر ردپای کربن ارائه و برای برنامه‌ریزی احداث بیمارستان‌های تخصصی درمان سرطان کودکان در ایران در سال ۱۴۰۸ با استفاده از CPLEX حل شده است. نتایج نشان داده است که نیاز است بیمارستان‌های سرطان کودکان جدیدی در ۹ استان احداث شوند. همچنین با نادیده‌گرفتن برخی ملاحظات هزینه‌ای و بهره‌وری ظرفیت، آثار ردپای کربن به‌طورقابل‌توجهی کاهش می‌یابد.

۱. مقدمه

پژوهشگران متعددی به پایداری، به‌خصوص از منظر زیست‌محیطی، در مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات توجه کرده‌اند.[۱-۳] در سال‌های اخیر، طراحی سیستم‌های سلامت پایدار، مانند برنامه‌ریزی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت بیش از پیش مدنظر قرار گرفته است.[۴-۶] اهداف مختلفی در برنامه‌ریزی مکان‌یابی- تخصیص مراکز ارائه‌کننده‌ی خدمات سلامت، از جمله بیمارستان‌ها استفاده شده‌اند، که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به: کمینه‌ی هزینه‌ی احداث، کمینه‌ی فاصله برای دسترسی به خدمات سلامت، عدالت در نزدیکی به مراکز درمانی، و بهره‌وری ظرفیت‌های درمانی ایجادشده اشاره کرد.[۷-۱۱] هزینه‌ی ایجاد ظرفیت درمانی در بیمارستان‌های تخصصی، مانند سرطان، به‌دلیل استفاده از تجهیزات تخصصی و استخدام متخصصان تشخیص و درمان سرطان بیشتر از بیمارستان‌های عمومی است.[۱۲-۱۵] لذا درنظرگرفتن معیارهای پایداری، مانند هزینه‌ی احداث و بهره‌وری ظرفیت‌های ایجادشده در بیمارستان‌های سرطان احداث‌شده اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. کمینه‌سازی هزینه‌ی احداث بیمارستان‌های سرطان و هزینه‌ی فرصت ایجاد تخت‌های تخصصی درمان سرطان مازاد از جمله اهدافی هستند که تاکنون در ارائه‌ی مدل‌های برنامه‌ریزی خطی برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص بیمارستان‌های تخصصی درمان سرطان نقش آفرینی کرده‌اند.[۱۶ و ۹-۱۸] در صورت عدم دسترسی به مراکز درمانی مناسب در محل زندگی، بیمار مبتلا به سرطان مجبور به تحمل سفرهای طولانی، هزینه‌ی مازاد، و اتلاف زمان جهت دریافت خدمات درمانی مناسب در مناطق دیگر می‌شود.[۱۹] لذا اهدافی با ماهیت پایداری اجتماعی، مانند عدالت در احداث زیرساخت‌های تشخیص و درمان سرطان نیز در مطالعات مرتبط استفاده شده‌اند.[۱۷]

در برخی از کشورها مانند ایران، مراکز تخصصی درمان در چند شهر بزرگ متمرکز شده‌اند و بیماران و همراهان مجبورند برای دریافت خدمات مرتبط در برخی مواقع، سفرهای چند صد کیلومتری انجام دهند. این امر موجب ایجاد ترافیک مرتبط در جاده‌های بین‌شهری و همچنین ترافیک داخل‌شهری در مقاصد می‌شود، که آثار منفی زیست محیطی از جمله انتشار گاز دی‌اکسیدکربن دارد و قابل‌اندازه‌گیری در مقیاس اثر ردپای کربن[1] می‌شود. لذا

[1] Carbon footprint effect

استناد به این مقاله:

فتاحی، محمد و نعمتی، آرش، ۱۴۰۴. یک مدل چندهدفه برای مکان‌یابی- تخصیص پایدار زیست‌محیطی تسهیلات سلامت: احداث بیمارستان سرطان کودکان در ایران در سال ۱۴۰۸. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص. ۱۹-۲۹. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64965.2410

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

تمرکززدایی در احداث بیمارستان‌های تخصصی سرطان، علاوه‌بر کاهش تخریب محیط‌زیست، موجب کاهش رنج و زحمت بیماران مبتلا به سرطان به‌دلیل حذف و یا کاهش سفرهای درمانی می‌شود. از طرفی دیگر، هر چند بیماری سرطان در میان افراد میانسال و سالمند بسیارشایع‌تر از کودکان است، اما همواره بخش هر چند کوچکی از بیماران مبتلا به سرطان در هر منطقه را کودکان تشکیل می‌دهند. مثلاً حدود ۳٪ ایرانیان مبتلا به سرطان، کودک هستند. بنابراین، ایجاد مراکز تخصصی درمان سرطان کودکان به همراه متناسب‌سازی فضای تسهیلات درمان مرتبط می‌تواند در کاهش آلام کودکان بیمار مؤثر باشد. در کشور ایران، فقط یک بیمارستان تخصصی درمان سرطان کودکان با نام محک با ظرفیت ۱۰۰ تخت در تهران واقع شده است و کودکان بیمار سایر استان‌ها یا به آن در تهران و یا در بیمارستان‌های عمومی مرتبط با کودکان یا بزرگسالان مراجعه و خدمات درمانی دریافت می‌کنند.

علی‌رغم اینکه در مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص بیمارستان، از جمله بیمارستان سرطان، به جنبه‌ی اجتماعی و اقتصادی از پایداری توجه شده است، اما براساس نتایج جستجوهای نگارندگان پژوهش حاضر، شواهدی دال بر مدنظر قراردادن پایداری زیست‌محیطی در طراحی شبکه‌ای از بیمارستان‌ها، از جمله در ایران، یافت نشده است. لذا این سؤال‌ها در مسئله‌ی مکان‌یابی تخصیص بیمارستان‌ها و از جمله بیمارستان تخصصی درمان سرطان بدون پاسخ مانده‌اند:

- چگونه می‌توان پایداری زیست‌محیطی را در مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص بیمارستان‌ها فرموله کرد؟
- چگونه می‌توان به یک برنامه‌ریزی کارا و پایدار برای احداث بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان دست یافت؟

لذا، پژوهش حاضر درصدد بوده است که با ارائه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط چندهدفه با درنظرگرفتن پایداری زیست‌محیطی و حل آن در مثال موردی احداث بیمارستان‌های سرطان کودکان در ایران در سال ۱۴۰۸ به سؤال‌های اخیر پاسخ دهد. در مدل موردنظر، سه هدف شامل: کمینه‌سازی هزینه‌ی احداث بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان، تعداد تخت‌های مازاد ایجادشده، و مقدار اثر ردپای کربن ناشی از ارجاع بیماران به بیمارستان‌های تخصصی سرطان غیربومی متضمن پایداری اقتصادی، اجتماعی، و زیست‌محیطی به‌طور توأمان در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، به‌طورخلاصه می‌توان نوآوری‌های نوشتار حاضر را به این صورت بیان کرد:

- ارائه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط چندهدفه برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص پایدار بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان با درنظرگرفتن اثر ردپای کربن.
- برنامه‌ریزی پایدار برای ظرفیت موردنیاز از بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان در مثال موردی ایران در سال ۱۴۰۸.

در ادامه، نوشتار حاضر بدین شرح سازمان یافته است: بخش ۲، ارائه‌ی پیشینه پژوهش مرتبط با مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص مراکز درمانی؛ بخش ۳، تعریف مسئله و ارائه‌ی مدل ریاضی توسعه داده‌شده؛ بخش ۴، ارائه‌ی نتایج حل مدل جدید در مثال موردی ایران؛ بخش ۵، مطرح‌ساختن نتیجه‌گیری، محدودیت‌ها، و پیشنهادهای مرتبط؛ و در بخش انتهایی، منابع استفاده‌شده ارائه شده‌اند.

