Volume 41
Number 2
Semiannually
Winter
2026
2
ISSN 2676-4741

Industrial Engineering & Management

Sharif

ARTICLES:

- An Integrated Framework Using F-PIPRECIA and Z-WASPAS Methods to Evaluate the Barriers to the Implementation of Smart Logistics
  Ali Memarpour Ghiaci, Mohammadreza Zahedi and Morteza Abbasi
- A Multi-Objective Model for Environmentally Sustainable Healthcare Facility Location-Allocation: Child Cancer Hospitals Establishment in Iran in 2030
  Mohammad Fattahi and Arash Nemati
- An Integrated Problem of Handling Equipment Scheduling and Storage Space Allocation for Inbound Containers at Container Terminal
  Zahra Sadat Fani Sadrabadi and Mehdi Alinaghian
- Topic Modeling and Sentiment Analysis of Customers Using Natural Language Processing and Machine Learning Techniques
  Razieh Rahimi and Reza Ghasemy Yaghin
- Designing a Model for Sustainable Power Transmission Capacity Using Systems Dynamics Approach
  Mohammad Taghi Farahnak, Mohammad Ali Afshar Kazemi, Ali Mohaghar and Mohammad Ali Keramati
- Development of a Data-Driven Quality Management Model for Creative Industries
  Mohammadsaleh Soltani and Abdollah Aghaie
- Modeling and Solving Dynamic Maximal Covering Location Problem Considering Backup Services; Case Study of a Crisis Event in District 3 of Tehran
  Hanieh Sabiza, Jafar Bagherinejad and Roghayyeh Alizadeh
- Developing Machine Learning Algorithm for Energy Supply Optimization in Virtual Power Plants
  Bentolhoda Dehghani, Mohammad Mehdi Lotfi and Alireza Sedighi

RESEARCH NOTES:

- Analytical Based Simulation Modeling for Short-Term and Long-Term Planning in Open Pit Mining
  Milad Abolghasemian, Maryam Daneshmand-Mehr and Erfan Hasannayebi
- Economic and Environmental Optimization Model of the Amount of Waste Allocated to Different Methods of Urban Waste Disposal in Gilan Province
  Yasin Mazloom Kalimani and Seyed Hesamodin Zegordi
- Design of a Data-Driven Performance Evaluation System for Productivity Enhancement in Continuous Manufacturing Industries
  Mahboobeh Barvarzadeh and Hasan Khademi Zare
- Evaluation Model for the Establishment of Industries in the Hinterland of Ports with AHP and VIKOR (Case Study of Shahid Rajaee Port)
  Naser Shabakhty and Hassan Asadzadeh

Industrial Engineering & Management SHARIF
مهندسی صنایع و مدیریت شریف
۲
2

دوره‌ی ۴۱
شماره‌ی ۲
دو فصلنامه
زمستان
۱۴۰۴
۲

مهندسی صنایع و مدیریت

شریف

مقالات پژوهشی:

- ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه با استفاده از روش‌های F-PIPRECIA و Z-WASPAS جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند
  علی معمارپور غیاثی، محمدرضا زاهدی و مرتضی عباسی
- یک مدل چندهدفه برای مکان یابی- تخصیص پایدار زیست محیطی تسهیلات سلامت: احداث بیمارستان سرطان کودکان در ایران در سال ۱۴۰۸
  محمد فتاحی و آرش نعمتی
- مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی برای کانتینرهای ورودی در پایانه‌های کانتینری
  زهرا السادات فانی صدرآبادی و مهدی علینقیان
- مدل سازی موضوعی و تحلیل احساس‌های مشتریان با استفاده از روش های پردازش زبان طبیعی و یادگیری ماشین
  راضیه رحیمی و رضا قاسمی یقین
- طراحی مدلی جهت تأمین ظرفیت پایدار شبکه‌ی انتقال برق با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها
  محمدتقی فرحناک، محمدعلی افشار کاظمی، علی محقر و محمدعلی کرامتی
- توسعه‌ی یک مدل مدیریت کیفیت داده‌محور برای صنایع خلاق
  محمدصالح سلطانی و عبدالله آقایی
- مدل سازی و حل مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی پویا با درنظرگرفتن خدمت پشتیبان: مطالعه‌ی موردی رخداد بحران در منطقه‌ی سه تهران
  هانیه سابی‌زا، جعفر باقری‌نژاد و رقیه عالی‌زاده
- به کارگیری الگوریتم یادگیری ماشین برای بهینه سازی تأمین انرژی در نیروگاه های مجازی
  بنت‌الهدی دهقانی، محمدمهدی لطفی و علیرضا صدیقی

یادداشت فنی:

- مدل‌سازی تحلیلی مبتنی بر شبیه‌سازی برای برنامه ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در معدن روباز
  میلاد ابوالقاسمیان، مریم دانشمندمهر و عرفان حسن نایبی
- مدل بهینه‌سازی اقتصادی و زیست‌محیطی میزان زباله‌ی تخصیص‌یافته به روش‌های مختلف دفع پسماند شهری در استان گیلان
  یاسین مظلوم کلیمانی و سید حسام‌الدین ذگردی
- طراحی سیستم ارزیابی عملکرد مبتنی بر داده با هدف ارتقاء بهره‌وری در صنایع تولید پیوسته
  محبوبه باروورزاده و حسن خادمی زارع
- مدل ارزیابی استقرار صنایع در پس‌کرانه‌ی بنادر به کمک AHP و VIKOR(مطالعه‌ی موردی: پس‌کرانه‌ی بندر شهیدرجایی)
  ناصر شابختی و حسن اسدزاده

به نام خدا

مهندسی صنایع و مدیریت



دوره‌ی ۴۱

شماره‌ی ۲

زمستان

۱۴۰۴

صاحب امتیاز: دانشگاه صنعتی شریف

مدیر مسئول: دکتر علی‌اکبر صالحی

مدیر نشریه: دکتر رضا نقدآبادی

سردبیر: دکتر کوروش عشقی

سردبیر هیات تحریریه: دکتر سعید سهراب‌پور

کارشناس تخصصی و دبیر اجرایی: شیما آل اسداله

کارشناس تخصصی امور تولید و گرافیک: غزل احمدی میرقائد

ویراستار: رزیتا رستخیز پایدار

مجله‌ی مهندسی صنایع و مدیریت شریف در پایگاه های DOAJ، ISC و SID نمایه می شود.

نشانی: تهران/ صندوق پستی ۸۶۳۹–۱۱۱۵۵

دفتر مجله‌ی علمی شریف

تلفن: ۶۶۱۶۴۰۹۳–۶۶۰۰۵۴۱۹

نمابر: ۶۶۰۱۲۹۸۳

نشانی‌سایت: http:// journal.sharif.ir

رایانامه: pajouhesh@sharif.edu

نقل مندرجات این مجله با ذکر مأخذ آزاد است.

مجله در ویرایش مطالب آزاد است.

از انتشارات حوزه معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی شریف

هیأت تحریریه

دکتر سید تقی اخوان نیاکی

دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر امیر البدوی

دانشکده‌ی فنی، بخش مهندسی صنایع ـ دانشگاه تربیت مدرس

دکتر محمدرضا امین ناصری

دانشکده‌ی فنی، بخش مهندسی صنایع ـ دانشگاه تربیت مدرس

دکتر کامران پی‌نبر

انیستیتو تکنولوژی جورجیا

دکتر مجید توانا

دانشگاه لاسال

دکتر رضا توکلی مقدم

دانشکده‌ی فنی، گروه مهندسی صنایع ـ دانشگاه تهران

دکتر فریبرز جولای

دانشکده‌ی فنی، گروه مهندسی صنایع ـ دانشگاه تهران

دکتر سیدحسام‌الدین ذگردی

دانشکده‌ی فنی، بخش مهندسی صنایع ـ دانشگاه تربیت مدرس

دکتر هژیر رحمان داد

دانشگاه کمبریج

دکتر مهران سپهری

دانشکده‌ی مدیریت و اقتصاد، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر محمد سعیدی مهرآباد

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

دکتر محمود شفیعی

دانشکده‌ی مهندسی انرژی‌های نو، دانشگاه کرنفیلد

دکتر عادل علاءالدینی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه سن آنتنیو تگزاس

دکتر یحیی فتحی

دانشگاه ایالتی کارولینای شمالی

دکتر جواد فیض الهی

دانشگاه ایالتی جورجیا

دکتر هاشم محلوجی

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

دکتر آیدین ناصحی

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه بریستل

دکتر منوچهر نجمی

دانشکده‌ی مدیریت و اقتصاد، دانشگاه صنعتی شریف

هیأت مشاوران

دکتر کریم آتشگر

دانشکده‌ی مهندسی صنایع- دانشگاه صنعتی مالک اشتر

دکتر مرتضی ابراهیمی

دانشکدگان علوم و فناوری‌های میان رشته‌ای – دانشگاه تهران

دکتر آرمان احمدی زاد

دانشکده‌ی علوم انسانی و اجتماعی - دانشگاه کردستان

دکتر بهروز افشارنجفی

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و مکانیک- دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

دکتر مجید افشاری راد

دانشکده‌ی اقتصاد- دانشگاه خوارزمی

دکتر آیلین پاکزاد

دانشکده‌ی مهندسی صنایع - دانشگاه کوثر

دکتر فرشته پرورش

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم ها - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر حامد جعفری

دانشکده‌ی فنی و مهندسی گلپایگان- دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر احسان حاجی‌زاده

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم ها - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دکتر عرفان حسن نایبی

دانشکده‌ی مهندسی صنایع -دانشگاه صنعتی شریف

دکتر حسن خادمی زارع

گروه مهندسی صنایع - دانشگاه یزد

دکتر حسین خسروشاهی

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم ها - دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر مریم رادمان

دانشکده‌ی مهندسی صنایع- دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مریم رضاپورنیازی

دانشکده‌ی مهندسی صنایع- دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مهدی سیف برقی

دانشکده‌ی مهندسی صنایع-دانشگاه الزهرا

دکتر امیرعباس شجاعی

دانشکده‌ی مهندسی صنایع – دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

دکتر داوود شیشه‌بری

گروه مهندسی صنایع - دانشگاه یزد

دکتر احمد صادقیه

گروه مهندسی صنایع - دانشگاه یزد

دکتر محسن صفاریان

دانشکده‌ی مهندسی صنایع- دانشگاه صنعتی بیرجند

دکتر راشد صحرائیان

دانشکده‌ی مهندسی صنایع - دانشگاه شاهد

دکتر سروش صفرزاده

گروه مهندسی صنایع - دانشکده مهندسی - دانشگاه صنعتی قوچان

دکتر مسعود طالبیان

دانشکده‌ی مدیریت و اقتصاد - دانشگاه صنعتی شریف

دکتر مهرداد کارگری

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم ها - دانشگاه تربیت مدرس

دکتر محمدمهدی لطفی

گروه مهندسی صنایع- دانشگاه یزد

دکتر انور محمودی

دانشکده‌ی مهندسی- گروه مهندسی صنایع - دانشگاه کردستان

دکتر احد نظری

دانشکده‌ی معماری و شهرسازی – دانشگاه شهید بهشتی

مطالب این شماره

مقالات پژوهشی:

۳ **ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه با استفاده از روش‌های F-PIPRECIA و Z-WASPAS جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند**
علی معمارپور غیاثی، محمدرضا زاهدی و مرتضی عباسی

۱۹ **یک مدل چندهدفه برای مکان‌یابی- تخصیص پایدار زیست‌محیطی تسهیلات سلامت: احداث بیمارستان سرطان کودکان در ایران در سال ۱۴۰۸**
محمد فتاحی و آرش نعمتی

۳۱ **مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی برای کانتینرهای ورودی در پایانه‌های کانتینری**
زهرا السادات فانی صدرآبادی و مهدی علینقیان

۴۵ **مدل‌سازی موضوعی و تحلیل احساس‌های مشتریان با استفاده از روش‌های پردازش زبان طبیعی و یادگیری ماشین**
راضیه رحیمی و رضا قاسمی‌یقین

۶۳ **طراحی مدلی جهت تأمین ظرفیت پایدار شبکه‌ی انتقال برق با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها**
محمدتقی فرحناک، محمدعلی افشار کاظمی، علی محقر و محمدعلی کرامتی

۷۹ **توسعه‌ی یک مدل مدیریت کیفیت داده‌محور برای صنایع خلاق**
محمدصالح سلطانی و عبدالله آقایی

۹۳ **مدل سازی و حل مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی پویا با درنظرگرفتن خدمت پشتیبان: مطالعه‌ی موردی رخداد بحران در منطقه‌ی سه تهران**
هانیه سابی‌زا، جعفر باقری‌نژاد و رقیه عالی‌زاده

۱۱۱ **به‌کارگیری الگوریتم یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی تأمین انرژی در نیروگاه‌های مجازی**
بنت‌الهدی دهقانی، محمدمهدی لطفی و علیرضا صدیقی

یادداشت فنی:

۱۲۷ **مدل‌سازی تحلیلی مبتنی بر شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در معدن روباز**
میلاد ابوالقاسمیان، مریم دانشمندمهر و عرفان حسن نایبی

۱۴۱ **مدل بهینه‌سازی اقتصادی و زیست‌محیطی میزان زباله‌ی تخصیص‌یافته به روش‌های مختلف دفع پسماند شهری در استان گیلان**
یاسین مظلوم کلیمانی و سید حسام‌الدین ذگردی

۱۵۳ **طراحی سیستم ارزیابی عملکرد مبتنی بر داده با هدف ارتقاء بهره‌وری در صنایع تولید پیوسته**
محبوبه باورزاده و حسن خادمی زارع

۱۶۷ **مدل ارزیابی استقرار صنایع در پس‌کرانه‌ی بنادر به کمک AHP و VIKOR (مطالعه‌ی موردی: پس‌کرانه‌ی بندر شهیدرجایی)**
ناصر شابختی و حسن اسدزاده

ضمائم:

۱۸۰ **تعداد کل صفحات**

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 3-18

Sharif University of Technology

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



Research Article

An Integrated Framework Using F-PIPRECIA and Z-WASPAS Methods to Evaluate the Barriers to the Implementation of Smart Logistics

Ali Memarpour Ghiaci, Mohammadreza Zahedi and Morteza Abbasi *

Industrial Engineering Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran
* corresponding author: (mabbasi@mut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:2 May 2024

Revised:23 July 2025

Accepted:26 August 2025

Keywords:

Smart logistics,
industry 4.0,
multi-criteria decision-making,
PIPRECIA,
WASPAS.

Abstract

Logistics is one of the drivers of countries' and companies' aggressiveness and plays a vital role in economic growth. However, the current logistics industry is still high-cost and low-efficiency. The development of smart logistics brings opportunities to solve these problems. Despite many possibilities, the existence of some barriers limits the implementation of these systems. The purpose of this research is to evaluate the problem of the implementation of smart logistics. A failure mode and effect analysis (FMEA) method based on the fuzzy pivot pair-wise relative criteria importance assessment (F-PIPRECIA) and the weighted aggregated sum product assessment method based on Z number theory (Z-WASPAS) was developed in three phases. In the first phase of this smart technology, based on the literature, 16 smart logistics implementation barriers are identified using the FMEA method. In the second phase, using the fuzzy PIPRECIA method and experts' opinions, the weights of the factors are calculated. An adjusted PIPRECIA is proposed in the third phase and according to the outputs of the previous phases, the barriers are prioritized using the Z-WASPAS method. The FPIPRECIA-ZWASPAS approach was proposed to cover some disadvantages of the FMEA method, including the inability to consider the different significance of risk factors in an uncertain environment. In addition to assigning different weights to factors and considering uncertainty, reliability is also considered in experts' opinions through the theory of Z numbers. The proposed approach of this research was implemented in the evaluation of the barriers to smart logistics implementation in a factory active in the field of home appliances assembly located in the Aras Free Zone in Iran. Based on the results, this study has identified that "Lack of sufficient resources" has the highest priority among barriers. Also, "Lack of qualified staff" and "Administrative bureaucracy" are in the second and third priority, respectively. The results show the capability and efficiency of the proposed approach compared to other traditional methods such as FMEA and fuzzy WASPAS.

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:
Memarpour Ghiaci, A., Zahedi, M.R. and Abbasi, M. 2026. An integrated framework using f-piprecia and z-waspas methods to evaluate the barriers to the implementation of smart logistics, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.3-18. https://doi.org/10.24200/j65.2025.66418.2431

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

ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه با استفاده از روش‌های F-PIPRECIA و Z-WASPAS جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند

علی معمارپور غیاثی، محمدرضا زاهدی و مرتضی عباسی *

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مدیریت و مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (mabbasi@mut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۳

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۶/۰۴

واژگان کلیدی:

لجستیک هوشمند،

انقلاب صنعتی چهارم،

تصمیم‌گیری چندمعیاره،

PIPRECIA،

WASPAS.

چکیده

لجستیک، یکی از محرک‌های رقابت‌پذیری کشورها و شرکت‌هاست و نقشی حیاتی در رشد اقتصادی ایفا می‌کند. با این حال، صنعت لجستیک فعلی هنوز با هزینه‌های بالا و راندمان پایین مواجه است. توسعه‌ی لجستیک هوشمند، فرصت‌هایی را برای حل مشکلات ذکرشده به ارمغان می‌آورد. با وجود مزایای بسیار، وجود برخی موانع، اجرای سیستم‌های مذکور را محدود می‌کند. هدف پژوهش حاضر، ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند بوده و برای اولین بار جهت تجزیه‌وتحلیل موانع از رویکرد FMEA مبتنی بر PIPRECIA فازی و WASPAS توسعه‌یافته براساس تئوری اعداد Z استفاده شده است. رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر، در ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند در یک کارخانه‌ی فعال در زمینه‌ی مونتاژ لوازم خانگی واقع در منطقه‌ی آزاد ارس در کشور ایران پیاده‌سازی شده است. براساس نتایج، کمبود منابع مالی کافی و کمبود کارکنان واجد شرایط به‌عنوان موانع بحرانی شناسایی شده‌اند. نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی، نشانگر قابلیت و برتری آن در مقایسه با سایر روش‌های موجود در ادبیات بوده است.

۱. مقدمه

انتظار می‌رود ظهور چهارمین انقلاب صنعتی در چندین جنبه از صنعت تولید، عمیقاً تغییر ایجاد کند. فعالیت‌های لجستیک و زنجیره‌ی تأمین هم در سطح عملیاتی و هم در سطح مدیریتی تحت تأثیر تغییرات اخیر قرار می‌گیرند.[۱] لجستیک هوشمند مبتنی بر فناوری اطلاعات و ارتباطات پیشرفته‌ی مدرن است، که می‌تواند سیستم لجستیک یکپارچه‌ی مدرن را با پردازش بلادرنگ (real-time) و تجزیه‌وتحلیل جامع اطلاعات لجستیک به روشی هوشمندانه تحقق بخشد. لجستیک هوشمند می‌تواند دید سراسری را به ارمغان بیاورد، روش حمل‌ونقل لجستیک، انبارداری، فرآیند توزیع، توزیع، خدمات اطلاعاتی، و غیره را بهبود بخشد، و به صرفه‌جویی در زمان و هزینه کمک کند.[۲ و ۳] علاوه‌بر این، در کاهش آلودگی زیست‌محیطی ناشی از لجستیک تأثیرگذار باشد. با این حال، باید به بسیاری از مسائل چالش‌برانگیز و موانع در فرآیند پیاده‌سازی لجستیک هوشمند توجه شود.

روش FMEA[1]، یکی از روش‌های کاربردی جهت شناسایی و ارزیابی موانع و ریسک‌هاست؛ که رویکردی هدفمند بر پایه‌ی تیمی‌از خبرگان و پیشگیری قبل از وقوع است.[۴] در اغلب مطالعاتی که از روش FMEA استفاده شده است، شناسایی ریسک‌ها و موانع براساس شاخص سنتی RPN[2] انجام شده است. این در حالی است که شاخص RPN، کاستی‌هایی دارد. به‌عنوان مثال، به‌دلیل کنشی‌بودن و تیمی‌بودن روش FMEA، میزان عوامل تعیین‌کننده‌ی RPN را اغلب نمی‌توان به‌صورت قطعی در نظر گرفت.[۵ و ۶] بنابراین، جهت دستیابی به نتایج قابل‌اطمینان در برابر نظرهای خبرگان لازم است تا اولویت‌بندی گزینه‌ها با توجه به عدم‌قطعیت موجود در معیارها انجام شود.

هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی و اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند با ارائه‌ی یک رویکرد جدید جهت پوشش برخی از کاستی‌های روش FMEA سنتی است. رویکرد حاضر، برای اولین بار براساس روش توسعه‌یافته‌ی FMEA مبتنی بر روش F-PIPRECIA[3] جهت وزن‌دهی به معیارها و روش Z-WASPAS[4] جهت اولویت‌بندی موانع ارائه شده است. در رویکرد پیشنهادی پژوهش، با به‌کارگیری تئوری اعداد Z، سعی بر آن بوده است که عدم‌قطعیت و قابلیت اطمینان در عوامل تعیین‌کننده‌ی RPN در نظر گرفته شود. همچنین در رویکرد موردنظر، معیار زمان نیز

[1] Failure Mode and Effect Analysis
[2] Risk Priority Number
[3] Pivot Pairwise Relative Criteria Importance Assessment
[4] Weighted Aggregated Sum Product Assessment

استناد به این مقاله:

معمارپور غیاثی، علی، زاهدی، محمدرضا و عباسی، مرتضی، ۱۴۰۴. ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه با استفاده از روش‌های F-PIPRECIA و Z-WASPAS جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص. ۳-۱۸. https://doi.org/10.24200/j65.2025.66418.2431

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

جدول ۱. تعاریف منتخب از "لجستیک هوشمند".

Author(s)	Definition	Keywords
Song, Yu, Zhou, Yang, and He (2020),[2]	Smart logistics has three fundamental tasks: ensuring proper information flow to reduce costs and improve efficiency; implementing intelligent systems to automate processes; and deepening collaboration and integration across various dimensions.	Internet of Things (IoT), smart logistics, wireless communication
Lin and Yang (2018),[11]	It relates to a logistics distribution system. It is a combination of computers, intelligence using the Internet of Things (IoT), and information technology. To achieve high efficiency, it employs advanced technological management methods.	Computerization, artificial intelligence, new technologies, IoT
Zhang and Peng (2013),[12]	Smart logistics emphasizes technological changes. Its focus is on using systems such as big data, IoT, sensors, and other technologies to improve logistics and distribution services and reduce their costs.	Technological changes, Big Data, Internet of Things
Zhang, Liu, Liu, Yang, Li, Huisingh, and Wang (2018),[13]	Smart logistics covers the entire process of moving goods—including transportation, storage, distribution, packaging, loading and unloading, and information processing. With real-time monitoring, it enhances logistics resource-management efficiency.	The entire process of goods transfer, management efficiency
Zhao (2005),[14]	Smart logistics is defined by intelligence, integration, and flexibility.	Process integration, artificial intelligence
McFarlane, Giannikas, and Lu (2016),[15]	Smart logistics means planning and controlling processes using intelligent tools and methods.	Process control and planning using intelligent methods, Automation

به‌عنوان یک شاخص مهم مدیریتی در کنار معیارهای شدت، وقوع، و احتمال کشف در روش FMEA در نظر گرفته شده است. این تذکر لازم است که اولویت‌بندی موانع براساس امتیاز حاصل از رویکرد پیشنهادی به‌صورتی است که مانع با امتیاز بالاتر، در اولویت اول رسیدگی قرار خواهد گرفت. جهت ارزیابی قابلیت رویکرد پیشنهادی، اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند توسط شاخص حاصل از رویکرد ترکیبی FPIPRECIA-ZWASPAS صورت گرفته و نتایج آن در مقایسه با برخی از روش‌های سنتی ارائه شده است. مهم‌ترین سؤال‌هایی که پژوهش حاضر سعی در ارائه‌ی پاسخ به آن‌ها دارد، عبارت‌اند از:

- مهم‌ترین موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند کدام‌اند؟
- درجه‌ی اهمیت معیارهای ارزیابی موانع در مسئله‌ی ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند چگونه است؟
- اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند چگونه انجام می‌شود و موانع بحرانی کدام‌اند؟

۲. ادبیات پیشین

۱.۲. لجستیک هوشمند

از زمانی که "لجستیک هوشمند" پیشنهاد شده است، هیچ اتفاق‌نظری در مورد مفهوم آن در میان پژوهشگران وجود ندارد. فلیش[1] و همکاران (۲۰۰۵)،[۷] در ابتدا مفهوم محصول‌های هوشمند و خدمات هوشمند را پیشنهاد کرده‌اند، به این معنی که انسان‌ها می‌توانند برخی از فعالیت‌های کنترلی خود را به محصول‌های هوشمند و خدمات هوشمند محول کنند. لجستیک هوشمند توسط اوکلمن[2] (۲۰۰۸)،[۸] براساس مفهوم محصول‌های هوشمند و خدمات هوشمند تعریف شده است. بارتو[3] و همکاران (۲۰۱۷)،[۹] لجستیک هوشمند را به‌عنوان یک سیستم لجستیکی تعریف کرد، که می‌تواند انعطاف‌پذیری را افزایش دهد و شرکت را به نیازهای مشتری نزدیک‌تر کند. کولیتی[4] (۱۹۷۲)،[۱۰] درک لجستیک به‌عنوان برنامه‌ریزی، کنترل، تحقق، و نظارت یکپارچه را بر تمام جریان‌های داخلی و شبکه‌ی گسترده، مواد، قطعات، و محصول در امتداد زنجیره‌ی ارزش افزوده‌ی کامل ارائه کرده است. برخی از تعاریف منتخب مربوط به لجستیک هوشمند در جدول ۱ ارائه شده است.

۲.۲. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و FMEA

به‌عنوان یک حوزه‌ی شناخته‌شده از مطالعات، روش‌های MCDM به‌طورگسترده توسط پژوهشگران برای بهبود عملکرد FMEA استفاده و به‌عنوان ابزاری ارزشمند در بهبود کاستی‌های مربوط به روش RPN مرسوم در نظر گرفته شده‌اند.[۵ و ۱۶] سامریت و کراتیب‌هوبردی[5] (۲۰۲۵)،[۱۷] جهت توسعه‌ی روش FMEA، از روش ترکیبی AHP و LOPCOW جهت وزن‌دهی به معیارها و روش ARAS برای اولویت‌بندی چالش‌های مدیریت پسماند پلاستیکی و نیز جهت مدیریت عدم‌قطعیت از مجموعه‌های فازی ذوزنقه‌ای استفاده کرده‌اند. فوکی[6] و همکاران (۲۰۲۵)،[۱۸] جهت ارزیابی ریسک‌های طراحی ابزار جراحی، از روش توسعه‌یافته‌ی FMEA مبتنی بر روش‌های GRA و EDAS استفاده کرده‌اند. کوماری[7] و همکاران (۲۰۲۵)،[۱۹] جهت ارزیابی حالت‌های خرابی تصفیه‌خانه، از روش ترکیب روش FMEA با روش‌های AHP و VIKOR فازی استفاده کرده‌اند. دیپک[8] و

[1] Fleisch
[2] Uckelmann
[3] Barreto
[4] Cullity
[5] Sumrit & Keeratibhubordee
[6] Phokee
[7] Kumari
[8] Deepak

جدول ۲. برخی از رویکردهای جایگزین و ترکیب‌شده با روش FMEA برای اولویت‌بندی موانع و ریسک‌ها بر اساس روش‌های MCDM.

Author(s)	Methods	Case Study	Attributes	
			Uncertainty	Reliability
Sumrit & Keeratibhubordee (2025),[17]	AHP, LOPCOW, ARAS Fuzzy	Plastic-recycling industry	✓	×
Phokee, et al (2025),[18]	GRA, EDAS	Surgical instrument design	×	×
Kumari, et al (2025),[19]	Fuzzy AHP, Fuzzy VIKOR	Water treatment plant	✓	×
Deepak, et al (2025),[20]	VIKOR, PROMETHEE, Modified TOPSIS	Pump maintenance in the construction sector	×	×
Rashidian, et al (2024),[21]	DANP, CoCoSo	Cement-transport network	×	×
Altubaishe & Desai (2023),[22]	AHP, PROMETHEE	Supplier evaluation	×	×
Jin, et al (2022),[23]	Fuzzy AHP	Logistics system	✓	×
Oturakçı & Konyalıoğlu (2022),[24]	AHP, Fuzzy TOPSIS	Occupational health & safety	✓	×
Bathrinath, et al (2022),[25]	AHP, Fuzzy WASPAS	Construction site	✓	×
Pourmehdi, et al (2021),[26]	ANP, Fuzzy TOPSIS	Steel industry	✓	×
Alvand, et al (2021) ,[27]	SWARA, Fuzzy WASPAS	Construction project	✓	×
Proposed approach	Fuzzy PIPRECIA, Z-WASPAS	Home-appliances industry	✓	✓

همکاران (۲۰۲۵)،[۲۰] پس از شناسایی علل خرابی پمپ در صنعت ساخت‌وساز، از روش‌های VIKOR، PROMETHEE، و تاپسیس اصلاح‌شده برای رتبه‌بندی راهبردهای‌های مقابله با علل خرابی پمپ‌ها و نگهداری آن‌ها استفاده کرده‌اند. رشیدیان و همکاران (۲۰۲۴)،[۲۱] از روش‌های DANP و CoCoCo جهت ارزیابی اختلال‌های شبکه‌ی حمل‌ونقل سیمان در ایران استفاده کرده‌اند. آلتوبایشه و دیسای[9] (۲۰۲۳)،[۲۲] به‌منظور ارزیابی تأمین‌کنندگان و انتخاب تأمین‌کنندگان کلیدی، از رویکرد ترکیبی AHP و PROMETHEE جهت غلبه بر کاستی‌های روش FMEA استفاده کرده‌اند. جین[10] و همکاران (۲۰۲۲)،[۲۳] از روش AHP فازی براساس روش FMEA برای تجزیه‌وتحلیل حالت‌های شکست سیستم لجستیک در همه‌گیری COVID-۱۹ استفاده و ۱۲ حالت خرابی را شناسایی کرده‌اند. همچنین، ایشان اقدام‌های پیشگیرانه و اصلاحی مرتبط جهت کاهش تأثیر خرابی‌ها را توصیه کرده‌اند. اتوراکی و کنیالیغلو[11] (۲۰۲۲)،[۲۴] از رویکرد یکپارچه‌ی FAHP-TOPSIS جهت ارزیابی خطرهایی که ممکن است در تأسیسات تولیدی یک شرکت به‌وجود آید، استفاده کرده‌اند. باترینات[12] و همکاران (۲۰۲۲)،[۲۵] با استفاده از روش AHP فازی، مشکلات عمده‌ی محیط و منطقه‌ی کار را در محل ساخت‌وساز شناسایی و با استفاده از روش WASPAS اولویت‌بندی کرده‌اند. پورمهدی و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۶] از روش‌های ANP فازی و TOPSIS جهت ارزیابی حالت‌های شکست در یک شرکت تولیدکننده‌ی فولاد در شمال ایران استفاده کرده و به‌منظور شناسایی و ارزیابی ریسک‌های تأثیرگذار در پروژه‌های ساختمانی و پوشش برخی کاستی‌های روش FMEA، یک مدل یکپارچه‌ی مبتنی بر روش‌های FMEA، SWARA، و WASPAS در محیط فازی پیشنهاد داده‌اند.[۲۷] برخی از رویکردهای جایگزین و ترکیب‌شده با روش FMEA برای اولویت‌بندی موانع و ریسک‌ها براساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی موجود در ادبیات، در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

۳.۲. شکاف تحقیقاتی

در بخش اول مرور ادبیات، برخی از نوشتارهای مرتبط با لجستیک هوشمند و در بخش دوم، توسعه‌ی روش FMEA براساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره بررسی شده‌اند. اگرچه نوشتارهایی در حوزه‌ی لجستیک هوشمند منتشر شده است، اما تعداد کمی‌از آن‌ها بر روی بررسی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند متمرکز شده‌اند. لذا، فقدان پژوهش برای ارائه‌ی راهکارهایی جهت شناسایی و اولویت‌بندی موانع مذکور احساس می‌شود. همچنین، با بررسی نوشتارهای موجود مبتنی بر روش FMEA، کمبود روش توسعه‌یافته‌ی FMEA مبتنی بر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، که علاوه‌بر عدم‌قطعیت، قابلیت اطمینان را نیز بررسی کند، احساس می‌شود. در نتیجه، مطالعه‌ی حاضر برای اولین بار به ارائه‌ی یک رویکرد توسعه‌یافته‌ی FMEA براساس روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی PIPRECIA فازی و Z-WASPAS جهت شناسایی و اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند پرداخته است. روش PIPRECIA توسط استانیوکیچ[13] و همکاران (۲۰۱۷)،[۲۸] به‌عنوان توسعه‌ی روش SWARA، که توسط کرشولین[14] و همکاران (۲۰۱۰)،[۲۹] ارائه شده بود، پیشنهاد شده است. اگرچه روش SWARA این مزیت را دارد که مقایسه‌های کمتری نسبت به روش AHP ارائه می‌کند، اما در مدیریت مسائل واقعی در تصمیم‌گیری‌های گروهی، نقاط ضعفی دارد. علاوه‌بر این، روش SWARA ممکن است تصمیم‌گیرندگان را در ارزیابی‌هایشان محدود کند، زیرا نیازمند مرتب‌سازی معیارها با درنظرگرفتن اهمیت موردانتظار آن‌هاست.[۳۰] روش PIPRECIA با حذف

[9] Altubaishe & Desai
[10] Jin
[11] Oturakçı & Konyalıoğlu
[12] Bathrinath
[13] Stanujkic
[14] Keršuliene

معایب ذکرشده در ادبیات موضوع معرفی شده است. براساس روش PIPRECIA، نیازی به رتبه‌بندی قبلی معیارها براساس درجه‌ی اهمیت موردانتظار نیست؛ در عوض، اجازه می‌دهد که اهمیت نسبی کمتر از، برابر با، یا بیشتر از اهمیت معیار قبلی باشد.[۳۱] در ادامه، روش مذکور با اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی (WSM)[۱۵] و مدل ضرب وزنی (WPM)[۱۶]، کارایی و اثربخشی بالایی در فرآیند تصمیم‌گیری دارد؛[۳۲] و مزایای اصلی آن شامل سادگی محاسباتی، سازگاری نتایج، و مقاومت قوی در برابر معکوس‌شدن رتبه‌ی گزینه‌هاست.[۳۳] در رویکرد پیشنهادی پژوهش، با به‌کارگیری تئوری اعداد Z، سعی بر آن است عدم‌قطعیت و قابلیت اطمینان در عوامل تعیین‌کننده‌ی RPN در نظر گرفته شود. برخی از نوآوری‌های مطالعه‌ی حاضر عبارت‌اند از:

- ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه‌ی F-PIPRECIA-Z-WASPAS براساس رویکرد FMEA؛
- درنظرگرفتن زمان به‌عنوان یک شاخص مهم مدیریتی در کنار معیارهای روش FMEA (شدت، وقوع، و احتمال کشف)؛
- استفاده از رویکرد PIPRECIA فازی جهت ارزیابی وزن معیارها براساس روش FMEA؛
- پیاده‌سازی رویکرد توسعه‌یافته در یک مطالعه‌ی موردی واقعی جهت نشان‌دادن کارایی و قابلیت مدل؛
- مقایسه‌ی رویکرد پیشنهادی با برخی رویکردهای موجود در ادبیات، جهت اعتبارسنجی مدل.