۲. پیشینه‌ی پژوهش

در بخش حاضر، پژوهش‌های منتشرشده در مورد مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص مراکز ارائه‌کننده‌ی خدمات درمان، مانند بیمارستان‌ها از جمله بیمارستان‌های تخصصی سرطان جهت وضوح بیشتر نوآوری‌های پژوهش حاضر مرور شده‌اند. مستره[1] و همکاران (۲۰۱۵)، مدل‌های برنامه‌ریزی دوهدفه برای مسئله‌ی مکان‌یابی-تخصیص بیمارستان با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی دسترسی به مراکز درمانی را ارائه و با استفاده از روش محدودیت اپسیلون[2] حل کرده، اما در ارائه‌ی مدل خود به پایداری و آثار زیست‌محیطی توجهی نکرده‌اند.[۲۰] بهشتی‌فرد و علی‌محمدی (۲۰۱۵)، یک مدل چهارهدفه، شامل: کمینه‌سازی بی‌عدالتی در دسترسی به خدمات درمان، هزینه‌ی سفر، ناسازگاری در مورد استفاده از زمین، و هزینه‌ی احداث برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت ارائه و آن را با استفاده از روش فراابتکاری NSGA-II در یک مثال موردی از ایران بدون توجه به پایداری زیست‌محیطی حل کرده‌اند.[۲۱] زرین‌پور و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل مکان‌یابی- تخصیص سلسله‌مراتبی برای برنامه‌ریزی شبکه‌ی زیرساخت‌های سلامت با درنظرگرفتن ریسک اختلال تسهیلات بدون توجه به پایداری زیست‌محیطی ارائه و آن را با استفاده از یک الگوریتم بر پایه‌ی تجزیه‌ی بندرز (BD)[3] حل کرده‌اند.[۲۲] مالکی رستاقی و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل دوهدفه به منظور کمینه‌سازی هزینه‌ی کل و بیشینه‌سازی نیروی کار موردنیاز در مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص برای طراحی شبکه‌ی تسهیلات سلامت ارائه و آن را با استفاده از روش محدودیت اپسیلون در چند مثال موردی حل کرده‌اند. اما پایداری زیست‌محیطی از اهداف آن نبوده است.[۲۳] وانگ[4] و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل چندهدفه برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت عمومی با هدف نزدیکی بیماران به مراکز درمانی و انتخاب مکان‌هایی با شرایط مناسب‌تر برای بیماران، مانند محیطی آرام و سبز ارائه و با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO)[5]، آن را در یک مثال موردی از چین حل کرده، ولی به آثار زیست‌محیطی سفر بیماران مابین مناطق مختلف جهت دسترسی به خدمات درمانی توجه نکرده‌اند.[۲۴] دی ملو ساتلر[6] و همکاران (۲۰۱۹)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی تک‌هدفه برای مکان‌یابی تسهیلات سلامت و تخصیص بیماران و متخصصان به مراکز احداث‌شده با هدف افزایش عدالت در سیستم سلامت، ولی بدون توجه به پایداری زیست‌محیطی ارائه و آن را در یک مثال موردی از کشور برزیل حل کرده‌اند.[۲۵] اویانگ[7] و همکاران (۲۰۲۰)، چند مدل برنامه‌ریزی خطی برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها، مانند هزینه‌ی ثابت احداث تسهیلات و هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات بدون توجه به پایداری زیست‌محیطی ارائه و آن را با استفاده از CPLEX حل کرده‌اند.[۲۶] کمالی و همکاران (۲۰۲۰)، یک مدل بر پایه‌ی سناریو برای مکان‌یابی مراکز درمانی و تخصیص آمبولانس به آن‌ها بدون توجه به پایداری زیست‌محیطی ارائه و آن را در مثال موردی استان اصفهان (کشور ایران) حل کرده‌اند.[۲۷] کاوه و همکاران (۲۰۲۰)، یک روش توسعه‌یافته از الگوریتم ژنتیک[8] را برای حل

[1] Mestre
[2] ε-constraint
[3] Benders Decomposition
[4] Wang
[5] Multi-Objective Particle Swarm Optimization
[6] de Melo Sathler
[7] Ouyang
[8] Genetic Algorithm

مدلی برای مکان‌یابی بیمارستان‌ها و تخصیص جمعیت به آن‌ها بدون درنظرگرفتن جوانب زیست‌محیطی ارائه کرده‌اند.[۲۸] حق‌شناس و همکاران (۲۰۲۱)، یک مدل دوهدفه، شامل کمینه‌سازی هزینه‌ی کل و تعداد تخت‌های مازاد احداث‌شده را برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص بیمارستان‌های تخصصی سرطان ارائه کرده‌اند. هزینه‌ی کل، شامل هزینه‌ی احداث بیمارستان-های سرطان و هزینه‌ی سفر بیماران مابین مناطق جهت دسترسی به خدمات درمان بیماری سرطان بوده است. ایشان مدل ارائه‌شده را با استفاده از روش درجه‌ی بهینگی (OG)[۹] و حل‌کننده‌ی CPLEX در مثال موردی طراحی شبکه‌ی بیمارستان‌های سرطان در کشور ایران در سال ۱۴۱۸ شمسی معادل ۲۰۴۰ میلادی حل کرده‌اند؛ اما توجهی به مسائل زیست‌محیطی مانند اثر ردپای کربن نکرده‌اند. میشرا[۱۰] و همکاران (۲۰۲۱)، با هدف برآوردن عدالت در دسترسی به تسهیلات سلامت، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)[۱۱] و تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه (MCDM)[۱۲] برای یافتن مکان مناسب برای احداث واحدهای درمانی بدون توجه به اثر ردپای کربن استفاده کرده‌اند.[۲۹] مندوزا-گومز[۱۳] و همکاران (۲۰۲۲)، یک مدل دوهدفه جهت کمینه‌سازی کل مسافت پیموده‌شده توسط بیماران و بیشینه‌سازی پوشش‌دهی تقاضای بیماران بستری در مسئله‌ی مکان‌یابی مراکز سلامت ارائه و آن را با استفاده از روش محدودیت اپسیلون و حل‌کننده‌ی CPLEX در یک مثال موردی از ایالت مکزیکو حل کرده و اثر ردپای کربن جزء اهداف موردتوجه ایشان نبوده است.[۱۰] علینقیان و همکاران (۲۰۲۳)، یک مدل ریاضی برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت برای مدیریت تقاضای شدید در شرایط بحرانی، مانند بلایای طبیعی ارائه کرده‌اند. ایشان از یک رویکرد حل بر پایه‌ی سناریو با استفاده از روش‌های حل مختلف، از جمله جستجوی ممنوع (TS)[۱۴]، الگوریتم جستجوی هماهنگی (HS)[۱۵]، و حد پایین لاگرانژ (LLB)[۱۶] برای حل مدل خود در چند مثال عددی استفاده کرده‌اند؛ انا در مدل ارائه‌شده‌ی خود، توجهی به آثار زیست‌محیطی مانند اثر ردپای کربن نکرده‌اند.[۸]