۳. مواد و روش‌ها

۳. ۱. تئوری مجموعه‌های فازی

اولین بار مفهوم مجموعه‌های فازی توسط لطفی (۱۹۶۵)،[۳۴] معرفی شده است. یک مجموعه‌ی فازی به‌صورت یک تابع عضویت تعریف می‌شود، که عناصر را به درجه‌ی عضویت در یک بازه‌ی معین، که معمولاً به‌صورت بازه‌ی[۰، ۱] است، نشان می‌دهد. در ادامه، تعاریف پایه‌ای برای مجموعه‌ی اعداد فازی استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر ارائه شده است.

تعریف ۱: یک مجموعه‌ی فازی A که در مرجع X تعریف شده است، به‌صورت رابطه‌ی ۱ نمایش داده می‌شود.

$$A=\{(x,\mu_A)\mid x\in X\} \qquad (1)$$

در اینجا، $\mu_A(x): X\to[0,1]$ تابع عضویت از مجموعه‌ی A است. مقدار عضویت $\mu_A(x)$ درجه‌ی وابستگی $x\in X$ را در A نشان می‌دهد.

تعریف ۲: عدد فازی مثلثی $\tilde{A}$ به‌صورت سه‌تایی (l,m,u) تعریف می‌شود و تابع عضویت مطابق رابطه‌ی ۲ است.

$$\mu_A(x)=\begin{cases}0 & x\in(-\infty,l)\\ \dfrac{x-1}{m-1} & x\in[l,m]\\ \dfrac{u-x}{u-m} & x\in[m,u]\\ 0 & x\in(u,\infty)\end{cases} \qquad (2)$$

تعریف ۳: فرض کنید $\tilde{A}=(l_1,m_1,u_1)$ و $\tilde{B}=(l_2,m_2,u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند و γ عددی ثابت و بزرگ‌تر از صفر است؛ در این حالت، اعمال حسابی روی آن‌ها، مطابق با رابطه‌های ۳ الی ۷ انجام می‌شود.

$$\tilde{A}\oplus\tilde{B}=(l_1+l_2,m_1+m_2,u_1+u_2) \qquad (3)$$

$$\tilde{A}\otimes\tilde{B}=(l_1l_2,m_1m_2,u_1u_2) \qquad (4)$$

$$\tilde{A}-\tilde{B}=(l_1-u_2,m_1-m_2,u_1-l_2) \qquad (5)$$

$$\tilde{A}/\tilde{B}=(l_1/u_2,m_1/m_2,u_1/l_2) \qquad (6)$$

$$\gamma\tilde{A}=\gamma(l_1,m_1,u_1)=(\gamma l_1,\gamma m_1,\gamma u_1) \qquad (7)$$

تعریف ۴: فرض کنید $\tilde{A}=(l_1,m_1,u_1)$ و $\tilde{B}=(l_2,m_2,u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند، فاصله‌ی بین $\tilde{A}$ و $\tilde{B}$ به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف می‌شود.

$$d(A,B)=\sqrt{1/3((l_1-l_2)^2+(m_1-m_2)^2+(u_1-u_2)^2} \qquad (8)$$

تعریف ۵: اگر $S=\{\tilde{X}_1,\dots,\tilde{X}_n\}$ مجموعه‌ای از n عدد فازی مثلثی را نشان دهد، که در آن $\tilde{X}_i=(l_i,m_i,u_i)$ و $i=1,\dots,n$. اگر $\tilde{\tilde{X}}=(\bar{l},\bar{m},\bar{u})$ میانگین n عدد فازی مثلثی باشد، تابع عضویت رابطه ترجیح نسبی $\mu(\tilde{X}_i,\tilde{\tilde{X}})$ درجه‌ی ترجیح $\tilde{X}_i$ بر $\tilde{\tilde{X}}$ در S را نشان می‌دهد و با استفاده از رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود. همچنین، اگر $\mu(\tilde{X}_i,\tilde{\tilde{X}})>\mu(\tilde{X}_j,\tilde{\tilde{X}})$، آنگاه $\tilde{X}_i>\tilde{X}_j$.[۳۵]

$$\mu(X_i,\overline{X})=\frac{1}{2}\left(\frac{(l_i-\bar{u})+2(m_i-\bar{m})+(u_i-\bar{l})}{2\,\|T\|}+1\right) \qquad (9)$$

که در آن؛

$$\|T\|=\begin{cases}\dfrac{(t_l^+-t_u^-)+2(t_m^+-t_m^-)+(t_u^+-t_l^-)}{2} & if\ \ t_l^+\geq t_u^-\\ \dfrac{(t_l^+-t_u^-)+2(t_m^+-t_m^-)+(t_u^+-t_l^-)}{2}+(t_u^--t_l^+) & if\ \ t_l^+<t_u^-\end{cases}$$

$$t_l^+=\max_i\{l_i\},t_m^+=\max_i\{m_i\},t_u^+=\max_i\{u_i\},t_l^-=\min_i\{l_i\},t_m^-=\min_i\{m_i\},t_u^-=\min_i\{u_i\}$$

۳. ۲. تئوری اعداد Z

اولین بار مفهوم اعداد Z توسط زاده (۲۰۱۱)،[۳۶] به‌عنوان یک نسخه‌ی عمومی از نظریه‌ی عدم‌قطعیت پیشنهاد شده است، که برای محاسبه‌ی اعدادی که قابل‌اعتماد نیستند، در نظر گرفته شده است. اعداد Z به‌صورت یک جفت عدد فازی به‌صورت Z=(A,B) هستند، که مؤلفه‌ی اول A، یک زیرمجموعه‌ی فازی از دامنه‌ی X و مؤلفه‌ی دوم B، یک زیرمجموعه‌ی فازی از بازه‌ی واحد و نشانگر قابلیت اطمینان مؤلفه‌ی A است (مطابق رابطه‌ی ۱۰).

$$\text{Prob}\,(X\ \text{is}\ A)\ \text{is}\ B \qquad (10)$$

این محدودیت عمومی به‌عنوان یک محدودیت احتمالی شناخته می‌شود، که بیانگر یک تابع توزیع احتمالی $R(x)$ است. به‌طورخاص می‌توان آن را به شرح رابطه‌ی ۱۱ عنوان کرد.

$$R(x):X\ \text{is}\ A\to\text{poss}\,(X=u)=\mu_A(u) \qquad (11)$$

[15] Weighted Sum Model

[16] Weighted Product Model

جدول ۳. ارزیابی معیارها براساس مقیاس ۱-۲.

Linguistic scale			Fuzzy number			
			l	m	u	DFV
Almost equal value	Scale 1-2	1	1.000	1.000	1.050	1.008
Slightly more significant		2	1.100	1.150	1.200	1.150
Moderately more significant		3	1.200	1.300	1.350	1.292
More significant		4	1.300	1.450	1.500	1.433
Much more significant		5	1.400	1.600	1.650	1.575
Dominantly more significant		6	1.500	1.750	1.800	1.717
Absolutely more significant		7	1.600	1.900	1.950	1.858

جدول ۴. ارزیابی معیارها براساس مقیاس ۰-۱.

	Fuzzy number				Linguistic scale
	l	m	u	DFV	
Scale 0-1	0.667	1.000	1.000	0.944	Weakly less significant
	0.500	0.667	1.000	0.694	Moderately less significant
	0.400	0.500	0.667	0.511	Less significant
	0.333	0.400	0.500	0.406	Really less significant
	0.286	0.333	0.400	0.337	Much less significant
	0.250	0.286	0.333	0.288	Dominantly less significant
	0.222	0.250	0.286	0.251	Absolutely less significant

که در آن، μ_A یک تابع عضویت از A و u یک مقدار کلی از X هستند. μ_A می‌تواند به‌عنوان یک محدودیت مرتبط با $R(x)$ در نظر گرفته شود؛ بدین معنا که $\mu_A(u)$ چه درجه‌ای از رضایتمندی u را پوشش می‌دهد. بنابراین، X یک متغیر تصادفی با توضیع احتمالی $R(x)$ است، که نقش یک محدودیت احتمالی بر روی X دارد. محدودیت احتمالی و تابع چگالی احتمال X به شرح روابط ۱۲ و ۱۳ هستند:

$$R(x): X \text{ is } p \tag{12}$$

$$R(x): X \text{ is } p \rightarrow (u \le X \le u+du) = p(u)du \tag{13}$$

که در معادله‌ی ۱۲، du نشانگر مشتق جزئی u است.

۳.۳. روش Fuzzy PIPRECIA

روش PIPRECIA برای اولین بار توسط استانیوکیچ و همکاران (۲۰۱۷)،[۲۸] ارائه شده است. در ادامه، گام‌های مربوط به روش توسعه‌یافته‌ی PIPRECIA در محیط فازی ارائه شده‌اند.

گام ۱) تشکیل مجموعه‌ی معیارها جهت ارزیابی و تشکیل یک تیم تصمیم‌گیری.

گام ۲) برای تعیین اهمیت نسبی معیارها، هر تصمیم‌گیرنده به‌طورجداگانه، معیارهای از پیش مرتب‌شده را با شروع از معیار دوم ارزیابی می‌کند (مانند رابطه‌ی ۱۴).

$$\overline{s_J^r} = \begin{cases} > \overline{1} & if \quad C_j > C_{j-1} \\ = \overline{1} & if \quad C_j = C_{j-1} \\ < \overline{1} & if \quad C_j < C_{j-1} \end{cases} \tag{14}$$

که در آن، $\overline{s_j^r}$ نشان‌دهنده‌ی ارزیابی انجام‌شده توسط تصمیم‌گیرنده‌ی r است.

برای به‌دست‌آوردن یک ماتریس $\overline{s_j}$، لازم است میانگین‌گیری انجام شود. ماتریس $\overline{s_j^r}$ با استفاده از میانگین هندسی به یک ماتریس تبدیل می‌شود. تصمیم‌گیرندگان با اعمال مقیاس‌های تعریف‌شده در جدول‌های ۳ و ۴ معیارها را ارزیابی می‌کنند.

گام ۳) تعیین ضریب $\overline{k_j}$ (مطابق رابطه‌ی ۱۵).

$$\overline{k_J} = \begin{cases} = \overline{1} & if \quad j = 1 \\ 2 - \overline{s_J} & if \quad j > 1 \end{cases} \tag{15}$$

گام ۴) تعیین وزن فازی (مطابق رابطه‌ی ۱۶).

$$\overline{q_J} = \begin{cases} = \overline{1} & if \quad j = 1 \\ \dfrac{\overline{q_{J-1}}}{\overline{k_J}} & if \quad j > 1 \end{cases} \tag{16}$$

گام ۵) تعیین وزن نسبی معیار (مطابق رابطه‌ی ۱۷).

$$\overline{w_J} = \frac{\overline{q_J}}{\sum_{j=1}^{n} \overline{q_J}} \tag{17}$$

در این مراحل، معکوس روش PIPRECIA فازی پیاده‌سازی می‌شود:

گام ۶) برای تعیین اهمیت نسبی معیارها، هر تصمیم‌گیرنده به‌طورجداگانه معیارهای از پیش مرتب‌شده را با شروع از معیار ماقبل آخر ارزیابی می‌کند؛ و مجدداً، ماتریس $\overline{s_j^r}'$ با استفاده از میانگین هندسی (مطابق رابطه‌ی ۱۸) به‌دست می‌آید.

$$\overline{s_J^r}' = \begin{cases} > \overline{1} & if \quad C_j > C_{j+1} \\ = \overline{1} & if \quad C_j = C_{j+1} \\ < \overline{1} & if \quad C_j < C_{j+1} \end{cases} \tag{18}$$

جدول ۵. تبدیل متغیرهای زبانی مربوط به اعداد Z به اعداد فازی مثلثی.

Linguistic term	Fuzzy number			Linguistic term	Fuzzy number		
	l	m	u		l	m	u
VH,VH	8.54	9.49	9.49	VH,H	7.53	8.37	8.37
VH,M	6.36	7.07	7.07	VH,L	4.93	5.48	5.48
VH,VL	2.85	3.16	3.16	H,VH	6.64	8.54	9.49
H,H	5.86	7.53	8.37	H,M	4.95	6.36	7.07
H,L	3.84	4.93	5.48	H,VL	2.21	2.85	3.16
MH,VH	4.74	6.64	8.54	MH,H	4.18	5.86	7.53
MH,M	3.54	4.95	6.36	MH,L	2.74	3.84	4.93
MH,VL	1.58	2.21	2.85	M,VH	2.85	4.74	6.64
M,H	2.51	4.28	5.86	M,M	2.12	3.54	4.95
M,L	1.64	2.74	3.83	M,VL	0.95	1.58	2.21
ML,VH	0.95	2.85	4.74	ML,H	0.84	2.51	4.18
ML,M	0.71	2.12	3.54	ML,L	0.55	1.64	2.74
ML,VL	0.32	0.95	1.58	L,VH	0	0.95	2.85
L,H	0	0.84	2.51	L,M	0	0.71	2.12
L,L	0	0.55	1.64	L,VL	0	0.32	0.95
VL,VH	0	0	0.95	VL,H	0	0	0.84
VL,M	0	0	0.71	VL,L	0	0	0.55
VL,VL	0	0	0.32				

گام ۷) تعیین ضریب $\overline{k_J}'$ (مطابق رابطه‌ی ۱۹).

$$\overline{k_J}' = \begin{cases} = \overline{1} & if \quad j = n \\ 2 - \overline{s_J}' & if \quad j > n \end{cases} \tag{19}$$

که در آن، n تعداد کل معیارهاست.

گام ۸) تعیین وزن فازی $\overline{q_J}'$ (مطابق رابطه‌ی ۲۰).

$$\overline{q_J}' = \begin{cases} = \overline{1} & if \quad j = n \\ \dfrac{\overline{q_{J-1}}'}{\overline{k_J}'} & if \quad j > n \end{cases} \tag{20}$$

گام ۹) تعیین وزن نسبی معیار (مطابق رابطه‌ی ۲۱).

$$\overline{w_J}' = \frac{\overline{q_J}'}{\sum_{j=1}^{n} \overline{q_J}'} \tag{21}$$

گام ۱۰) تعیین وزن نهایی (مطابق رابطه‌ی ۲۲).

$$\overline{w_J}'' = \frac{1}{2}(\overline{w_J} + \overline{w_J}') \tag{22}$$

۳.۴. روش Z-number WASPAS

روش WASPAS در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است.[۳۷] در ادامه، گام‌های مربوط به روش توسعه‌یافته‌ی WASPAS براساس تئوری اعداد Z ارائه شده است.

گام ۱) تشکیل ماتریس تصمیم با استفاده از متغیرهای زبانی Z.

با توجه به متغیرهای زبانی ارائه‌شده در جدول ۵، هر یک از گزینه‌ها با توجه به معیارهای بررسی‌شده، مقداردهی می‌شوند.

گام ۲) تشکیل ماتریس تصمیم

متغیرهای زبانی ارائه‌شده در گام قبل با استفاده از جدول ۵ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند. ماتریس تصمیم مجموع β به صورت رابطه‌ی ۲۳ نمایش داده می‌شود.

$$\beta = \begin{bmatrix} (x_{11}^{l}, x_{11}^{m}, x_{11}^{u}) & (x_{12}^{l}, x_{12}^{m}, x_{12}^{u}) & \dots & (x_{1n}^{l}, x_{1n}^{m}, x_{1n}^{u}) \\ (x_{21}^{l}, x_{21}^{m}, x_{21}^{u}) & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (x_{m1}^{l}, x_{m1}^{m}, x_{21}^{u}) & (x_{m2}^{l}, x_{m2}^{m}, x_{m2}^{u}) & \dots & (x_{mn}^{l}, x_{mn}^{m}, x_{mn}^{u}) \end{bmatrix} \tag{23}$$

که در آن، m تعداد گزینه‌ها، n تعداد معیارها، و x_{mn} نشان‌دهنده‌ی ترجیح گزینه‌ی i اُم در معیار j اُم هستند.

گام ۳) بی‌مقیاس‌کردن ماتریس تصمیم (نرمال‌سازی ماتریس تصمیم).

جهت بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم از روابط ۲۴ و ۲۵ استفاده می‌شود.

برای معیارهای از جنس مثبت:

$$\bar{x}_{ij} = \left(\bar{x}_{ij}^{l}, \bar{x}_{ij}^{m}, \bar{x}_{ij}^{u}\right) \tag{24}$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_i x_{ij}}$$

برای معیارهای از جنس هزینه (منفی):

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\min_i x_{ij}}{x_{ij}} \tag{25}$$

گام ۴) تشکیل ماتریس تصمیم موزون

در مرحله‌ی کنونی، اولویت‌ها و وزن (w_i) هر یک از معیارها بر روی ماتریس

تصمیم اعمال و ماتریس موزون با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی (WSM) و مدل ضرب وزنی (WPM) به ترتیب با استفاده از روابط ۲۶ و ۲۷ محاسبه می‌شوند.

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} \bar{x}_{ij} (w_j^l, w_j^m, w_j^u) \quad (26)$$

$$P_i = \prod_{j=1}^{n} \bar{x}_{ij}^{-(w_j^l, w_j^m, w_j^u)} \quad (27)$$

گام ۵) محاسبه‌ی مقدار K_i

در گام کنونی، مقدار تابع بهینگی گزینه‌ی i اُم با استفاده از رابطه‌ی ۲۸ محاسبه می‌شود. بالاترین مقدار K_i، به‌عنوان بهترین گزینه و کمترین مقدار K_i به‌عنوان بدترین گزینه انتخاب می‌شوند.

$$K_i = \lambda \sum_{j=1}^{n} Q_i + (1-\lambda) \sum_{j=1}^{n} P_i \quad (28)$$
$$0 \le \lambda \le 1, 0 \le K_i \le 1$$

که در آن، λ مطابق رابطه‌ی ۲۹ محاسبه می‌شود:

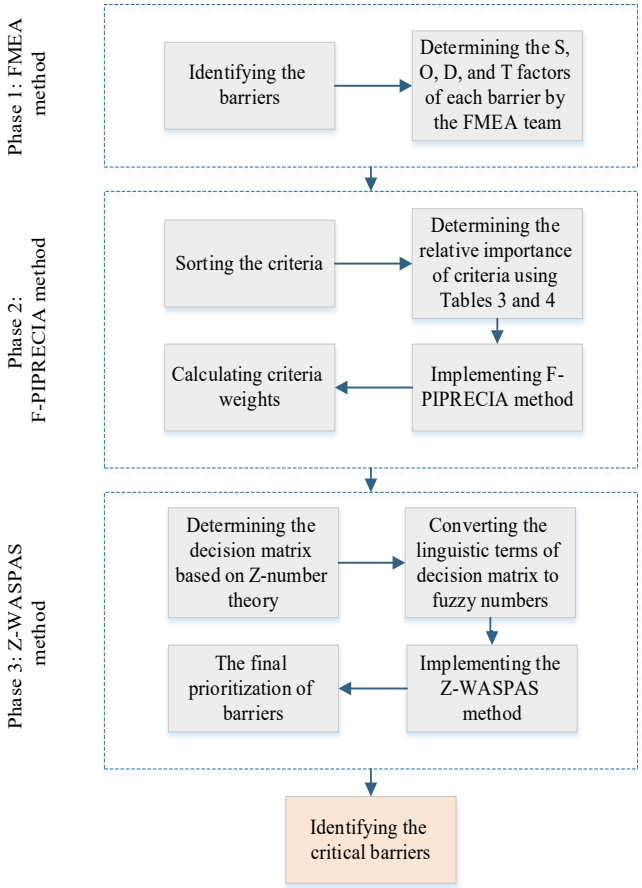
$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{m} P_i}{\sum_{i=1}^{m} Q_i + \sum_{i=1}^{m} P_i} \quad (29)$$

۴. رویکرد پیشنهادی

در بخش کنونی، رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر با بهره‌گیری از روش‌های FMEA، PIPRECIA فازی و Z-WASPAS برای ارزیابی و اولویت‌بندی موانع در سه فاز ارائه شده است.

- در فاز اول، رویکرد حاضر ضمن شناسایی موانع توسط تیم FMEA، مقادیر معیارهای چهارگانه نیز امتیازدهی می‌شوند و قابلیت اطمینان هر کدام از موانع مذکور، توسط تیم خبره‌ی مرتبط تعیین می‌شود. با استفاده از روش نمونه‌گیری هدفمند، تیم FMEA از سه خبره‌ی دارای تجربه و تخصص در زمینه‌های لجستیک و زنجیره‌ی تأمین، مدیریت تولید، و عملیات و فناوری‌های اینترنت اشیا تشکیل شده است. اطلاعات مربوط به تیم خبره نشان می‌دهد اعضا بین ۸ تا ۱۴ سال سابقه‌ی فعالیت دارند.

- در فاز دوم، در راستای درنظرگرفتن اهمیت متفاوت به ازاء معیارها از روش PIPRECIA فازی استفاده می‌شود؛ به نحوی که پس از مرتب‌کردن معیارها با استفاده از متغیرهای کلامی، متغیرهای مذکور با استفاده از جدول‌های ۳ و ۴ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند. در ادامه و براساس گام سوم از روش PIPRECIA، $\bar{k}_j$ با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ محاسبه می‌شود. سپس، وزن فازی معیارها با استفاده از رابطه‌ی ۱۶ تعیین می‌شود. در گام پنجم، وزن نسبی هر معیار با استفاده از رابطه‌ی ۱۷ محاسبه می‌شود. در ادامه، معکوس روش PIPRECIA فازی پیاده‌سازی می‌شود؛ به‌طوری که برای تعیین اهمیت نسبی معیارها، هر تصمیم‌گیرنده معیارهای از پیش مرتب‌شده را با شروع از معیار ماقبل آخر ارزیابی می‌کند. سپس با محاسبه‌ی ضریب $\bar{k}_j'$ با استفاده از رابطه‌ی ۱۸، وزن فازی و وزن نسبی معیارها به ترتیب با استفاده از روابط ۲۰ و ۲۱ محاسبه می‌شود. در انتها، وزن نهایی معیارها با استفاده از رابطه‌ی ۲۲ تعیین می‌شود.



شکل ۱. رویکرد پیشنهادی.

- در فاز سوم، براساس خروجی‌های فازهای اول و دوم سعی شده است اولویت‌بندی موانع شناسایی‌شده با توجه به اهمیت‌های متفاوت معیارها، با استفاده از روش Z-WASPAS انجام شود. روش اخیر برخلاف روش WASPAS مرسوم، علاوه‌بر درنظرگرفتن مقادیر فازی، قابلیت درنظرگرفتن قابلیت اطمینان برای هر معیار به ازاء گزینه را دارد. در روش اخیر، پس از تعیین ماتریس تصمیم، که درایه‌های آن متشکل از اعداد فازی و مقادیر قابلیت اطمینان (اعداد-Z) هستند، مقادیر مذکور با استفاده از جدول ۵ به اعداد فازی مثلثی تبدیل می‌شوند. سپس بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب با استفاده از روابط ۲۴ و ۲۵ انجام می‌شود. در ادامه و با استفاده از وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر معیار با استفاده از روش PIPRECIA فازی در فاز قبل، ماتریس موزون با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی و مدل ضرب وزنی به ترتیب با استفاده از روابط ۲۶ و ۲۷ محاسبه می‌شود. در انتها، مقدار تابع بهینگی با استفاده از رابطه‌ی ۲۸ برای هر گزینه محاسبه و اولیت‌بندی گزینه‌ها انجام می‌شود. روند اجرایی رویکرد پیشنهادی در شکل ۱ نیز مشاهده می‌شود.

۵. مطالعه‌ی موردی و تحلیل نتایج

۱.۵. یافته‌ها و تحلیل مقایسه‌ای

در راستای بررسی قابلیت رویکرد پیشنهادی در پژوهش حاضر، سعی بر آن است که اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند در یک کارخانه‌ی فعال در صنعت لوازم خانگی با استفاده از رویکرد پیشنهادی صورت پذیرد. کارخانه‌ی مذکور فعالیت خود را از سال ۱۳۹۴ در منطقه‌ی آزاد ارس (شهر جلفا) واقع در شمال غربی کشور ایران با هدف مونتاژ لوازم خانگی آغاز کرده

جدول ۶. موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند.

Symbol	Barrier
B1	**Lack of sufficient financial resources**
B2	**Lack of a development strategy**
B3	**Low risk-taking (low risk appetite)**
B4	**Shortage of qualified personnel**
B5	**Insufficient number of staff**
B6	**No dedicated unit for implementing smart systems in logistics**
B7	**Lack of customer demand**
B8	**Poor linkage with the external environment**
B9	**Lack of trust among partners**
B10	**Deficiencies in regulations**
B11	**Unfavourable macroeconomic conditions**
B12	**Lack of government support**
B13	**High implementation costs**
B14	**System instability**
B15	**Divergent objectives among partners**
B16	**Administrative bureaucracy**

جدول ۷. مقادیر شاخص‌ها به ازاء موانع در قالب متغیرهای زبانی Z.

	S			**O**			**D**			**T**		
	DM1	**DM2**	**DM3**	**DM1**	**DM2**	**DM3**	**DM1**	**DM2**	**DM3**	**DM1**	**DM2**	**DM3**
B1	VH,M	VH,H	VH,H	VH,VH	VH,VH	H,VH	VL,VL	VL,VL	M,M	MH,VL	MH,VH	MH,VL
B2	MH,H	VH,H	MH,L	VH,H	VH,VL	M,M	ML,H	H,L	MH,L	VH,H	L,VL	L,VL
B3	VH,M	VH,VL	ML,H	L,M	ML,VL	MH,H	L,H	VL,VL	MH,VL	MH,VL	M,H	MH,H
B4	MH,VH	VH,VL	L,H	VH,VL	H,L	MH,VL	ML,VL	ML,VL	L,VL	H,H	VL,M	VH,H
B5	ML,VL	MH,L	H,H	H,M	H,M	MH,H	MH,H	H,M	L,VL	L,VL	ML,M	ML,VH
B6	VH,H	VH,H	ML,VL	MH,H	H,M	M,M	VL,VH	L,VL	H,L	MH,H	H,H	ML,VL
B7	ML,H	ML,VL	VL,VH	VH,H	VL,M	ML,VL	VH,H	VL,VL	MH,VL	MH,L	MH,VL	M,M
B8	VL,VH	MH,VL	H,L	H,H	H,L	ML,VL	ML,VL	ML,VL	H,M	VH,H	M,M	ML,M
B9	VL,M	ML,VL	MH,H	ML,M	MH,VL	VH,M	L,H	VL,VL	MH,H	MH,VL	VH,H	ML,M
B10	VL,VL	VL,VL	MH,H	H,H	MH,H	M,H	VH,VL	VH,H	H,L	ML,VL	MH,L	VH,H
B11	VH,H	VH,H	ML,VL	ML,H	VH,M	M,M	VH,VH	L,VH	H,L	MH,L	H,H	ML,VL
B12	M,VH	L,VL	M,H	VH,VL	M,VH	H,L	MH,VL	MH,L	VH,H	VH,VL	ML,VL	MH,H
B13	MH,VH	VH,VL	L,H	VH,VL	H,L	MH,VL	MH,VL	ML,VL	L,VL	H,H	ML,VL	VH,H
B14	VH,VL	M,H	MH,H	ML,VL	VH,H	MH,VL	VH,M	ML,H	ML,VL	M,H	MH,H	MH,L
B15	VH,VL	M,H	MH,H	ML,VL	VH,H	MH,VL	L,VL	ML,H	ML,VL	M,H	MH,H	MH,L
B16	VH,M	VH,VH	VH,M	H,VH	H,VH	H,VH	M,M	VL,VH	M,M	MH,VL	VH,VH	MH,VL

است. فهرست ۱۶ مانع شناسایی‌شده ناشی از روش FMEA جهت پیاده‌سازی لجستیک هوشمند در جدول ۶ ارائه شده است.

در بخش حاضر، نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی در ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند بررسی شده است. ابتدا موانع موجود توسط تیم FMEA شناسایی و مقادیر عوامل چهارگانه ((شدت (S)، وقوع (O)، احتمال کشف (D)، و زمان (T)) به ازاء هر مانع توسط تیم FMEA تعیین شده است (مطابق جدول ۷). سپس، با توجه به عدم‌قطعیت و همچنین عدم‌اطمینان در عوامل مذکور از تئوری اعداد Z استفاده شده است. تئوری اعداد Z، علاوه‌بر درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در معیارها، عدم‌قطعیت نظرات خبرگان را نیز مورد توجه قرار می‌دهد. مقادیر متغیرهای زبانی معیارهای چهارگانه به ازاء موانع با توجه به نظرهای تیم FMEA در جدول ۷ ارائه

جدول ۸. نگرش تیم خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی برای PIPRECIA فازی.

PIPR.	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
DM1				0.400	0.500	0.667	0.500	0.667	1.000	0.333	0.400	0.500
DM2				0.500	0.667	1.000	0.400	0.500	0.667	0.286	0.333	0.400
DM3				0.400	0.500	0.667	0.667	1.000	1.000	0.667	1.000	1.000

جدول ۹. نگرش تیم خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی برای PIPRECIA فازی معکوس.

PIPR-I	T			D			O			S		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
DM1				1.300	1.450	1.500	0.667	1.000	1.000	1.100	1.150	1.200
DM2				1.500	1.750	1.800	0.500	0.667	1.000	1.300	1.450	1.500
DM3				1.400	1.600	1.650	0.667	1.000	1.000	1.300	1.450	1.500

جدول ۱۰. جزئیات محاسبات روش PIPRECIA فازی.

PIPRECIA	s_j			k_j			q_j			w_j			DF
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
S				1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.323	0.382	0.426	0.380
O	0.433	0.556	0.778	1.222	1.444	1.567	0.638	0.692	0.818	0.206	0.265	0.349	0.269
D	0.522	0.722	0.889	1.111	1.278	1.478	0.432	0.542	0.737	0.140	0.207	0.314	0.214
T	0.429	0.578	0.633	1.367	1.422	1.571	0.275	0.381	0.539	0.089	0.146	0.230	0.150
Σ							2.345	2.615	3.094				

جدول ۱۱. جزئیات محاسبات روش PIPRECIA فازی معکوس.

PIPRECIA-I	s'_j			k'_j			q'_j			w'_j			DF
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u	
S	1.233	1.350	1.400	0.600	0.650	0.767	1.565	3.462	4.762	0.136	0.376	0.877	0.419
O	0.611	0.889	1.000	1.000	1.111	1.389	1.200	2.250	2.857	0.105	0.244	0.526	0.268
D	1.400	1.600	1.650	0.350	0.400	0.600	1.667	2.500	2.857	0.145	0.271	0.526	0.293
T				1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.087	0.109	0.184	0.118
Σ							5.432	9.212	11.476				

شده است. سپس مقادیر مذکور با استفاده از جدول ۵ به مقادیر فازی مثلثی تبدیل شده‌اند.