حق‌شناس و همکاران (۲۰۲۳)، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مخلوط برای کمینه‌سازی هزینه‌های احداث و جابجایی بیماران در مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص بیمارستان‌های تخصصی سرطان در ظرفیت‌های بهره‌ور از پیش‌تعیین‌شده‌ی ۳۰۰، ۵۰۰، و ۱۰۰۰ تختی ارائه و برای مثال موردی کشور ایران حل کرده‌اند. همچنین ایشان مدل‌های رگرسیونی برای پیش‌بینی تعداد رخداد سرطان به منظور تخمین تعداد بیماران مبتلا به سرطان در هر یک از ۳۱ استان ایران ایجاد کرده‌اند، اما توجه به اثر ردپای کربن از اهداف پژوهش آن‌ها نبوده است.[۲۳] کراسکال[۱۷] و همکاران (۲۰۲۳)، یک ساختار سلسله‌مراتبی پوشش‌دهی برای مکان‌یابی مراکز درمانی و بیمارستان‌ها و همچنین تخصیص بیماران بر پایه‌ی سیستم ارجاع‌دهی بیماران ارائه و با استفاده از الگوریتم ژنتیک در تعدادی مثال عددی با ابعاد بزرگ حل کرده‌اند، اما به شرایط زیست‌محیطی در مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت توجهی نکرده‌اند.[۱۱] سلامی و همکاران (۲۰۲۳)، یک مدل برنامه‌ریزی چندمرحله‌ای چندهدفه برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت با درنظرگرفتن کمبود منابع و رعایت عدالت، اما بدون توجه به شرایط زیست‌محیطی، مانند اثر ردپای کربن، ارائه و آن را با استفاده از الگوریتم ژنتیک در یک مثال عددی حل کرده‌اند.[۷] حق‌شناس و همکاران (۲۰۲۴)، یک مدل سه‌هدفه‌ی فازی، شامل بهینه‌سازی هزینه‌ی کل، تعداد کل تخت‌های اضافی احداثی، و عدالت را برای مسئله‌ی احداث بیمارستان‌های درمان سرطان ارائه و آن را در مثال موردی ایران حل کرده‌اند. تمرکز ایشان بر روی ارائه‌ی ضریب تعیین فازی برای پیش‌بینی‌کننده‌ی رگرسیونی تعداد رخداد سرطان و همچنین عدالت درمانی فازی بوده و به اثر ردپای کربن توجهی نکرده‌اند.[۲۴] کردی و نعمتی (۲۰۲۴)، یک مدل چنددوره‌ای برای احداث بیمارستان‌های تخصصی سرطان فقط بر پایه‌ی پایداری اقتصادی ارائه و آن را در مثال موردی ایران در بازه‌ی زمانی ۲۰۲۶ الی ۲۰۳۵ میلادی حل کرده‌اند.[۱۸]

از پیشینه‌ی پژوهش‌های ارائه‌شده‌ی اخیر می‌توان نتیجه‌گیری کرد که پایداری زیست‌محیطی براساس آثار ردپای کربن، براساس اطلاعات ایشان در مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت، از جمله بیمارستان‌ها و به‌ویژه بیمارستان تخصصی سرطان مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص بیمارستان‌های سرطان کودکان نیز تاکنون در یک مثال موردی حل نشده است. لذا درنظرگرفتن پایداری زیست‌محیطی در مدل‌سازی مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت و همچنین برنامه‌ریزی پایدار زیست‌محیطی برای احداث بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان در یک کشور (ایران)، برای نخستین بار در پژوهش حاضر ارائه شده است.

۳. مدل‌سازی مسئله

در بخش حاضر، مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص تسهیلات سلامت با درنظرگرفتن اثر ردپای کربن در ایجاد بیمارستان تخصصی سرطان کودکان تعریف و سپس مدل ریاضی توسعه داده‌شده ارائه شده است.

۳ .۱. تعریف مسئله

گزارش‌های آماری نرخ ابتلا به سرطان در کشورهای مختلف، از جمله سالنامه-های داده‌های سرطان منتشرشده توسط وزارت بهداشت، درمان، و آموزش پزشکی ایران نشان می‌دهند که سهم کودکان در کل ابتلا به سرطان به‌طورمتوسط بین ۱ تا ۵ درصد در جوامع مختلف است. لذا به همین دلیل، به طراحی و ساخت بیمارستان‌ها یا بخش‌های بیمارستانی خاص برای کودکان مبتلا به سرطان در سطح گسترده توجه نشده است. به‌عنوان مثال، در کشور ایران فقط یک بیمارستان تخصصی سرطان کودکان با ظرفیت ۱۰۰ تخت در تهران واقع شده است. براساس گزارش‌های مسئولان وزارت بهداشت، درمان، و آموزش پزشکی ایران در سال ۱۴۰۱، حدود ۱۵۰ هزار نفر به سرطان مبتلا شده‌اند و جمعیت کل افراد مبتلا به سرطان حدود ۵۰۰ هزار نفر بوده است؛ که سهم کودکان نیز حدود ۳٪ بوده است. لذا یک برآورد اولیه از تعداد کودکان مبتلا به سرطان در ایران در حال حاضر حدود ۱۵ هزار نفر است. اگر فرض شود که هر کودک مبتلا به سرطان، یک تخت بیمارستان تخصصی سرطان را فقط ۷ روز در سال اشغال کند، یک بیمارستان تخصصی کودکان ۱۰۰ تختی قادر به پاسخگویی به نیازهای ۱۰ هزار کودک مبتلا در حال حاضر است. حال

[9] Optimality Grade
[10] Mishra
[11] Geographic Information System
[12] Multi-Criteria Decision-Making
[13] Mendoza-Gomez
[14] Tabu search
[15] Harmony Search algorithm
[16] Lagrangian lower bound
[17] Karaskal

آنکه در سال‌های آتی با رشد جمعیت، به ظرفیت‌های بیشتری نیاز خواهد بود. در شرایط کمبود بیمارستان‌های تخصصی درمان سرطان کودکان به اجبار باید کودکان مبتلا به سرطان را در بیمارستان‌های عمومی کودکان، بیمارستان‌های تخصصی سرطان عمومی، و یا سایر مراکز درمان کرد، که دست‌کم تأثیرگذاری روحی- روانی مانند بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان را نخواهد داشت.

از طرفی، ارجاع کودکان بیمار و والدین و همراهان ایشان به مناطق دیگر، مانند تهران، جهت دریافت خدمات درمانی تخصصی موجب تحمیل سفر، گاهاً به دفعات در طول هر سال، به آن‌ها و درنهایت منتج به تولید آلاینده‌های مرتبط با سفر از جمله دی‌اکسیدکربن می‌شود. کاهش اثر ردپای کربن از طریق کاهش سفرها و در نتیجه ایجاد مراکز تخصصی درمان سرطان کودکان در مناطق کمتر توسعه‌یافته، که به نوبه‌ی خود موجب افزایش سطح عدالت درمانی می‌شود، میسر خواهد بود. بنابراین، برای توسعه‌ی بیمارستان‌های تخصصی درمان سرطان کودکان، باید علاوه‌بر هزینه‌ها و بهره‌وری ظرفیت‌های ایجادشده، به شرایط زیست‌محیطی، از جمله اثر ردپای کربن نیز توجه کرد. در زیربخش‌های بعدی، یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه‌ی عدد صحیح مخلوط برای دستیابی به اهداف مذکور ارائه شده است.

۳.۲. فرضیات مسئله

- هر منطقه‌ی تقاضا به‌طورهمزمان، یک منطقه‌ی کاندید برای احداث بیمارستان تخصصی سرطان کودکان نیز است.
- تقاضای همه‌ی مناطق باید کاملاً پاسخ داده شود. به‌عبارت دیگر، هر کودک بیمار باید به بیمارستان یا مرکز تخصصی سرطان ایجادشده در یک منطقه ارجاع داده شود.
- به‌منظور برآورده‌سازی اهداف بهره‌وری، یک کمینه‌ی مقداری برای ظرفیت بیمارستان‌ها یا مراکز تخصصی سرطان کودکان احداثی و یک بیشینه‌ی مقداری برای تعداد تخت‌های اضافی احداث‌شده در نظر گرفته شده است.