در ادامه و براساس فاز دوم رویکرد پیشنهادی، وزن عوامل با استفاده از روش F-PIPRECIA تعیین شده است. سپس براساس روش اخیر، ماتریس‌های متشکل از نگرش تیم خبرگان با استفاده از مقیاس زبانی برای PIPRECIA فازی و برای PIPRECIA فازی معکوس به ترتیب در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده‌اند.

محاسبات روش PIPRECIA فازی در جدول ۱۰ ارائه شده است.

نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش PIPRECIA فازی معکوس در جدول ۱۱ ارائه شده است.

با توجه به جدول‌های ۱۰ و ۱۱، وزن معیارهای شدت (S)، وقوع (O)، احتمال کشف (D) و زمان (T) به ترتیب ۰/۳۹۹، ۰/۲۶۸، ۰/۲۵۳، و ۰/۱۳۴ به‌دست آمده است.

در فاز سوم رویکرد پیشنهادی و براساس نتایج فازهای اول و دوم، اولویت‌بندی موانع با استفاده از روش توسعه‌یافته‌ی Z-WASPAS انجام پذیرفته است. در ابتدا، ماتریس تصمیم‌گیری روش Z-WASPAS در قالب درایه‌های اعداد Z تشکیل شده است؛ به نحوی که سطرها نشانگر گزینه‌های موردارزیابی یا همان موانع و ستون‌های ماتریس مذکور، نشانگر معیارهای ارزیابی یا همان عوامل چهارگانه هستند. در ادامه، ماتریس تصمیم‌گیری تجمیع‌یافته از نظر خبرگان و نرمال‌شده در قالب اعداد فازی مثلثی ارائه شده است (جدول ۱۲).

حال، پس از تجمیع و نرمال‌سازی ماتریس تصمیم‌گیری، وزن عوامل در ماتریس مذکور لحاظ شده است. براساس روش WASPAS، ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از دو روش مدل مجموع وزنی (WSM) و مدل ضرب وزنی (WPM) موزون شده است. ماتریس وزن‌دارشده نیز با استفاده از روش WSM در جدول ۱۳ ارائه شده است.

سپس ماتریس تصمیم‌گیری با استفاده از روش WPM موزون شده است (مطابق جدول ۱۴).

جدول ۱۲. ماتریس تجمیع و نرمال‌شده‌ی فازی.

	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
B1	0.900	1.000	1.112	0.833	1.000	1.200	0.114	0.627	1.939	0.431	0.656	1.039
B2	0.607	0.759	0.972	0.439	0.548	0.695	0.044	0.197	0.554	0.411	0.535	0.749
B3	0.422	0.535	0.673	0.158	0.273	0.473	0.113	0.728	2.601	0.451	0.733	1.185
B4	0.319	0.447	0.663	0.290	0.374	0.484	0.156	1.000	6.422	0.731	0.944	1.273
B5	0.375	0.517	0.695	0.495	0.675	0.914	0.041	0.177	0.450	0.091	0.314	0.673
B6	0.646	0.743	0.855	0.395	0.573	0.824	0.087	0.423	1.070	0.566	0.851	1.275
B7	0.049	0.145	0.313	0.276	0.339	0.449	0.055	0.210	0.451	0.352	0.569	0.929
B8	0.228	0.300	0.433	0.352	0.487	0.651	0.063	0.269	0.735	0.566	0.833	1.230
B9	0.189	0.286	0.458	0.304	0.414	0.567	0.062	0.331	0.983	0.536	0.754	1.077
B10	0.176	0.246	0.381	0.441	0.642	0.917	0.038	0.135	0.289	0.578	0.781	1.085
B11	0.646	0.743	0.855	0.327	0.477	0.683	0.036	0.144	0.332	0.487	0.731	1.085
B12	0.225	0.392	0.628	0.335	0.466	0.644	0.040	0.154	0.347	0.401	0.592	0.895
B13	0.319	0.447	0.663	0.290	0.374	0.484	0.119	0.638	2.163	0.748	1.000	1.336
B14	0.401	0.559	0.773	0.331	0.419	0.540	0.050	0.211	0.547	0.515	0.830	1.336
B15	0.401	0.559	0.773	0.331	0.419	0.540	0.095	0.587	3.543	0.515	0.830	1.336
B16	0.893	0.992	1.103	0.700	0.931	1.200	0.059	0.314	0.969	0.639	0.826	1.108

جدول ۱۳. ماتریس وزن‌دارشده‌ی فازی با استفاده از روش WSM.

	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
B1	0.359	0.400	0.444	0.224	0.268	0.322	0.029	0.159	0.491	0.058	0.088	0.139
B2	0.243	0.303	0.389	0.118	0.147	0.187	0.011	0.050	0.140	0.055	0.072	0.100
B3	0.169	0.214	0.269	0.042	0.073	0.127	0.029	0.184	0.659	0.060	0.098	0.159
B4	0.127	0.179	0.265	0.078	0.100	0.130	0.039	0.253	1.626	0.098	0.126	0.170
B5	0.150	0.207	0.278	0.133	0.181	0.245	0.010	0.045	0.114	0.012	0.042	0.090
B6	0.258	0.297	0.342	0.106	0.154	0.221	0.022	0.107	0.271	0.076	0.114	0.171
B7	0.019	0.058	0.125	0.074	0.091	0.121	0.014	0.053	0.114	0.047	0.076	0.124
B8	0.091	0.120	0.173	0.094	0.131	0.175	0.016	0.068	0.186	0.076	0.111	0.165
B9	0.076	0.114	0.183	0.082	0.111	0.152	0.016	0.084	0.249	0.072	0.101	0.144
B10	0.070	0.098	0.152	0.118	0.172	0.246	0.010	0.034	0.073	0.077	0.105	0.145
B11	0.258	0.297	0.342	0.088	0.128	0.183	0.009	0.037	0.084	0.065	0.098	0.145
B12	0.090	0.157	0.251	0.090	0.125	0.173	0.010	0.039	0.088	0.054	0.079	0.120
B13	0.127	0.179	0.265	0.078	0.100	0.130	0.030	0.162	0.548	0.100	0.134	0.179
B14	0.160	0.223	0.309	0.089	0.112	0.145	0.013	0.053	0.138	0.069	0.111	0.179
B15	0.160	0.223	0.309	0.089	0.112	0.145	0.024	0.149	0.897	0.069	0.111	0.179
B16	0.357	0.397	0.441	0.188	0.250	0.322	0.015	0.079	0.246	0.086	0.111	0.148

جدول ۱۴. ماتریس وزن‌دارشده فازی با استفاده از روش WPM.

	S			O			D			T		
	l	m	u	l	m	u	l	m	u	l	m	u
B1	0.96	1.00	1.04	0.67	0.70	0.74	0.41	0.63	0.84	0.68	0.72	0.77
B2	0.82	0.90	0.99	0.56	0.60	0.64	0.32	0.47	0.61	0.68	0.70	0.73
B3	0.71	0.78	0.85	0.43	0.50	0.57	0.41	0.65	0.90	0.69	0.73	0.78
B4	0.63	0.72	0.85	0.50	0.54	0.58	0.44	0.71	1.13	0.73	0.76	0.79
B5	0.68	0.77	0.86	0.58	0.63	0.69	0.31	0.46	0.58	0.55	0.65	0.72
B6	0.84	0.89	0.94	0.55	0.60	0.67	0.38	0.57	0.72	0.71	0.75	0.79
B7	0.30	0.46	0.63	0.50	0.53	0.57	0.34	0.48	0.58	0.66	0.71	0.76
B8	0.55	0.62	0.72	0.53	0.58	0.63	0.35	0.51	0.65	0.71	0.75	0.79
B9	0.51	0.61	0.73	0.51	0.55	0.60	0.35	0.53	0.70	0.70	0.74	0.77
B10	0.50	0.57	0.68	0.56	0.62	0.69	0.31	0.43	0.52	0.71	0.74	0.77
B11	0.84	0.89	0.94	0.52	0.58	0.63	0.30	0.43	0.53	0.69	0.73	0.77
B12	0.55	0.69	0.83	0.52	0.57	0.62	0.31	0.44	0.54	0.68	0.71	0.75
B13	0.63	0.72	0.85	0.50	0.54	0.58	0.41	0.63	0.86	0.73	0.76	0.79
B14	0.69	0.79	0.90	0.52	0.56	0.60	0.33	0.48	0.61	0.70	0.75	0.79
B15	0.69	0.79	0.90	0.52	0.56	0.60	0.39	0.62	0.97	0.70	0.75	0.79
B16	0.96	1.00	1.04	0.64	0.69	0.74	0.34	0.53	0.70	0.72	0.74	0.77

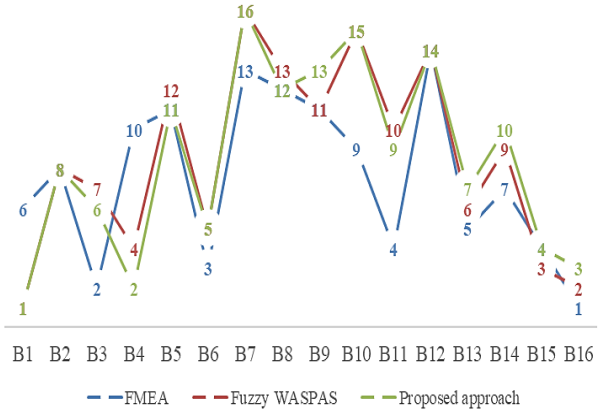
سپس در این مرحله، مقادیر Q_i و P_i به ترتیب با استفاده از روابط ۲۶ و ۲۷ به‌دست آمده‌اند. همچنین مقدار λ با استفاده از رابطه‌ی ۲۹، (۰/۶۶۹، ۰/۲۴۲، و ۰/۰۷۱) به‌دست آمده است. سپس امتیاز (K_i) با استفاده از رابطه‌ی ۲۸ برای هر گزینه محاسبه شده است. در آخر، با استفاده از رابطه‌ی ترجیح نسبی برای تعیین اولویت اعداد فازی (رابطه‌ی ۹)، اولویت‌بندی موانع انجام شده است. با توجه به جدول ۱۵ مشاهده می‌شود که براساس رویکرد پیشنهادی (FPIPRECIA-ZWASPAS)، موانع B۱ و B۴ به ترتیب در اولویت‌های اول و دوم قرار گرفته‌اند. به بیانی دیگر، موانع مذکور به‌عنوان موانع بحرانی در نظر گرفته شده‌اند و نیازمند برنامه‌ریزی جهت اقدام‌های اصلاحی/ پیشگیرانه هستند. همچنین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت مانع B۷ در اولویت آخر قرار گرفته و در حال حاضر نیازی به اقدام‌های اصلاحی نیست و همچنین در جدول ۱۶ مشاهده می‌شود که براساس روش امتیازدهی RPN سنتی، مانع B۱۶ در اولویت رسیدگی قرار گرفته است. علاوه‌براین، موانع B۱۱ و B۱۵ به‌طورمشترک در جایگاه چهارم و B۵ و B۹ به‌طورمشترک در جایگاه یازدهم قرار گرفته‌اند. بنابراین، رویکرد FMEA سنتی موانع را در ۱۴ دسته به جای ۱۶ دسته رتبه‌بندی کرده است. این ضعف در رویکرد WASPAS فازی به جهت درنظرگرفتن شرایط عدم‌قطعیت و وزن‌دهی به عوامل بر طرف شده است. چرا که براساس اولویت‌بندی حاصل از روش اخیر،

جدول ۱۵. محاسبات و نتایج روش Z-WASPAS.

	Barrier	Q_i			P_i			K_i			$\mu(K_i, \overline{K})$	Rank
		l	m	u	l	m	u	l	m	u		
B1	Lack of sufficient financial resources	0.670	0.915	1.397	0.179	0.318	0.494	0.339	0.514	0.789	0.742	1
B2	Lack of a development strategy	0.427	0.572	0.816	0.100	0.176	0.282	0.207	0.306	0.457	0.490	8
B3	Low risk-taking (low risk appetite)	0.300	0.570	1.213	0.085	0.184	0.345	0.155	0.311	0.629	0.528	6
B4	Shortage of qualified personnel	0.343	0.659	2.192	0.103	0.209	0.438	0.182	0.357	1.013	0.671	2
B5	Insufficient number of staff	0.305	0.475	0.727	0.068	0.145	0.248	0.146	0.253	0.405	0.428	11
B6	No dedicated unit for implementing smart systems in logistics	0.462	0.672	1.005	0.124	0.228	0.355	0.234	0.373	0.568	0.569	5
B7	Lack of customer demand	0.155	0.278	0.484	0.034	0.082	0.156	0.073	0.146	0.263	0.306	16
B8	Poor linkage with the external environment	0.277	0.430	0.699	0.073	0.135	0.230	0.140	0.232	0.383	0.408	12
B9	Lack of trust among partners	0.245	0.410	0.729	0.064	0.132	0.240	0.123	0.223	0.400	0.403	13
B10	Deficiencies in regulations	0.275	0.409	0.617	0.061	0.112	0.186	0.132	0.209	0.327	0.377	15
B11	Unfavourable macroeconomic conditions	0.420	0.559	0.755	0.092	0.162	0.246	0.200	0.292	0.412	0.468	9
B12	Lack of government support	0.244	0.400	0.632	0.061	0.123	0.211	0.121	0.214	0.349	0.383	14
B13	High implementation costs	0.336	0.575	1.122	0.097	0.188	0.335	0.175	0.315	0.593	0.525	7
B14	System instability	0.331	0.500	0.771	0.084	0.156	0.258	0.165	0.269	0.426	0.449	10
B15	Divergent objectives among partners	0.342	0.596	1.530	0.099	0.203	0.415	0.178	0.331	0.780	0.589	4
B16	Administrative bureaucracy	0.645	0.836	1.157	0.151	0.269	0.416	0.313	0.455	0.659	0.664	3

جدول ۱۶. مقایسه‌ی اولویت‌بندی حاصل از رویکرد پیشنهادی و روش‌های مرسوم.

	FMEA		Fuzzy WASPAS		Proposed approach	
	RPN	Rank	*Score*	Rank	*Score*	Rank
B1	1072	6	0.576	1	0.742	1
B2	1012	8	0.421	8	0.490	8
B3	1320	2	0.434	7	0.528	6
B4	741.3333	10	0.463	4	0.671	2
B5	728	11	0.391	12	0.428	11
B6	1250.667	3	0.461	5	0.569	5
B7	538.6667	13	0.308	16	0.306	16
B8	690.6667	12	0.390	13	0.408	12
B9	728	11	0.394	11	0.403	13
B10	938.6667	9	0.312	15	0.377	15
B11	1146.667	4	0.410	10	0.468	9
B12	514.6667	14	0.359	14	0.383	14
B13	1114.667	5	0.448	6	0.525	7
B14	1034.667	7	0.419	9	0.449	10
B15	1146.667	4	0.463	3	0.589	4
B16	1418.667	1	0.525	2	0.664	3



شکل۲. مقایسه‌ی اولویت‌بندی موانع براساس رویکردهای FPIPRECIA-ZWASPAS، WASPAS فازی و امتیاز RPN.

B۱ در اولویت اول، B۱۶ در اولویت دوم، و B۱۵ در اولویت سوم قرار گرفته و به‌عنوان مانع بحرانی شناسایی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند نتایج حاصل از پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی، با روش WASPAS فازی به‌عنوان یک روش قابل‌اطمینان،[۳۸] در شناسایی موانع بحرانی تقریباً مشابه عمل کرده و نتایج ضریب همبستگی ۰/۹۷۶ را نشان داده و فقط در چند مورد اولویت‌بندی موانع متفاوت بوده است؛ که تفاوت مذکور، به علت درنظرگرفتن قابلیت‌اطمینان در کنار عدم‌قطعیت در مقادیر عوامل بوده است، که برتری رویکرد پیشنهادی نسبت به روش‌های موجود در ادبیات را نشان می‌دهد.

در شکل ۲، نتایج روش‌های مرسوم WASPAS فازی و امتیاز RPN سنتی در ارائه‌ی رتبه‌بندی کامل در مقایسه با رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر مشاهده می‌شود.

۲.۵. بینش‌های مدیریتی

تحلیل FMEA به‌وضوح نشان می‌دهد که محدودیت‌های مالی و کمبود نیروی ماهر، دو مانع اصلی در پیاده‌سازی لجستیک هوشمند هستند. مدیریت باید بودجه را به‌طورراهبردی تأمین و تخصیص دهد. انجام تحلیل‌های دقیق نرخ بازگشت سرمایه (ROI) و تدوین برنامه‌های سرمایه‌گذاری پله‌ای و یا جذب سرمایه‌ی خارجی می‌تواند هزینه‌ها را کاهش دهد و نیاز بودجه را برطرف کند. پروژه‌های دیجیتال بدون کنترل دقیق هزینه‌ها و منابع، به‌راحتی با کمبود بودجه مواجه و متوقف می‌شوند. از طرفی، شرکت‌هایی که برنامه‌ریزی سرمایه‌گذاری را به‌طورمناسب انجام می‌دهند و تحول دیجیتال را دنبال می‌کنند، فشارهای مالی را با بهبود بهره‌وری تسهیل می‌کنند. به‌طور خلاصه، مدیران ارشد شرکت مذکور باید پروژه‌ی لجستیک هوشمند را به‌عنوان اولویتی راهبردی پیگیری کنند؛ در غیر این‌صورت، تأمین مالی ناکافی به‌طور قابل‌پیش‌بینی، اجرای پروژه را متوقف و یا با شکست مواجه خواهد کرد. به همان اندازه، توسعه‌ی نیروی انسانی واجد شرایط ضروری است. کمبود نیروی ماهر، یکی از گلوگاه‌های شناخته‌شده است؛ که برای رفع مشکل اخیر، شرکت اخیر باید یک برنامه‌ی توسعه‌ی شایستگی نیروی کار، شامل آموزش‌های درون‌سازمانی، حمایت از اخذ گواهینامه‌های تخصصی، همکاری با آموزشگاه‌های فنی، و ارائه‌ی تسهیلات برای ارتقاء فرهنگ یادگیری سازمانی را به اجرا در آورد. ادغام آموزش در اهداف عملکردی و نظام جبران خدمات کارکنان تضمین می‌کند ارتقاء مهارت‌ها با سیستم‌های جدید همراه هستند. از طرفی، تیم آموزش‌دیده سریع‌تر با تکنولوژی‌ها و تجهیزات اینترنت اشیاء، پلتفرم‌های تحلیلی، و فرایندهای جدید سازگار می‌شود و سودمندی‌های موردانتظار را به‌دست می‌آورد.

در آخر، همسوسازی راهبردی و مدیریت تغییر در فرآیند پیاده‌سازی لجستیک هوشمند ضروری است. مدیران باید اطمینان حاصل کنند که پروژه‌ی لجستیک هوشمند، مورد حمایت صریح و قابل‌مشاهده‌ی مدیران ارشد است و چشم‌انداز روشنی دارد. اقدام‌های کلیدی مدیریتی، شامل: تأمین سرمایه‌ی کافی، آموزش یا استخدام متمرکز نیروی انسانی ماهر، و مدیریت پروژه در یک چارچوب راهبردی از بالا به پایین است. با پرداختن مستقیم به موانع حیاتی اخیر، شرکت مذکور می‌تواند اجرای موفق لجستیک هوشمند را تضمین کند.

۶. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارائه‌ی یک چارچوب یکپارچه با استفاده از روش‌های F-PIPRECIA و Z-WASPAS جهت ارزیابی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند صورت پذیرفته است؛ که از نظر هدف کاربردی و از منظر روش، کمّی- کیفی بوده است. همچنین، از نگرش سه خبره در حوزه‌ی لجستیک و مدیریت زنجیره‌ی تأمین در قالب تیم FMEA استفاده شده است. در ادامه، باید بیان کرد که پیاده‌سازی لجستیک هوشمند با گذار به صنعت ۴.۰ توسعه‌یافته است. لجستیک هوشمند، شامل سیستم‌های بسیاری است، که وظیفه‌ی آن‌ها بهبود کارایی فرآیندهای لجستیک است. با وجود مزایای بسیار، موانعی جهت پیاده‌سازی لجستیک هوشمند وجود دارد. لذا، شناسایی و رتبه‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند، اهمیت روزافزونی دارد. یکی از رویکردهای شناسایی و رتبه‌بندی موانع، روش FMEA است؛ که به‌دلیل تحلیل‌پذیری مناسب، جزء پرکاربردترین روش‌هاست. با وجود گستردگی کاربرد روش FMEA، نقاط ضعف و کاستی‌های آن باعث شده است که برخی از پژوهشگران به‌دنبال بهبود روش مرسوم FMEA باشند. بنابراین در پژوهش حاضر، برای اولین بار یک رویکرد توسعه‌یافته‌ی FMEA با استفاده از روش F-PIPRECIA جهت وزن‌دهی به معیارها و Z-WASPAS جهت اولویت‌بندی موانع پیاده‌سازی لجستیک هوشمند ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده، به ترتیب، "کمبود منابع مالی کافی" و "کمبود کارکنان واجد شرایط" به عنوان موانع بحرانی انتخاب شده‌اند و در اولویت رسیدگی هستند. از طرفی، "نبود تقاضا از سوی مشتریان" به‌عنوان اولویت آخر انتخاب شده و در حال حاضر نیازمند اقدام‌های اصلاحی نبوده است. استفاده از روش توسعه‌یافته، منجر به رفع برخی نواقص روش FMEA مرسوم، مانند عدم ارائه‌ی رتبه‌بندی کامل گزینه‌ها و درنظرنگرفتن وزن برای معیارها شده است. همچنین در رویکرد پیشنهادی، معیار زمان نیز به‌عنوان یک شاخص مهم مدیریتی در کنار معیارهای شدت، وقوع، و احتمال کشف در روش FMEA در نظر گرفته شده است. تعداد محدود خبرگان در حوزه‌ی لجستیک هوشمند و همچنین عدم تخصیص وزن به هر یک از خبرگان براساس دانش و میزان تجربه‌ی آن‌ها، از جمله محدودیت‌های پژوهش حاضر است. در آینده، پژوهشگران نوشتار حاضر در صدد هستند که مطالعات خود را در راستای رفع محدودیت‌های پژوهش حاضر و توسعه‌ی روش FMEA با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در محیط‌های عدم‌قطعیت، نظیر فازی فیثاغورثی، q-rung و فازی کروی گسترش دهند. فارغ از مسئله‌ی استفاده‌شده برای پیاده‌سازی رویکرد پیشنهادی پژوهش حاضر، این رویکرد در سناریوهای مختلف شناسایی و تحلیل ریسک و حالت‌های خرابی قابل‌اجرا خواهد بود.

سپاسگزاری

نوشتار حاضر حاصل بخشی از پژوهشی در کارخانه‌ی هادی کوش ارس است. لذا، بدین وسیله از ریاست هیئت مدیره‌ی کارخانه و همچنین از اعضاء هیئت علمی دانشکده‌های مهندسی صنایع و مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر، که در پژوهش حاضر همکاری داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

References - منابع

1. Tang, X., 2020. Research on smart logistics model based on internet of things technology. *IEEE Access, 8*, 151150-151159. DOI:https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016330.
2. Song, Y., Yu, F. R., Zhou, L., Yang, X., and He, Z., 2020. Applications of the internet of things (IoT) in smart logistics: a comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal, 8*(6), 4250-4274. DOI:https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3034385.
3. Lee, S., Kang, Y., and Prabhu, V. V., 2016. Smart logistics: distributed control of green crowdsourced parcel services. *International Journal of Production Research, 54*(23), 6956-6968. DOI:https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1132856.
4. Jafarzadeh Ghoushchi, S., Memarpour Ghiaci, A., Rahnamay Bonab, S., and Ranjbarzadeh, R., 2022. Barriers to circular economy implementation in designing of sustainable medical waste management systems using a new extended decision-making and FMEA models. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-19. DOI:https://doi.org/10.1007/s11356-022-19018-z.
5. Ghoushchi, S. J., Yousefi, S., and Khazaeili, M., 2019. An extended FMEA approach based on the Z-MOORA and fuzzy BWM for prioritization of failures. *Applied Soft Computing, 81*, 105505. DOI:https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105505.
6. Jafarzadeh Ghoushchi, S., Shaffiee Haghshenas, S., Memarpour Ghiaci, A., Guido, G., and Vitale, A., 2022. Road safety assessment and risks prioritization using an integrated SWARA and MARCOS approach under spherical fuzzy environment. *Neural Computing and Applications*, 1-19. DOI:https://doi.org/10.1007/s00521-022-07929-4.
7. Fleisch, E., Christ, O., and Dierkes, M., 2005. Die betriebswirtschaftliche vision des internets der dinge. *In Das Internet der Dinge* (pp. 3-37): Springer. DOI:https://doi.org/10.1007/3-540-28299-8_1.
8. Uckelmann, D., 2008. A definition approach to smart logistics. *Paper presented at the International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking*. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-540-85500-2_28.
9. Barreto, L., Amaral, A., and Pereira, T., 2017. Industry 4.0 implications in logistics: an overview.

Procedia Manufacturing, 13, 1245-1252. DOI:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.045.

10. Cullity, B., 1972. Introduction to magnetic materials (MA, USA. In: Addison-Wesley, Reading.
11. Lin, C.-C., and Yang, J.-W., 2018. Cost-efficient deployment of fog computing systems at logistics centers in industry 4.0. *IEEE Transactions on Iindustrial Informatics, 14*(10), 4603-4611. DOI:https://doi.org/10.1109/TII.2018.2827920.
12. Zhang, C., and Peng, D., 2013. Countermeasures on how to develop China's smart logistics. *China Business and Market, 10*(1), 35-39.
13. Zhang, Y., Liu, S., Liu, Y., Yang, H., Li, M., Huisingh, D., and Wang, L., 2018. The 'internet of things' enabled real-time scheduling for remanufacturing of automobile engines. *Journal of Cleaner Production, 185*, 562-575. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.061.
14. Zhao, L., 2005. Intelligent logistics and its supporting technology. *Journal. Intell, 24*(12), 49-50.
15. McFarlane, D., Giannikas, V., and Lu, W., 2016. Intelligent logistics: Involving the customer. *Computers in Industry, 81*, 105-115. DOI:https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.10.002.
16. Ghoushchi, S. J., Jalalat, S. M., Bonab, S. R., Ghiaci, A. M., Haseli, G., and Tomaskova, H., 2022. Evaluation of wind turbine failure modes using the developed SWARA-CoCoSo methods based on the spherical fuzzy environment. *IEEE Access, 10*, 86750-86764. DOI:https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199359.
17. Sumrit, D., and Keeratibhubordee, J., 2025. Risk assessment framework for reverse logistics in waste plastic recycle industry: A hybrid approach incorporating FMEA decision model with AHP-LOPCOW-ARAS under trapezoidal fuzzy set. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 42-81. DOI:https://doi.org/10.31181/dmame812025984.
18. Phokee, W., Chaiklieng, S., Boriwan, P., Phoka, T., Vanoirbeek, J. and Chatpun, S., 2025. A Cascading Delphi Method-Based FMEA Risk Assessment Framework for Surgical Instrument Design: A Case Study of a Fetoscope. *Applied Sciences, 15*(11), p.6203. DOI:https://doi.org/10.3390/app15116203.
19. Kumari, S., Ahmad, K., Khan, Z.A. and Ahmad, S., 2025. Analysing the failure modes of water treatment plant using FMEA based on fuzzy AHP and fuzzy VIKOR methods. *Arabian Journal for Science and Engineering*, pp.1-16. DOI:https://doi.org/10.1007/s13369-025-10000-8.
20. Deepak, D., Brar, G.S., Dwivedi, S., Farwaha, H.S., Ranjan, N., Alkhaleel, B.A. and Pandey, S., 2025. Optimizing concrete pump maintenance in the construction sector using enhanced MCDM techniques. *Scientific Reports, 15*(1), p.13816. DOI:https://doi.org/10.1038/s41598-025-98481-3.
21. Rashidian, F., Eydi, A., and Roghanian, E., 2024. Reliable and green road-rail routing using a hybrid procedure of DANP, COCOSO, and FMEA criticality methods: A case study of cement transportation network in Iran. *Journal of Cleaner Production, 447*, 141250. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141250.
22. Altubaishe, B., and Desai, S., 2023. Multicriteria decision making in supply chain management using FMEA and hybrid AHP-PROMETHEE algorithms. *Sensors, 23*(8), 4041. DOI:https://doi.org/10.3390/s23084041.
23. Jin, G., Meng, Q., and Feng, W., 2022. Optimization of Logistics System with Fuzzy FMEA-AHP Methodology. *Processes, 10*(10), 1973. DOI:https://doi.org/10.3390/pr10101973.
24. Oturakçı, M., and Konyalıoğlu, A. K., 2022. Action selection based on fuzzy AHP-based TOPSIS method in fuzzy FMEA-based risk assessment: A case study. *Paper presented at the International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems*. DOI:https://doi.org/10.1007/978-3-031-09173-5_45.
25. Bathrinath, S., Mohan, S., Koppiahraj, K., Bhalaji, R., and Santhi, B., 2022. Analysis of factors affecting sustainable performance in construction sites using fuzzy AHP-WASPAS methods. *Materials Today: Proceedings*. DOI:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.393.
26. Pourmehdi, M., Paydar, M. M., and Asadi-Gangraj, E., 2021. Reaching sustainability through collection center selection considering risk: using the integration of Fuzzy ANP-TOPSIS and FMEA. *Soft Computing, 25*(16), 10885-10899. DOI:https://doi.org/10.1007/s00500-021-05786-2.
27. Alvand, A., Mirhosseini, S. M., Ehsanifar, M., Zeighami, E., and Mohammadi, A., 2021. Identification and assessment of risk in construction projects using the integrated FMEA-SWARA-WASPAS model under fuzzy environment: a case study of a construction project in Iran. *International Journal of Construction Management*, 1-23. DOI:https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1877875.
28. Stanujkic, D., Zavadskas, E. K., Karabasevic, D., Smarandache, F., and Turskis, Z., 2017. *The use of the pivot pairwise relative criteria importance assessment method for determining the weights of criteria.* Infinite Study.

29. Keršuliene, V., Zavadskas, E.K. and Turskis, Z., 2010. Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA). *Journal of business economics and management, 11*(2), pp.243-258. DOI:https://doi.org/10.3846 /jbem.2010.12.

30. Popovic, G., Stanujkic, D., Mihic, M., Smarandache, F., Karabasevic, D. and Mircetic, V., 2025. The single-valued Neutrosophic extension of the PIPRECIA method. *Knowledge-Based Systems, 315*, p.113271. DOI:https://doi.org/10.1016/j.knosys.2025.113271.

31. Ghiaci, A.M. and Gheidar-Kheljani, J., 2024. A hybrid model of extended FMEA model based on F-PIPRECIA and Z-EDAS methods with Bow Tie to evaluate cybersecurity risks in Industry 4.0. *Engineering Management and Soft, Computing, 9*(2), pp.149-176. DOI:https://doi.org/10.22091/jemsc.2024.9642.1175.

32. Ghoushchi, S.J., Bonab, S.R., Ghiaci, A.M., Haseli, G., Tomaskova, H. and Hajiaghaei-Keshteli, M., 2021. Landfill site selection for medical waste using an integrated SWARA-WASPAS framework based on spherical fuzzy set. *Sustainability, 13*(24), p.13950. DOI:https://doi.org/10.3390/su132413950. [in Persian]

33. Yücenur, G.N. and Maden, A., 2025. Location selection for a photovoltaic agricultural with f-PIPRECIA and WASPAS methods: A case study. *Energy, 314*, p.134179. DOI:https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134179.

34. Lotfi, Z., 1965. Fuzzy sets. *Information and control, 8*(3), 338-353.

35. Wang, Y.J., 2015. Ranking triangle and trapezoidal fuzzy numbers based on the relative preference relation. *Applied mathematical modelling, 39*(2), pp.586-599. DOI:https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.06.011.

36. Zadeh, L. A., 2011. A note on Z-numbers. *Information Sciences, 181*(14), 2923-2932. DOI:https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.02.022.

37. Zavadskas, E. K., Turskis, Z., Antucheviciene, J., and Zakarevicius, A., 2012. Optimization of weighted aggregated sum product assessment. *Elektronika ir elektrotechnika, 122*(6), 3-6. DOI:https://doi.org/10.5755/j01.eee.122.6.1810.

38. Chakraborty, S., and Saha, A. K., 2022. A framework of LR fuzzy AHP and fuzzy WASPAS for health care waste recycling technology. *Applied Soft Computing, 127*, 109388. DOI:https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109388.

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.

۲.۳. 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.

۴.۳. 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 و 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 و 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.

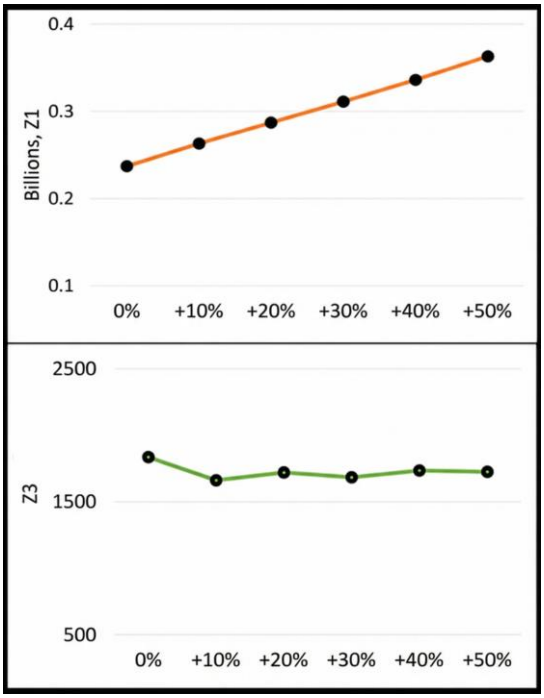
۴.۳. بررسی تأثیر درنظرگرفتن اثر ردپای کربن

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.