۳.۳. نمادهای استفاده‌شده در مسئله‌ی مطرح‌شده

در ادامه، نمادها، توصیف‌ها، اندیس‌ها، و پارامترهای مرتبط با مسئله‌ی احداث بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان ارائه شده است:

نمادها و اندیس‌ها

i: نشان‌دهنده‌ی مناطق تقاضا (i=1,2,…,n).

j: نشان‌دهنده‌ی مناطق کاندید برای احداث بیمارستان تخصصی سرطان کودکان (j=1,2,…,n).

پارامترهای مدل

d_i: تعداد کودکان مبتلا به سرطان در منطقه‌ی i؛

α_j: کمینه‌ی مقدار ظرفیت بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان احداثی در منطقه‌ی j؛

c_j: هزینه‌ی احداث هر واحد ظرفیت بیمارستان تخصصی سرطان کودکان بر حسب تخت در منطقه‌ی j؛

ω: بیشینه‌ی مقدار تعداد تخت‌های تخصصی سرطان کودکان احداثی مازاد نیاز در هر منطقه؛

dis_{ij}: فاصله‌ی میان منطقه‌ی تقاضای i و منطقه‌ی کاندید احداث بیمارستان تخصصی سرطان کودکان j؛

f: اثر ردپای کربن جابجایی هر کودک به ازاء هر کیلومتر در سفر مابین مناطق پس از ارجاع به بیمارستان تخصصی سرطان کودکان احداث‌شده در یک منطقه‌ی دیگر بر حسب گرم یا تن؛

β: ضریب استفاده از یک تخت در بیمارستان تخصصی سرطان کودکان توسط هر کودک بیمار در طول یک سال؛

a_{ij}: یک پارامتر دو مقداری، برابر ۱: اگر امکان ارجاع کودک مبتلا به سرطان از منطقه‌ی تقاضای i به بیمارستان تخصصی سرطان کودکان احداث‌شده در منطقه‌ی j وجود داشته باشد و در غیر این‌صورت برابر صفر است؛

π_j: تعداد تخت‌ها در بیمارستان تخصصی سرطان کودکان موجود در منطقه‌ی j؛

M: یک عدد بسیار بزرگ مثبت.

- **متغیرهای تصمیم**

Q_{ij}: تعداد کودکان بیمار ارجاع داده‌شده از منطقه‌ی i به منطقه‌ی j؛

Y_j: برابر ۱ اگر بیمارستان تخصصی سرطان کودکان در منطقه‌ی j احداث شود و در غیر این‌صورت برابر صفر؛

X_j: برابر ۱ اگر تخت تخصصی درمان سرطان کودکان در منطقه‌ی j در دسترس باشد، و در غیر این‌صورت برابر صفر؛

N_j: تعداد تخت‌های تخصصی سرطان کودکان موردنیاز در منطقه‌ی j؛

E_j: تعداد تخت‌های تخصصی سرطان کودکان ایجادشده در منطقه‌ی j؛

A_j: تعداد تخت‌های تخصصی سرطان کودکان در دسترس در منطقه‌ی j؛

AN_j: تعداد تخت‌های تخصصی سرطان کودکان مازاد در منطقه‌ی j.

۳.۴. مدل ریاضی ارائه‌شده

براساس تعریف مسئله، فرضیه‌ها و تعاریف ارائه‌شده، یک مدل ریاضی برنامه-ریزی خطی سه‌هدفه جهت ارائه‌ی طرحی برای احداث بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان با درنظرگرفتن شرایط پایداری زیست‌محیطی ارائه شده است (روابط ۱ الی ۱۷):

$$Min \quad Z_1 = \sum_j c_j E_j \tag{1}$$

$$Min \quad Z_2 = \sum_j AN_j \tag{2}$$

$$Min \quad Z_3 = \sum_i \sum_{j \neq i} dis_{ij} \times f \times Q_{ij} \tag{3}$$

s.t:

$$\sum_j Q_{ij} = d_i \qquad \forall i, j \tag{4}$$

$$Q_{ij} \leq M \times a_{ij} \qquad \forall j \tag{5}$$

$$N_j = \beta \times \sum_i Q_{ij} \qquad \forall j \qquad (6)$$

$$\sum_i Q_{ij} \le A_j / \beta \qquad \forall j \qquad (7)$$

$$Y_j \le M \times E_j \qquad \forall j \qquad (8)$$

$$E_j \le M \times Y_j \qquad \forall j \qquad (9)$$

$$X_j \le M \times A_j \qquad \forall j \qquad (10)$$

$$A_j \le M \times X_j \qquad \forall j \qquad (11)$$

$$A_j = E_j + \pi_j \qquad \forall j \qquad (12)$$

$$AN_j = A_j - N_j \qquad \forall j \qquad (13)$$

$$E_j \ge \alpha_j \times Y_j \qquad \forall j \qquad (14)$$

$$AN_j \le \omega \qquad \forall j \qquad (15)$$

$$E_j \le \sum_i a_{ij} \times \beta \times d_i \qquad \forall j \qquad (16)$$

$$Q_{ij}, N_j, E_j, A_j, AN_j \ge 0 \;; Y_j, X_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j \qquad (17)$$

توابع هدف ارائه‌شده در روابط ۱ الی ۳، به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی کل احداث بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان، تعداد کل تخت‌های مازاد احداث‌شده، و حجم کل میزان گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از جابجایی کودکان بیمار مابین مناطق هستند. رابطه‌ی ۴، پوشش‌دهی کل تقاضای مناطق تقاضا و محدودیت. رابطه‌ی ۵، الزام ارجاع کودکان بیمار مابین مناطق مطابق با شرایط مجاز از پیش تعیین‌شده را تضمین می‌کند. تعداد تخت تخصصی سرطان کودکان موردنیاز در مناطق نیز مطابق رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود. محدودیت ۷ تضمین می‌کند که تعداد کودکان بیمار ارجاع‌شده به یک منطقه از ظرفیت تخت‌های تخصصی سرطان در دسترس در آن منطقه بیشتر نیست. محدودیت-های ۸ و ۹ اطمینان می‌دهند که متغیر تصمیم دوتایی، ۰ و ۱، مرتبط با احداث بیمارستان تخصصی سرطان جدید در مناطقی مقدار ۱ بگیرد که در آن مناطق، ظرفیتی برای تخت‌های تخصصی سرطان ایجاد شده باشد؛ و اگر مقدار آن ۰ است، هیچ ظرفیت جدیدی برای آن منطقه در نظر گرفته نشود. محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ نیز نقش مشابهی در مورد رابطه‌ی میان ظرفیت در دسترس مناطق و متغیر دوتایی مرتبط ایفا می‌کنند. رابطه‌ی ۱۲، تعداد تخت‌های تخصصی سرطان در دسترس و رابطه‌ی ۱۳، نیز تعداد تخت‌های تخصصی سرطان کودکان مازاد در مناطق را محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۴ اطمینان حاصل می‌کند که ظرفیت‌های جدید ایجادشده برای تخت‌های تخصصی سرطان در هر منطقه از کمینه‌ی مقدار مجاز کمتر نیست. محدودیت ۱۵ تضمین می‌کند که تعداد تخت‌های تخصصی سرطان مازاد در هر منطقه از یک کمینه‌ی مقدار از پیش تعیین‌شده بیشتر نیست. محدودیت ۱۶ اطمینان حاصل می‌کند که تعداد تخت‌های تخصصی سرطان کودکان احداثی از تعداد کل موردنیاز ممکن با توجه به جمعیت کودکان بیماران مرتبط از پیش تعیین‌شده بیشتر نیست، و محدودیت ۱۷ نیز نوع متغیرهای تصمیم را تعریف می‌کند.

برای حل مدل ارائه‌شده از روش چندهدفه‌ی درجه‌ی بهینگی همانند حق‌شناس و همکاران (۲۰۲۱ و ۲۰۲۴)،[۹ و ۱۷] استفاده شده است. در روش ارائه‌شده، ابتدا بهترین و بدترین مقادیر ممکن برای هر یک از توابع هدف با حل مدل‌های تک‌هدفه‌ی مرتبط تعیین شده‌اند. سپس با استفاده از مقادیر تعیین‌شده و تابع عضویت اعداد فازی[۱۸]، مدل سه‌هدفه به یک مدل تک‌هدفه با تمرکز بر بیشینه‌سازی کمینه‌ی میزان بهینگی توابع هدف تبدیل و حل شده است.

۴. مثال موردی

در پژوهش حاضر، به مثال موردی ایران توجه شده است. زیرا در ایران، فقط یک مرکز تخصصی درمان سرطان کودکان با ظرفیت ناچیز ۱۰۰ تخت در تهران وجود دارد و در صورت موجودبودن ظرفیت خالی، کودکان به همراه والدین خود مجبورند گاهی مسافت‌هایی بیش از هزار کیلومتر را جهت دریافت خدمات مناسب در یگانه مرکز موجود سفر کنند. همچنین تعداد قابل‌توجهی از کودکان مبتلا یا مشکوک به بیماری سرطان مجبورند تمام مراحل تشخیص و درمان سرطان را در بیمارستان‌های عمومی و یا مراکز تخصصی درمان سرطان عمومی سپری کنند. لذا، حل مدل ارائه‌شده برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص بیمارستان سرطان کودکان در ایران می‌تواند اطلاعات مفیدی برای مدیران تصمیم‌گیرنده در حوزه‌ی سلامت جهت کاهش آلام کودکان مبتلا به سرطان و خانواده‌ی آن‌ها، افزایش سطح عدالت درمانی با احداث مراکز تخصصی درمان سرطان برای کودکان در نقاط مختلف کشور، و کاهش مشکلات مرتبط با جابجایی بیماران مابین نقاط مختلف کشور از جمله اثر ردپای کربن فراهم سازد. به‌منظور درنظرگرفتن فرصت زمانی مناسب برای احداث بیمارستان‌های موردنیاز، مدل ارائه‌شده برای مثال موردی ایران در سال ۱۴۰۸ شمسی معادل ۲۰۳۰ میلادی حل شده است.

۴.۱. داده‌های ورودی

براساس نظرهای کارشناسان و مدیران اداره‌ی سرطان وزارت بهداشت، درمان، و آموزش پزشکی ایران حدود ۳٪ جمعیت کل بیماران مبتلا به سرطان متعلق به کودکان است. تحلیل داده‌های ارائه‌شده در گزارش‌های سالیانه‌ی وزارتخانه‌ی مذکور در مورد بیماری سرطان در بازه‌ی زمانی ۱۳۸۴ الی ۱۳۹۵، مؤید این موضوع است که جمعیت کودکان مبتلا به ایران، حدود ۳٪ کل تعداد مبتلایان است. لذا در پژوهش حاضر با استفاده از پیش‌بینی‌های انجام‌شده‌ی حق‌شناس و همکاران (۲۰۲۴)،[۱۷] و درنظرگرفتن ضریب ۳٪، تعداد کودکان مبتلا به سرطان در هر استان از کشور ایران در سال ۱۴۰۸ پیش‌بینی شده است؛ که نتایج آن به همراه هزینه‌ی احداث بیمارستان به ازاء هر تخت در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین به‌دلیل طراحی خاص موردنیاز مراکز درمانی کودکان، هزینه‌ی ایجاد هر تخت تخصصی درمان سرطان کودکان به میزان ۲۰٪ بیشتر از هزینه‌ی احداث یک تخت درمان سرطان بزرگسالان در نوشتار حق‌شناس و همکاران (۲۰۲۴) فرض شده است. با توجه به سطح امکانات و هزینه‌های زیرساختی و منابع انسانی هر استان، عددی در بازه‌ی ۳۵۰۰۰۰ الی ۵۳۰۰۰۰ دلار به ازاء هر تخت در نظر گرفته شده است. همچنین میزان دی‌اکسیدکربن منتشرشده‌ی ناشی از هر کیلومتر سفر هر کودک مبتلا به سرطان و دو فرد همراه او برابر ۶۰۰ گرم یا ۰/۰۰۰۶ تن فرض شده است. فواصل میان مراکز استان‌ها نیز از سایت وزارت راه و شهرسازی ایران گرفته شده است. همچنین کمینه‌ی ظرفیت قابل‌قبول برای احداث بیمارستان سرطان کودکان و بیشینه‌ی

[18] Fuzzy Number Membership Function

جدول ۱. پیش‌بینی تعداد کودکان مبتلا به سرطان و هزینه‌ی ایجاد یک تخت در بیمارستان سرطان در سال ۱۴۰۸.

No.	Province	cj (USD)	d_i
1	Markazi	420,000	456
2	Ardabil	420,000	483
3	West Azerbaijan	420,000	1,341
4	Isfahan	530,000	2,242
5	Khuzestan	420,000	1,790
6	Ilam	350,000	235
7	North Khorasan	350,000	258
8	Bushehr	350,000	350
9	Hormozgan	350,000	473
10	South Khorasan	350,000	256
11	East Azerbaijan	530,000	1,763
12	Tehran	580,000	5,802
13	Lorestan	420,000	234
14	Gilan	420,000	837
15	Sistan and Baluchestan	350,000	595
16	Zanjan	420,000	186
17	Mazandaran	420,000	1,206
18	Semnan	350,000	223
19	Kurdistan	350,000	450
20	Chaharmahal and Bakhtiari	350,000	291
21	Fars	530,000	1,949
22	Qazvin	420,000	389
23	Qom	420,000	530
24	Kerman	420,000	1,251
25	Kermanshah	350,000	571
26	Golestan	350,000	777
27	Razavi Khorasan	530,000	2,547
28	Hamadan	420,000	486
29	Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad	350,000	279
30	Yazd	420,000	545
31	Alborz	530,000	841

تعداد تخت مازاد با هدف درنظرگرفتن بهره‌وری ظرفیت به ترتیب برابر ۵۰ و ۱۰ تخت فرض شده است. نسبت اشغال تخت در طول سال توسط هر کودک بیمار همانند نوشتارهای حق‌شناس و همکاران (۲۰۲۱، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴)،[۹، ۱۶، ۱۷] و کردی و نعمتی (۲۰۲۴)،[۱۸] برابر ۰/۰۲ و در واقع معادل حدود ۷ روز در طول سال فرض شده است. مقادیر ۰ و ۱ پارامتر a_{ij} نیز براساس قاعده‌ی امکان ارجاع بیماران یک استان به استان‌های همجوار تعیین شده است.

۴.۲. نتایج حل

در بخش کنونی، مدل‌های تک‌هدفه‌ی مربوط به هر یک از سه تابع هدف و همچنین مدل تک‌هدفه‌ی نهایی حاصل از تبدیل مدل سه‌هدفه به‌دلیل ابعاد نه چندان بزرگ مسئله و پیچیدگی پایین مدل با استفاده از حل‌کننده‌ی CPLEX، همانند نتایج حق‌شناس و همکاران (۲۰۲۱، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴)،[۹، ۱۶، ۱۷] و یک کامپیوتر با مشخصات Intel(R) Core(TM) i5-7400 CPU 8 GIG RAM @ 3.00GHz and حل و نتایج مرتبط ارائه شده‌اند. مقادیر بهینه‌ی به‌دست‌آمده از حل مدل‌های تک‌هدفه در جدول ۲ ارائه شده است.

با استفاده از روش درجه‌ی بهینگی و نتایج ارائه‌شده در جدول ۲، مدل تک‌هدفه‌ی نهایی ایجاد و با استفاده از حل‌کننده‌ی CPLEX در مدت زمان ۰/۱۵۵ ثانیه با ارائه‌ی مقدار ۰/۸۷۸ برای لاندا حل شده است. مقدار لاندا نشان می‌دهد که کمترین میزان بهینگی برای سه تابع هدف برابر ۰/۸۷۸ بوده است. مقادیر به‌دست‌آمده برای هر یک از توابع هدف از حل مدل سه‌هدفه در جدول ۳ ارائه شده است.

براساس جدول ۳، مقدار کل هزینه جهت ایجاد تخت موردنیاز کودکان مبتلا به سرطان در کشور در سال ۱۴۰۸ حدود ۲۳۷/۵ میلیون دلار خواهد بود. همچنین تعداد کل تخت‌های اضافی احداث‌شده حدود ۳ تخت است، که نشان از دستیابی به سطح بسیار بالایی از کارایی ظرفیتی در بیمارستان‌های ایجادشده دارد. علاوه‌بر این، براساس طرح ارائه‌شده برای مکان‌یابی- تخصیص بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان، حجم کل میزان گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از جابجایی کودکان مبتلا مابین استان‌های مختلف در سال ۱۴۰۸برابر با ۱۳۸۵/۴ تن خواهد بود. مقادیر تعداد تخت‌های جدید احداثی و همچنین میزان مازاد آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است، که نشانگر احداث مراکز تخصصی درمان سرطان کودکان در ۹ استان ایران است. لذا کودکان مبتلا به سرطان در مابقی

جدول ۳. نتایج حل مدل سه‌هدفه با روش درجه‌ی بهینگی.

Objective Function	Optimal Value
Z1	237,442,300
Z2	71.2
Z3	4.1385

جدول ۲. نتایج حل مدل‌های تک‌هدفه.

Objective Function	Optimization Direction	Optimal Value	Solution Time (seconds)
Z1	Max	293,851,000	162.0
	Min	229,594,600	5.0
Z2	Max	104.58	21.0
	Min	0	109.0
Z3	Max	4,140.51	152.0
	Min	1,514.76	369.0

جدول ۴.تعداد تخت های سرطان کودکان احداثی و مازاد.

Province	E	AN	Province	E	AN
Isfahan	70	0	Fars	50	0
East Azerbaijan	50	0	Kurdistan	56	0
Tehran	51	0	Kerman	50	0
Razavi Khorasan	58	0	Mazandaran	61	0
Khuzestan	50	71.2			

۲۲ استان، باید به یکی از ۹ استان مذکور ارجاع داده شوند. همچنین، براساس جدول ۴، بیشترین تعداد تخت‌های احداثی در استان اصفهان و یگانه مورد تخت‌های اضافی در استان خوزستان خواهد بود.

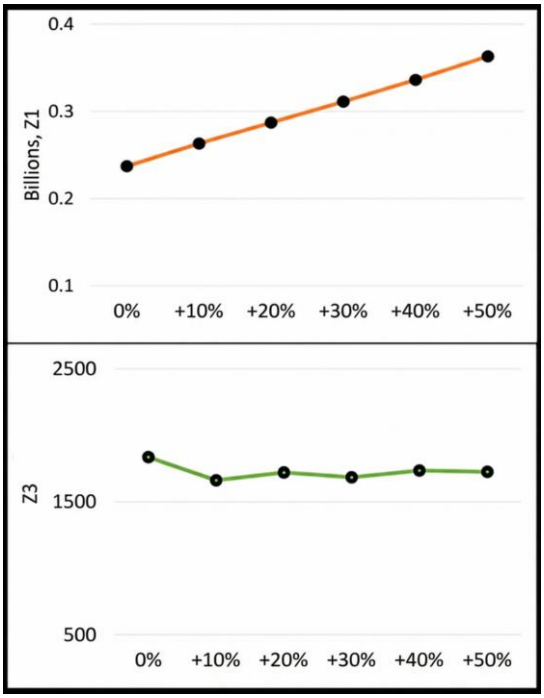
۴.۳. بررسی تأثیر درنظرگرفتن اثر ردپای کربن

یکی از جنبه‌های نوآورانه‌ی مدل ارائه‌شده، درنظرگرفتن اثر ردپای کربن به‌عنوان تابع هدف سوم در مدل ارائه‌شده است. لذا به‌منظور اعتبارسنجی تابع هدف مذکور، آن را از مدل سه‌هدفه حذف کرده و مدل دوهدفه‌ی حاصل حل شده است. نتایج حاصل برای Z_1، Z_2، و Z_3 به‌ترتیب عبارت از: ۲۲۹۵۹۴۶۰۰، صفر، و ۲۷۷۹/۵۹ بوده‌اند. بنابراین، حذف تابع سوم موجب تقریباً دو برابرشدن حجم گاز دی‌اکسیدکربن منتشرشده در اثر جابجایی تعداد بیشتری از کودکان مبتلا به سرطان و خانواده‌ی آن‌ها مابین استان‌ها و به‌طورغیرمستقیم کاهش سطح عدالت در برخورداری از تسهیلات درمانی تخصصی برای کودکان خواهد شد.

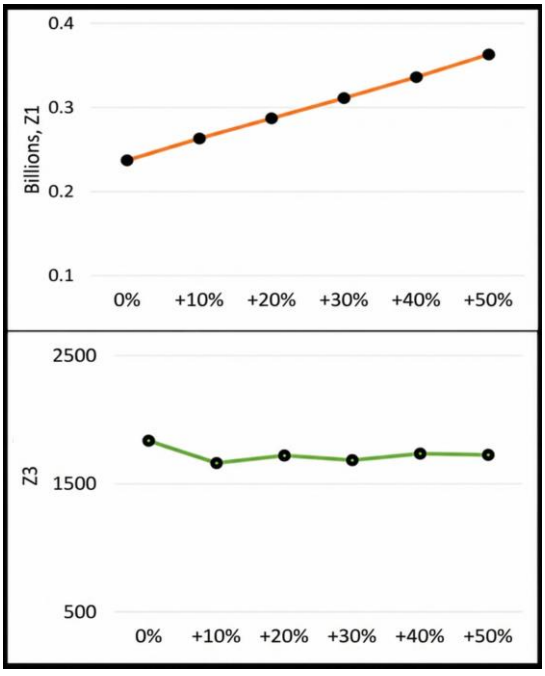
۴.۴. آنالیز حساسیت

از آنجا که مقادیر پارامترهای مدل برای چند سال بعد تخمین زده شده‌اند، عدم قطعیت در داده‌های ورودی اجتناب‌ناپذیر است. لذا تغییرات پارامترها بر روی توابع هدف در ۱۰ سناریوی: ۵۰٪+؛ ۴۰٪+؛ ۳۰٪+؛ ۲۰٪+؛ ۱۰٪+؛ ۱۰٪-؛ ۲۰٪-؛ ۳۰٪-؛ ۴۰٪-؛ و ۵۰٪- مطالعه شده است. شایان ذکر است که مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مخلوط ارائه‌شده در برخی از سناریوها، جواب امکان‌پذیر نداشته و لذا در انجام آنالیز حساسیت، فقط به سناریوهای ممکن توجه شده است. به‌طورکلی حساسیت تابع هدف دوم نسبت به تغییرپذیری پارامترها قابل توجه نبوده و لذا از ارائه‌ی آن در تحلیل‌های بخش حاضر صرف‌نظر شده است. شکل ۱ نشان می‌دهد که افزایش ضریب مصرف تخت‌های تخصصی توسط بیماران، موجب افزایش هزینه‌های احداث، ولی بالعکس موجب کاهش آثار ردپای کربن می‌شود؛ که دلیل آن، احداث مراکز تخصصی سرطان کودکان در استان‌های بیشتری است، که موجب کاهش تردد بیماران میان استان‌ها می‌شود. شکل ۲ نشان می‌دهد که افزایش تقاضا موجب افزایش هزینه‌های احداث و آثار ردپای کربن به‌طورهمزمان می‌شود. دلیل آن هم افزایش نیاز به احداث تخت‌های سرطان بیشتر و همچنین افزایش تردد بیماران میان استان‌هاست.

شکل ۳ نشان می‌دهد که کاهش کمینه‌ی ظرفیت قابل‌قبول احداثی موجب کاهش هزینه‌ی احداث و همچنین آثار ردپای کربن می‌شود؛ زیرا مراکز تخصصی درمان سرطان کودکان بیشتری در استان‌های دیگر که اتفاقاً هزینه‌ی احداث کمتری نیز دارند، ایجاد خواهد شد. این امر موجب کاهش تردد کودکان مبتلا به سرطان میان استان‌ها و در نتیجه، کاهش آثار ردپای کربن می‌شود. به‌عنوان مثال، در استان سیستان بلوچستان، که نیاز به ۲۵ تخت دارد، در حالت کمینه‌ی ظرفیت قابل قبول برابر ۵۰، بیمارستانی احداث نخواهد شد و بیماران خود را به استان کرمان ارسال خواهند کرد، که باعث افزایش مقدار دی‌اکسیدکربن می‌شود و همچنین هزینه‌ی احداث بیمارستان در کرمان نیز

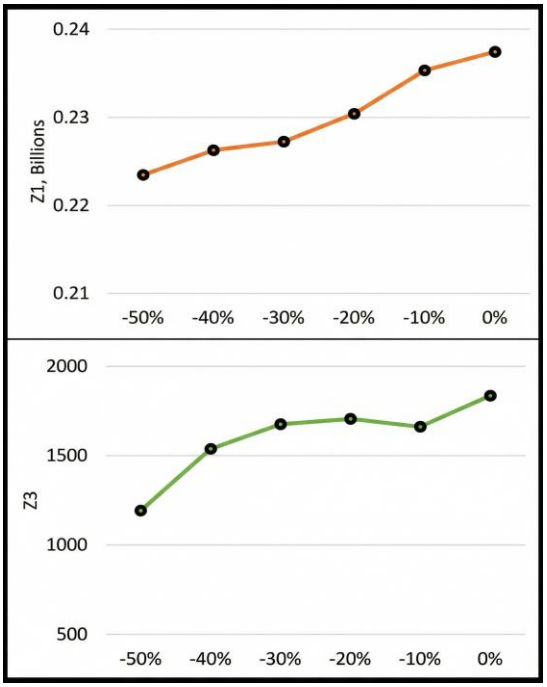


شکل ۱. تغییرپذیری توابع هدف بر حسب تغییرات β.



شکل ۲. تغییرپذیری توابع هدف بر حسب تغییرات d_i.

بیشتر از هزینه‌ی احداث بیمارستان در سیستان و بلوچستان است. اما با کاهش کمینه‌ی ظرفیت از ۵۰ به ۲۵، در خود سیستان و بلوچستان یک مرکز تخصصی با ۲۵ تخت ایجاد می‌شود، که علاوه‌بر کاهش هزینه‌ی احداث، کاهش آثار ردپای کربن را نیز در پی خواهد داشت.



شکل ۳. تغییرپذیری توابع هدف بر حسب تغییرات α_j.

۴.۵. توصیه های مدیریتی

در شکل‌های ۱ الی ۳ مشاهده می‌شود که شیب تغییرات تابع هدف سوم بسیار بیشتر از تابع هدف اول است. این بدان معناست که مدیران حوزه‌ی سلامت ایران می‌توانند با چشم‌پوشی از برخی ملاحظات، کارایی ظرفیت‌های ایجادشده و بودجه‌ی موردنیاز، آثار ردپای کربن را به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش دهند، که البته به معنی کاستن از تردد بیماران مابین استان‌ها و افزایش سطح عدالت درمانی از منظر برخورداری از مراکز تخصصی درمان سرطان کودکان است. به‌عنوان مثال، با درنظرگرفتن کمینه‌ی ظرفیت احداثی قابل‌قبول، کمتر می‌توان به این مهم دست یافت.

۵. نتیجه‌گیری‌ها، محدودیت‌ها، و پیشنهادها

در پژوهش حاضر، به مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصص تسهیلات سلامت تحت شرایط پایداری زیست‌محیطی توجه شده است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی سه‌هدفه‌ی عدد صحیح مخلوط، شامل کمینه‌سازی هزینه‌های احداث، ظرفیت‌های مازاد، و آثار ردپای کربن ارائه شده است، که همه‌ی جوانب پایداری، از جمله: اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی را در مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصص تسهیلات سلامت مد نظر قرار داده است. مدل جدید ارائه‌شده در مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان در مثال موردی کشور ایران حل شده و نتایج حل نشان داده است که تعداد استان‌های دارای بیمارستان تخصصی سرطان کودکان از یک استان در سال ۱۴۰۳ باید به ۹ استان در سال ۱۴۰۸ افزایش یابد. همچنین نتایج آنالیز حساسیت نشان داده است که می‌توان با کمی اغماض در مورد تعداد تخت‌های مازاد ایجادشده و احداث بیمارستان‌های تخصصی سرطان کودکان با ظرفیت حتی کمتر از ۵۰ تخت به مزیت‌های قابل‌توجهی به‌صورت کاهش هزینه‌ی احداث و کاهش آثار ردپای کربن و در نتیجه افزایش عدالت اجتماعی دست یافت. مدل ارائه‌شده توجهی به اولویت خانواده‌ی کودکان بیمار در انتخاب مقصد درمانی ندارد. لذا ارائه‌ی یک مدل ریاضی بیمارمحور برای مسئله‌ی مکان‌یابی- تخصیص بیمارستان‌های تخصصی درمان سرطان کودکان را می‌توان برای مطالعات آتی مرتبط پیشنهاد کرد. همچنین حوادثی، مانند: آتش‌سوزی، زلزله، و سیل ممکن است برای چند ماه یا سال، یکی از مراکز تخصصی درمان سرطان کودکان را از مدار ارائه‌ی خدمات خارج کند. لذا تاب‌آوری سیستم بیمارستان‌های تخصصی درمان سرطان کودکان در مقابل حوادث و بلایای مذکور را می‌توان به پژوهشگران علاقمند پیشنهاد کرد. همچنین مدل ارائه‌شده، شامل عدم قطعیت داده‌های پیش‌بینی‌شده برای آینده، مانند تعداد کودکان مبتلا به سرطان و هزینه‌های احداث نیست؛ که می‌توان با استفاده از یکی از رویکردهای مواجهه با عدم قطعیت، مانند: برنامه‌ریزی فازی، برنامه‌ریزی احتمالی، تحلیل سناریو، یا بهینه‌سازی استوار با آن مواجهه شد.

References - منابع

1. Shekarian, E., Ijadi, B., Zare, A. and Majava, J., 2022. Sustainable supply chain management: A comprehensive systematic review of industrial practices. *Sustainability*, *14*.13 (13), pp.7892. https://doi.org/10.3390/su14137892

2. Rabbani, M., Hosseini-Mokhallesun, S.A.A., Ordibazar, A.H. and Farrokhi-Asl, H., 2020. A hybrid robust possibilistic approach for a sustainable supply chain location-allocation network design. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, *7*.1 (1), pp.60-75. https://doi.org/10.1080/23302674.2018.1506061

3. Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J. and Seuring, S., 2014. Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, *233*.2 (2), pp.299-312. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032

4. Littlejohns, P., Kieslich, K., Weale, A., Tumilty, E., Richardson, G., Stokes, T., Gauld, R. and Scuffham, P., 2019. Creating sustainable health care systems: Agreeing social (societal) priorities through public participation. *Journal of Health Organization and Management*, *33*.1 (1), pp.18-34. https://doi.org/10.1108/JHOM-02-2018-0065

5. Mehra, R. and Sharma, M.K., 2021. Measures of sustainability in healthcare. *Sustainability Analytics and Modeling*, *1*.1 (1), pp.100001. https://doi.org/10.1016/j.samod.2021.100001

6. Wu, F., Chen, W., Lin, L., Ren, X. and Qu, Y., 2022. The balanced allocation of medical and health resources in urban areas of China from the perspective of sustainable development: A case study of Nanjing. *Sustainability*, *14*.11 (11), pp.6707. https://doi.org/10.3390/su14116707

7. Salami, A., Afshar-Nadjafi, B. and Amiri, M., 2023. A two-stage optimization approach for healthcare facility location-allocation problems with service delivering based on genetic algorithm. *International Journal of Public Health*, *68*, pp.1605015. https://doi.org/10.3389/ijph.2023.1605015

8. Alinaghian, M., Hejazi, S.R., Bajoul, N. and Sadeghi Velni, K., 2023. A novel robust model for location-allocation of healthcare facilities considering pre-disaster and post-disaster characteristics. *Scientia Iranica*, *30*.2 (2), pp.619-641. https://doi.org/10.24200/sci.2021.5743.1459

9. Haghshenas, M., Nemati, A. and Asadi-Gangraj, E., 2021. A bi-objective model for cancer hospitals' location and cancer patients' allocation in Iran. *International Journal of Hospital Research*, *10*.1 (1), pp.1-12.

10. Mendoza-Gómez, R. and Ríos-Mercado, R.Z., 2022. Location of primary health care centers for demand coverage of complementary services. *Computers & Industrial Engineering*, *169*, pp.108237. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108237

11. Karasakal, O., Karasakal, E. and Töreyen, Ö., 2023. A partial coverage hierarchical location-allocation model for health services. *European Journal of Industrial Engineering*, *17*.1 (1), pp.115-147. https://doi.org/10.1504/EJIE.2023.127742

12. Halawa, F., Madathil, S.C., Gittler, A. and Khasawneh, M.T., 2020. Advancing evidence-based healthcare facility design: A systematic literature review. *Health Care Management Science*, *23*.3 (3), pp.453-480. https://doi.org/10.1007/s10729-020-09506-4

13. Costa Filho, C.F.F., Rocha, D.A.R., Costa, M.G.F. and De Albuquerque Pereira, W.C., 2012. Using constraint satisfaction problem approach to solve human resource allocation problems in cooperative health services. *Expert Systems with Applications*, *39*.1 (1), pp.385-394. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.07.027

14. Comparably, n.d. Salary of cancer specialists [Online]. Available at: https://www.comparably.com/salaries/salaries-for-oncologist [Accessed].

15. FreshBooks, 2021. How much does it cost to build a hospital: Construction cost [Online]. Available at: https://www.freshbooks.com [Accessed].

16. Haghshenas, M., Nemati, A. and Asadi-Gangraj, E., 2023. Cancer-curing supply chain planning with regard to hospital bed-capacity efficiency: A plan for Iran in 2040. *International Journal of Services and Operations Management*, *45*.2 (2), pp.170-186. https://doi.org/10.1504/IJSOM.2023.131495

17. Haghshenas, M., Nemati, A. and Asadi-Gangraj, E., 2024. Using new fuzzy regression aptness and healthcare equity indices in cancer hospitals network design: A fuzzy multi-objective mathematical model. *OPSEARCH*, *61*.1 (1), pp.1-35. https://doi.org/10.1007/s12597-023-00723-3

18. Kordi, A. and Nemati, A., 2024. Simultaneous sensitivity analysis of mixed-integer location-allocation models using machine learning tools: Cancer hospitals' network design. *Operational Research*, *24*.1 (1), pp.22. https://doi.org/10.1007/s12351-024-00828-7

19. Gul, M. and Guneri, A.F., 2021. Hospital location selection: A systematic literature review on methodologies and applications. *Mathematical Problems in Engineering*, *2021*, pp.1-22. https://doi.org/10.1155/2021/6682958

20. Mestre, A.M., Oliveira, M.D. and Barbosa-Póvoa, A.P., 2015. Location–allocation approaches for hospital network planning under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, *240*.3 (3), pp.791-806. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.024

21. Beheshtifar, S. and Alimoahmmadi, A., 2015. A multi-objective optimization approach for location-allocation of clinics. *International Transactions in Operational Research*, *22*.2 (2), pp.313-328. https://doi.org/10.1111/itor.12088

22. Zarrinpoor, N., Fallahnezhad, M.S. and Pishvaee, M.S., 2017. Design of a reliable hierarchical location-allocation model under disruptions for health service networks: A two-stage robust approach. *Computers & Industrial Engineering*, *109*, pp.130-150. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.036

23. Maleki Rastaghi, M., Barzinpour, F. and Pishvaee, M., 2018. A multi-objective hierarchical location-allocation model for the healthcare network design considering a referral system. *International Journal of Engineering*, *31*.2 (2), pp.365-373. https://doi.org/10.5829/ije.2018.31.02b.22

24. Wang, L., Shi, H. and Gan, L., 2018. Healthcare facility location-allocation optimization for China's

developing cities utilizing a multi-objective decision support approach. *Sustainability*, *10*.12 (12), pp.4580. https://doi.org/10.3390/su10124580

25. De Melo Sathler, T., Almeida, J.F., Conceição, S.V., Pinto, L.R. and De Campos, F.C., 2019. Integration of facility location and equipment allocation in health care management. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, *16*.3 (3), pp.513-527. https://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.v16.n3.a13

26. Ouyang, R., Faiz, T.I. and Noor-E-Alam, M., 2020. Location-allocation models for healthcare facilities with long-term demand. *International Journal of Operational Research*, *38*.3 (3), pp.295-320. https://doi.org/10.1504/IJOR.2020.10028558

27. Kamali, A., Sajadi, S.M. and Jolai, F., 2020. Optimising emergency medical centres location with a response-time-decreasing approach using hybrid methods of optimisation and simulation. *International Journal of Services and Operations Management*, *36*.1 (1), pp.72-93. https://doi.org/10.1504/IJSOM.2020.10028456

28. Kaveh, M., Kaveh, M., Mesgari, M.S. and Paland, R.S., 2020. Multiple criteria decision-making for hospital location-allocation based on improved genetic algorithm. *Applied Geomatics*, *12*.3 (3), pp.291-306. https://doi.org/10.1007/s12518-020-00297-5

29. Mishra, S., Sahu, P.K., Sarkar, A.K., Mehran, B. and Sharma, S., 2019. Geo-spatial site suitability analysis for development of health care units in rural India: Effects on habitation accessibility, facility utilization and zonal equity in facility distribution. *Journal of Transport Geography*, *78*, pp.135-149. https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.05.017