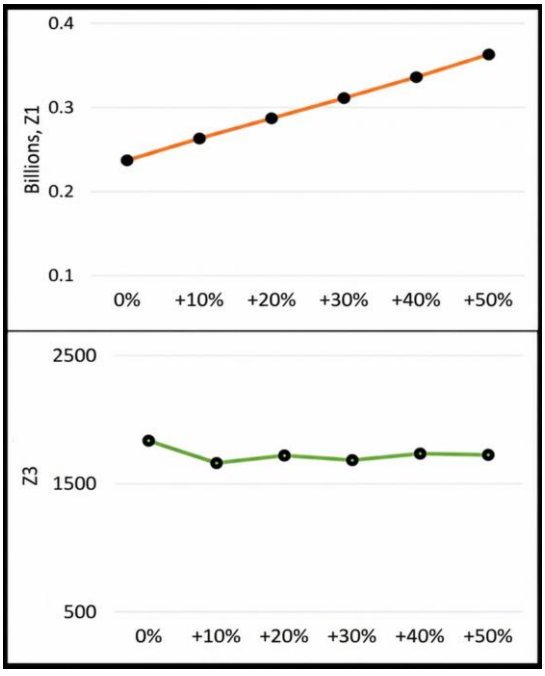
۴.۴. آنالیز حساسیت

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

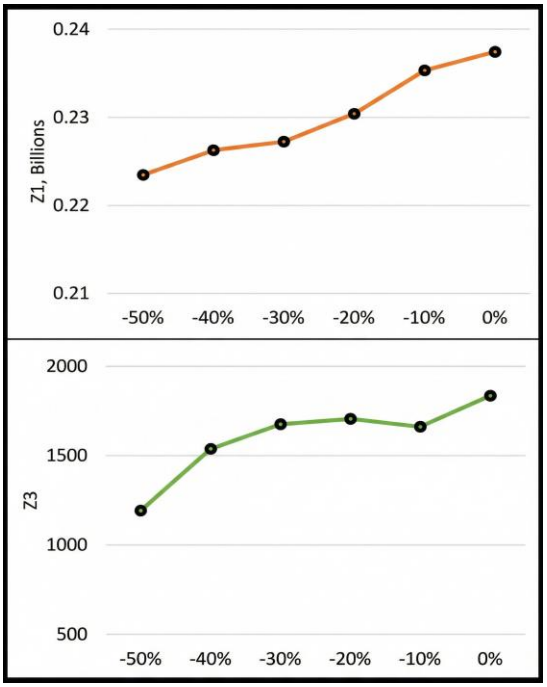


شکل ۱. تغییرپذیری توابع هدف بر حسب تغییرات β.



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

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 31-43

Sharif University of Technology

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



Research Article

An Integrated Problem of Handling Equipment Scheduling and Storage Space Allocation for Inbound Containers at Container Terminal

Zahra Sadat Fani Sadrabadi and Mehdi Alinaghian*

Department of Industrial and Systems Engineering Isfahan University of Technology, Iran.
* corresponding author: (alinaghian@iut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:1 October 2024

Revised:14 December 2024

Accepted:12 January 2025

Keywords:

Quay crane scheduling problem, yard truck scheduling problem, yard crane scheduling problem, valid inequalities.

Abstract

The increasing growth of container transportation has led container terminals, as the primary hubs of cargo transfer in the global supply chain, to continuously improve their efficiency and operations to be successful in this competitive industry. Various problems have arisen in the maritime logistics field owing to the division of container terminals into two sections, quayside and yardside. This study examines the integration of problems on the quayside and the yardside. Specifically, it simultaneously investigates the quay crane scheduling problem as a quayside problem, along with the yard truck scheduling problem, yard crane scheduling problem, and storage space allocation problem as part of the yardside problems. A new integer linear programming model has been presented for the integrated problem of equipment handling scheduling and storage location allocation. This problem aims to minimize the time required to complete containers and operational costs. These operational costs include unloading containers from vessels using a quay crane, moving them to the yard via yard trucks, and loading them using a yard crane. The integrated problem is classified under the category of NP-hard problems in terms of computational complexity. Furthermore, they were introduced and added to the model according to the problem structure to expedite the resolution of constraints under valid inequalities. To validate the model's accuracy, instances were designed, implemented in GAMS software, and executed using the CPLEX solver. The computational results demonstrate that the incorporation of valid inequalities across all instances reduces computational time. Furthermore, in instances involving larger problems, where the mathematical model was unable to determine the optimal solution within a reasonable time, the addition of valid inequalities yielded solutions with an average gap of 1.78% from the lower bound. By contrast, the proposed model without the inclusion of valid inequalities achieved solutions with a gap of 3.08% from the lower bound.

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:
Fani Sadrabadi, Z.S. and Alinaghian, M. 2026. An integrated problem of handling equipment scheduling and storage space allocation for inbound containers at container terminal, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.31-43. https://doi.org/10.24200/j65.2025.65278.2413

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

مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی برای کانتینرهای ورودی در پایانه‌های کانتینری

زهرا السادات فانی صدرآبادی و مهدی علینقیان *

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

*نویسنده مسئول (alinaghian@iut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۰

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

واژگان کلیدی:

مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله،

مسئله‌ی زمان‌بندی کامیون محوطه،

مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه،

تخصیص مکان ذخیره‌سازی،

نامعادله‌های معتبر.

چکیده

در پژوهش حاضر، مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله به‌عنوان مهم‌ترین مسئله‌ی کنار اسکله با مسائل زمان‌بندی کامیون‌ها، جرثقیل محوطه، و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به‌عنوان مسائل مطرح در محوطه به‌صورت یکپارچه بررسی شده است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح جدید با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی زمانی تکمیل کانتینرها و هزینه‌ی عملیاتی، شامل: هزینه‌ی تخلیه‌ی کانتینرها از کشتی، حمل آن‌ها به محوطه، و بارگذاری آن‌ها در محوطه ارائه شده است. مسئله‌ی اخیر از نظر پیچیدگی محاسباتی در دسته‌ی مسائل NP-hard قرار می‌گیرد. برای افزایش سرعت حل مدل، قیدهایی با عنوان نامعادله‌های معتبر معرفی و به مدل اضافه شده‌اند. به‌منظور اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، ۲۱ نمونه مسئله‌ی طراحی‌شده در نرم‌افزار گمز پیاده‌سازی و با حل‌کننده‌ی CPLEX اجرا شده‌اند. نتایج محاسباتی نشان داده‌اند که قیدهای مذکور موجب کاهش زمان حل شده‌اند. همچنین، در مسائل بزرگ‌تر، نامعادله‌های اخیر، میانگین درصد انحراف را از ۳/۰۸ به ۱/۷۸ درصد نسبت به حد پایین کاهش داده‌اند.

۱. مقدمه

پایانه‌های کانتینری، قطب مهم انتقال محموله در زنجیره‌ی تأمین جهانی هستند.[۱] از این رو، پایانه‌های کانتینری در سراسر جهان تلاش می‌کنند تا با افزایش حجم ترافیک کانتینرها همگام شوند. در نتیجه، بهبود کارایی پایانه‌های کانتینری برای رسیدگی به جریان فزاینده‌ی کانتینرها ضروری است.[۲] از طرفی، پایانه‌های کانتینری به‌دنبال تکمیل عملیات کشتی در سریع‌ترین زمان ممکن هستند؛ چرا که منجر به افزایش استفاده از منابع، افزایش گردش مالی کشتی، کاهش زمان انتظار کشتی، و افزایش رضایت مشتری می‌شود.[۳] افزایش تعداد پایانه‌های کانتینری در سراسر جهان باعث افزایش رقابت بین آن‌ها شده است. مشتریان جذب پایانه‌ای می‌شوند که تقاضای مشتریان را در سریع‌ترین زمان ممکن پاسخ دهد. این امر باعث شده است بنادر دریایی با جذب حجم بالاتر کشتی‌ها و محموله‌ها و همچنین برنامه‌ریزی و مدیریت کارامدتر، خود را از دیگران متمایز سازند؛ که این امر فقط با هماهنگی مناسب بین بخش‌های مختلف پایانه‌های کانتینری صورت می‌گیرد. به‌منظور افزایش کارایی پایانه‌های کانتینری، مسائل متنوعی براساس تقسیم‌بندی پایانه‌های کانتینری به دو بخش کناراسکله[۱] و محوطه[۲] مطرح می‌شوند. مسائل تخصیص اسکله[3] و تخصیص زمان‌بندی جرثقیل اسکله[۴] به‌عنوان مسائل کناراسکله و مسائل استقرار/زمان‌بندی جرثقیل محوطه[۵]، زمان‌بندی کامیون محوطه[۶]، مسیریابی وسائط نقلیه[۷]، کنترل ترافیک[۸]، و تخصیص مکان ذخیره‌سازی[۹] به‌عنوان مسائل محوطه مطرح می‌شوند.

در پایانه‌های کانتینری عملیات جابجایی کانتینرهای ورودی بدین صورت است

1 quayside
2 yard
3 berth allocation problem
4 quay crane assignment/scheduling problem
5 yard crane deployment/scheduling problem
6 yard truck scheduling problem
7 vehicle routing problem
8 traffic control
9 storage space allocation problem

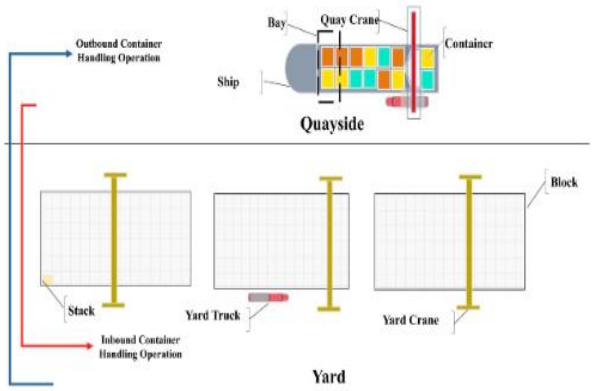
استناد به این مقاله:

فانی صدرآبادی، زهرا السادات و علینقیان، مهدی، ۱۴۰۴. مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی برای کانتینرهای ورودی در پایانه‌های کانتینری. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص. ۳۱-۴۳. https://doi.org/10.24200/j65.2025.65278.2413

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف



شکل ۱. عملیات جابجایی کانتینرها در پایانه‌ی کانتینری.

که عملیات تخلیه‌ی کانتینرها از کشتی توسط جرثقیل اسکله، حمل آن‌ها به محوطه توسط کامیون و بارگذاری‌شان در محوطه توسط جرثقیل محوطه انجام می‌گیرد؛ اما عملیات جابجایی کانتینرهای خروجی در خلاف جهت عملیات جابجایی کانتینرهای ورودی است. عملیات جابجایی کانتینرهای ورودی و خروجی در شکل ۱ نشان داده شده است.

یکی از چالش‌های اساسی و مهم پایانه‌های کانتینری، هماهنگی بین تجهیزات جابجایی (جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه) است؛ زیرا عملکرد هر یک از آن‌ها در دیگری اثرگذار است و هماهنگی ضعیف‌شان موجب افزایش زمان انتظار هر یک از تجهیزات و تأخیر در عملیات تخلیه/ بارگیری کشتی می‌شود. همچنین با رشد روزافزون کانتینرها، مکان ذخیره‌سازی کانتینرها نیز با محدودیت روبه‌رو شده‌اند. در نتیجه در پژوهش حاضر، مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی برای کانتینرهای ورودی بررسی شده است. در مسئله‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی به سه مورد پاسخ داده می‌شود:

۱) تخصیص هر تجهیز به کانتنیر به‌منظور عملیات جابجایی (تخلیه، حمل، و بارگذاری)،

۲) تعیین توالی تخلیه، حمل، و بارگذاری کانتینرها توسط هر یک از تجهیزات جاب‌جایی،

۳) تعیین زمان شروع و پایان عملیات تخلیه، حمل، و بارگذاری هر کانتینر.

همچنین مسئله‌ی تخصیص مکان ذخیره‌سازی نیز به تخصیص مناسب کانتینرها به مکان‌های ذخیره‌سازی می‌پردازد.

بررسی یکپارچه‌ی مسائل ذکرشده به چند دلیل ضروری است: کامیون محوطه به‌عنوان رابط بین بخش کناراسکله و محوطه عمل می‌کند.لذا، تجهیز اخیر در زمان تکمیل عملیات تخلیه‌ی کانتنیر توسط جرثقیل اسکله (تحویل کانتینر از جرثقیل اسکله و حمل آن به محوطه) و همچنین در زمان شروع عملیات بارگذاری کانتینر توسط جرثقیل محوطه (تحویل کانتینر به جرثقیل محوطه به‌منظور بارگذاری در مکان ذخیره‌سازی) تأثیر می‌گذارد. علاوه‌بر آن، تخصیص مکان ذخیره‌سازی در توالی و زمان‌بندی جرثقیل‌های محوطه و مسافت طی‌شده‌ی کامیون در محوطه نیز اثرگذار است.

۲. مرور ادبیات

مسائل متنوعی برای افزایش کارایی پایانه‌های کانتینری بررسی شده‌اند؛ اما برخی از زیرمسئله‌های مذکور، اهمیت بالاتری دارند. لذا، برخی از آن‌ها تعریف و ادبیات مربوط به آن‌ها بررسی شده است. تخصیص/ زمان‌بندی جرثقیل اسکله، یکی از مهم‌ترین زیرمسئله‌های مطرح در حوزه‌ی لجستیک دریایی است، که پژوهشگران آن‌ها را بسیار مطالعه می‌کنند. بیرورث و مایزل[1] (۲۰۱۵)،[۴] طرحی را برای طبقه‌بندی مدل‌های زمان‌بندی جرثقیل اسکله مطرح کرده‌اند، که مدل‌ها براساس ویژگی‌هایی که دارند، به چهار گروه تقسیم می‌شوند، که عبارت‌اند از: ۱) ویژگی کار (وظیفه)، ۲) ویژگی جرثقیل، ۳) ویژگی تداخل، و ۴) معیار عملکرد. ویژگی کار، به دسته‌بندی کانتینرهای موجود در کشتی برای رسیدگی توسط جرثقیل‌های اسکله اشاره دارد. مدت زمان آماده‌سازی، زمان سفر، پنجره‌ی زمانی، و موقعیت اولیه‌ی جرثقیل‌ها مربوط به دسته‌ی ویژگی‌های جرثقیل است. همچنین ویژگی تداخل، امکان عبور یا عدم عبور جرثقیل‌ها و فاصله‌ی ایمنی بین آن‌ها را مطرح می‌کند. درنهایت، توابع هدف بررسی‌شده در زیرمسئله‌ی مذکور به‌عنوان معیار عملکرد در نظر گرفته می‌شود، که یکی از متداول‌ترین معیارهای عملکرد، کمینه‌سازی زمان تکمیل کانتینرها (C_{max}) است. این دسته از مسائل برای نخستین بار توسط داگانزو[2] (۱۹۸۹)،[۵] مطرح شده‌اند. پس از آن پترکوفسکی[3] و داگانزو (۱۹۹۰)،[۶] برای حل مدل در ابعاد بزرگ، از روش شاخه و کران (B&B)[4] استفاده کرده‌اند. کیم و پارک (۲۰۰۴)،[۷] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MIP)[5] را برای مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل‌های اسکله با یک کشتی ارائه داده‌اند، که کارها به‌صورت گروهی و محدودیت‌های عدم‌عبور جرثقیل‌ها در آن در نظر گرفته شده‌اند. هدف از مطالعه‌ی اخیر، کمینه‌سازی مجموع وزنی بیشینه‌ی زمان تکمیل کانتینرها و زمان تکمیل عملیات جرثقیل‌های اسکله بوده است. پژوهش ایشان موردتوجه پژوهشگران بعدی قرار گرفت، به‌طوری که توکلی مقدم و همکاران (۲۰۰۸)،[۸] مدل ارائه‌شده‌ی کیم و پارک (۲۰۰۴)،[۷] را برای چند کشتی توسعه داده و برای پایانه‌ی کانتینری شهید رجایی با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها (هزینه‌های ثابت و متغیر تخصیص جرثقیل اسکله، هزینه‌ی خروج دیرهنگام یا زودهنگام کشتی) اعمال کرده‌اند. در مدل پیشنهادی ابوکاظم و دیابات[6] (۲۰۲۰)،[۹] هر بخش[7] کشتی فقط با یک جرثقیل اسکله خدمت‌دهی شده است؛ همچنین محدودیت‌های عدم عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر و فاصله‌ی ایمنی بین جرثقیل‌ها نیز لحاظ شده و برای حل مسئله به توسعه‌ی الگوریتم ژنتیک (GA) پرداخته شده است. الظاهری[8] و همکاران (۲۰۱۶)،[۱۰] به ارائه‌ی یک مدل جدید با درنظرگرفتن محدودیت‌های مربوط به پایداری کشتی، محدودیت‌های عملی نظیر عدم عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر، فاصله‌ی ایمنی بین آن‌ها، و زمان سفر جرثقیل‌ها پرداخته‌اند. سان[9] و همکاران (۲۰۱۹)،[۱۱] برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله از یک چارچوب حل تجزیه‌ی بندرز[10] (DB) مبتنی بر منطق استفاده کرده‌اند. لی و همکاران (۲۰۲۴)،[۱۲] یک مدل ریاضی دو مرحله‌ای را برای مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل

[1] Bierwirth & Meisel
[2] Daganzo
[3] Peterkofsky
[4] Branch and Bound
[5] Mixed Integer Programming Model
[6] Abou Kasm & Diabat
[7] bay
[8] Al-Dhaheri
[9] Sun
[10] Decomposition Benders

اسکله ارائه کرده‌اند. ایشان زمان تخلیه‌ی کانتینرها را از بخش‌های کشتی غیرقطعی در نظر گرفته و برای حل مدل، یک الگوریتم دقیق مبتنی بر الگوریتم تجزیه‌ی بندرز تولید ستون و محدودیت ارائه کرده‌اند. سان و همکاران (۲۰۲۴)،[۱۳] مسئله‌ی اخیر را برای هر دو عملیات تخلیه و بارگیری کانتینرها با هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل کانتینرها مطالعه کرده‌اند. همچنین، حرکت جرثقیل‌های اسکله را تحت شرایطی که امکان تغییر یا عدم‌تغییر جهت حرکت وجود داشته باشد، بررسی کرده‌اند.

مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه به‌عنوان دومین زیرمسئله‌ی مهم به‌شمار می‌رود. ویژگی‌های مطرح در فرمول‌بندی مسائل جرثقیل اسکله در مسائل جرثقیل محوطه نیز مطرح می‌شوند. انجی[۱۱] (۲۰۰۵)،[۱۴ و ۱۵] مسئله‌ی اخیر را با هدف کمینه‌سازی زمان انتظار کانتینرها برای پردازش توسط جرثقیل محوطه مطالعه کرده است. در همان سال، انجی و مک،[۱۶] مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه را با درنظرگرفتن محدودیت عدم‌تداخل جرثقیل‌ها با یکدیگر بررسی کرده و از یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر برنامه‌ریزی پویا برای حل مدل بهره برده‌اند. لی و همکاران (۲۰۰۹)،[۱۷] و هی و همکاران (۲۰۱۰)،[۱۸] هر دو برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه از روش افق غلتان استفاده کرده‌اند. هی و همکاران (۲۰۱۵)،[۱۹] مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه را با هدف کارایی پایانه‌های کانتینری از طریق زمان‌بندی مناسب جرثقیل‌های محوطه و صرفه‌جویی در مصرف انرژی مطالعه کرده‌اند. پس از آن هی و همکاران (۲۰۲۰)،[۲۰] به مسئله‌ی زمان‌بندی جرثقیل محوطه در شرایط عدم‌قطعیت (غیرقطعی‌بودن زمان تحویل کانتینرها به جرثقیل محوطه و تعداد کانتینرها) با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی ناشی از تأخیر تکمیل گروه کانتینرها در شرایط قطعی و هزینه‌های زیان در شرایط عدم‌قطعیت پرداخته‌اند. در پژوهش لیانگ[۱۲] و همکاران (۲۰۱۴)،[۲۱] به‌منظور کاهش دفعه‌های بازیابی کانتینرها، کانتینرها با ویژگی‌های یکسان در یک مکان ذخیره‌سازی انباشته شده و به منظور حل مسئله از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند. در مطالعه‌ی لیو و همکاران (۲۰۲۱)،[۲۲] برخلاف سایر پژوهش‌ها، جرثقیل‌های محوطه بین بلوک‌های مختلف به اشتراک گذاشته شده‌اند؛ که به‌طور قابل‌توجهی در کارایی پایانه‌ی کانتینری تأثیرگذار بوده است.

سومین زیرمسئله‌ی مهم، مسئله‌ی تخصیص مکان ذخیره‌سازی است، که به تخصیص موقت کانتینرهای ورودی (خروجی) به بلوک‌های ذخیره‌سازی در هر دوره‌ی زمانی می‌پردازد؛ که هدف آن متعادل‌کردن بار کاری بین بلوک‌ها به‌منظور کمینه‌سازی زمان بارگذاری (بازیابی) کانتینرهاست، که درنهایت باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود.[۲۳] ژانگ[۱۳] و همکاران (۲۰۰۳)،[۲۴] این مسئله را با استفاده از رویکرد افق غلتان حل کرده‌اند. برای هر افق برنامه‌ریزی، مسئله به دو سطح تجزیه می شود. سطح اول، به‌منظور تعادل بارکاری بین بلوک‌ها، و سطح دوم به‌منظور کمینه‌سازی فاصله‌ی جابجایی بین بلوک‌های ذخیره‌سازی و مکان پهلوگیری کشتی بوده است. بزازی و همکاران (۲۰۰۹)،[۲۳] به توسعه‌ی مدل ژانگ و همکاران (۲۰۰۳)،[۲۴] برای پایانه‌ی کانتینری شهید رجایی پرداخته و انواع کانتینرها (معمولی، خالی، و یخچالی) را بررسی کرده‌اند. در پژوهش لین و همکاران (۲۰۱۷)،[۲۵] تعداد حرکت جرثقیل‌ها به میزان کمینه رسیده است. ژانگ و همکاران (۲۰۱۹)،[۲۶] در پژوهش خود به‌دنبال تخصیص بهینه‌ی مکان‌های ذخیره‌سازی به‌منظور سریع‌ترشدن زمان تحویل سفارش مشتریان بوده‌اند؛ چرا که عملیات آماده‌سازی سفارش (فرآیند انتخاب و انتقال آن‌ها) یکی از زمان‌برترین عملیات است.

در سال‌های اخیر، به‌منظور افزایش هر چه بیشتر کارایی پایانه‌ی کانتینری، پژوهشگران به مطالعه‌ی یکپارچه‌ی مسائل پرداخته‌اند. در ادامه، مسئله‌ی یکپارچه‌ی جرثقیل اسکله و کامیون محوطه به‌عنوان اولین مسئله‌ی یکپارچه بررسی شده است. کائو[۱۴] و همکاران (۲۰۱۰)،[۲۷] و کاوشگر و هاین[۱۵] (۲۰۱۵)،[۲۸] یک مدل MIP برای حل مسئله‌ی یکپارچه با هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل کانتینرهای ورودی با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه داده‌اند. در مدل ارائه‌شده توسط تانگ[۱۶] و همکاران (۲۰۱۴)،[۲۹] هر بخش از کشتی فقط توسط یک جرثقیل اسکله می‌تواند تخلیه شود. همچنین، روابط تقدم کانتینرها و محدودیت‌های عدم عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر نیز به‌صورت کارآمد لحاظ شده است. ایشان برای حل مدل به توسعه‌ی الگوریتم PSO پرداخته و با الگوریتم ژنتیک پژوهش لی و همکاران (۲۰۰۸)،[۳۰] مقایسه کرده‌اند. هپ[۱۷] و همکاران (۲۰۲۱)،[۳۱] به توسعه‌ی مدل تانگ و همکاران (۲۰۱۴)،[۲۹] پرداخته‌اند. ژن و همکاران (2019)،[۳۲] به مطالعه‌ی مسئله‌ی یکپارچه با هدف کمینه‌سازی مجموع وزنی زمان تکمیل تخلیه‌ی کانتینرها و زمان تکمیل جرثقیل‌های اسکله پرداخته‌اند. شاف[۱۸] و همکاران (۲۰۲۱)،[۳۳] مسئله‌ی یکپارچه را با تک جرثقیل اسکله برای بندر طرابلس- لبنان با استفاده از الگوریتم شمارش دقیق و ژنتیک بررسی کرده‌اند.

مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه به‌عنوان دومین مسئله‌ی یکپارچه مطرح شده است. کین[۱۹] و همکاران (۲۰۲۰)،[۳۴] براساس جریان کارگاهی ترکیبی با دو رویکرد برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و برنامه‌ریزی محدودیت[۲۰] برای کانتینرهای ورودی، امکان عبور جرثقیل‌ها از یکدیگر، رعایت فاصله‌ی ایمنی، و زمان آماده‌سازی وابسته به توالی را در نظر گرفته‌اند.

هسو[۲۱] و همکاران (۲۰۲۱)،[۳۵] و هسو و همکاران (۲۰۲۲)،[۳۶] نیز مسئله‌ی یکپارچه‌ی اخیر را براساس طرح ذخیره‌سازی کشتی (VSP)[۲۲] و طرح ذخیره‌سازی محوطه (YSP)[23] با هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل کانتینرها مطالعه کرده‌اند. با توجه به ماهیت NP-hard بودن مسئله‌ی یکپارچه، در هر دو مطالعه‌ی مذکور برای حل مسئله از رویکردهای مبتنی بر شبیه‌سازی استفاده شده است.

می‌توان به مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به‌عنوان چهارمین مسئله‌ی یکپارچه اشاره کرد. کیزیلای[۲۴] و همکاران (۲۰۱۸)،[۳۷] برای دستیابی به افزایش بهره‌وری و هماهنگی بین

[11] Ng
[12] Liang
[13] Zhang
[14] Cao
[15] Kaveshgar & Huynh
[16] Tang
[17] Hop
[18] Skaf
[19] Qin
[20] Programming Constraints
[21] Hsu
[22] Vessel Stowage Plan
[23] Yard Storage Plan
[24] Kizilay

تجهیزات جابجایی و استفاده‌ی مؤثرتر از فضا، به ادغام مسئله‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و مسئله‌ی مکان ذخیره‌سازی کانتینرهای ورودی و خروجی با هدف کمینه‌سازی دامنه‌ی عملیات پرداخته و محدودیت‌هایی برای عدم عبور جرثقیل‌ها نیز در نظر گرفته‌اند. همچنین ایشان (۲۰۲۰)،[۳۸] در توسعه‌ی پژوهش قبلی خود، برای حل مسئله‌ی یکپارچه، چندین مدل CP پیشنهاد داده‌اند.

با توجه به مرور ادبیات صورت‌گرفته مشخص است که مسئله‌ی یکپارچه‌ی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به‌ندرت بررسی شده است. درنظرگرفتن مسئله‌ی تخصیص مکان ذخیره‌سازی بدون درنظرگرفتن سایر تجهیزات جابجایی منجر به افزایش زمان عملیات بارگذاری و بازیابی کانتینرها می‌شود، زیرا تخصیص نامناسب مکان ذخیره‌سازی، منجر به طی مسافت بیشتر و در پی آن افزایش زمان عملیات می‌شود. لذا، مسئله‌ی تخصیص مکان ذخیره‌سازی در عملیات سایر تجهیزات جابجایی (جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه) تأثیر می‌گذارد. همچنین مسئله‌ی مذکور در میزان تردد تجهیزات جابجایی و درنهایت، در زمان گردش کشتی نیز تأثیر مستقیم دارد. در نتیجه، ادغام مسئله‌ی تخصیص مکان ذخیره‌سازی و مسئله‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی علاوه‌بر سریع‌ترشدن عملیات جابجایی کانتینرها باعث کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل می‌شود، که به‌عنوان یک عامل کلیدی برای ارزیابی عملکرد اقتصادی پایانه‌های کانتینری و همچنین شرکت‌های حمل‌ونقل به‌شمار می‌رود. لذا، در پژوهش حاضر سعی شده است تا حد امکان، شکاف مطالعاتی پوشش داده شود. در جدول ۱، مقایسه‌ای بین پژوهش حاضر و مرتبط‌ترین پژوهش‌های پیشین ارائه شده است.

۳. مدل‌سازی ریاضی مسئله

۱.۳. تعریف مسئله

در پژوهش حاضر، مسئله‌ی یکپارچه‌ی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی به‌صورت یکپارچه بررسی شده است. همچنین در آن، به‌منظور تخلیه‌ی کانتینرها از کشتی و بارگذاری آن‌ها در محوطه، از مجموعه‌ای از جرثقیل‌های اسکله برای تخلیه‌ی کانتینرها از کشتی و تحویل آن‌ها به کامیون محوطه و همچنین از مجموعه‌ای از کامیون‌های محوطه برای حمل کانتینرها از کناراسکله به محوطه و تحویل آن‌ها به جرثقیل محوطه و نیز از مجموعه‌ای از جرثقیل‌های محوطه برای بارگذاری کانتینرها در محوطه استفاده شده است. همچنین مجموعه‌ای از بلوک‌های ذخیره‌سازی وجود دارند که هر بلوک از تعدادی پشته تشکیل شده است، که به‌عنوان مکان‌هایی موقت برای ذخیره‌سازی کانتینرها در نظر گرفته شده است. مسئله‌ی موردنظر به دنبال یافتن تخصیص بهینه‌ی هر کانتینر به تجهیزات جابجایی به‌منظور تخلیه، حمل، و بارگذاری، همچنین توالی بهینه و زمان‌بندی مناسب کانتینرها و تجهیزات جابجایی است؛ به‌طوری که تخصیص هر کانتینر به مکان ذخیره‌سازی به‌گونه‌ای صورت گیرد که علاوه‌بر رعایت ظرفیت خالی هر پشته، باعث افزایش سرعت فرآیند تخلیه و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل نیز شود. به‌طوری که تخصیص کانتینر به هر یک از تجهیزات جابجایی به‌گونه‌ای صورت گیرد که هر یک از تجهیزات، مدت زمان کمتری را برای تخلیه‌ی کانتینر، حمل، و بارگذاری آن سپری کنند. همچنین در مسئله‌ی حاضر مشخص شده است که توالی تخلیه، حمل، و بارگذاری کانتینرها به چه صورت انجام شود تا تجهیزات مدت زمان انتظار کمتری برای خدمت‌دهی به یکدیگر صرف کنند. در شکل ۱، بخش‌های مختلف پایانه‌ی کانتینری، تجهیزات جابجایی، و محوطه‌ی ذخیره‌سازی مشخص شده‌اند.

۲.۳ . مفروضات مسئله

- مکان پهلوگیری هر کشتی از قبل تعیین شده است.
- مکان هر کانتینر در کشتی مشخص است (هر کانتینر در کدام بخش از کشتی واقع شده است).
- هر کانتینر فقط توسط یک جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه می‌تواند خدمت‌دهی شود.

جدول ۱. مروری بر ادبیات موضوع.

Ref.	Year	Equipment			Storage Space Allocation	Objective Function	
		QC	YT	YC		Minimize Makespan	Minimize Equipment Operating Cost
Al-Dhaheri et al. [10]	2016	✔				✔	
Sun et al. [11]	2019	✔				✔	
Tang et al. [29]	2014	✔	✔			✔	
Kaveshgar & Huynh [28]	2015	✔	✔			✔	
Kizilay et al. [37]	2018	✔		✔	✔	✔	
Zhen et al. [32]	2019	✔	✔			✔	
Qin et al. [34]	2020	✔	✔	✔		✔	
Hop et al. [31]	2021	✔	✔			✔	
Skaf et al. [33]	2021	✔	✔			✔	
Hsu et al. [36]	2022	✔	✔	✔		✔	
Sun et al. [13]	2024	✔				✔	
Present Study	2024	✔	✔	✔	✔	✔	✔

- تجهیزات جابجایی به‌طور هم‌زمان نمی‌توانند دو کانتینر را جابجا کنند.
- ظرفیت مکان ذخیره‌سازی کانتینرها از قبل مشخص است.
- زمان پردازش هر یک از کانتینرها توسط تجهیزات جابجایی مشخص و قطعی است.
- در مسئله‌ی حاضر از تداخل جرثقیل‌ها با یکدیگر صرف‌نظر شده است.

۳.۳. نمادها

- مجموعه‌ها و اندیس‌ها

I: مجموعه‌ی کانتینرها (با i اندیس‌گذاری شده است).

E: مجموعه‌ی بخش‌های کشتی (با e اندیس‌گذاری شده است).

Q: مجموعه‌ی جرثقیل‌های اسکله (با q اندیس‌گذاری شده است).

D: مجموعه‌ی کامیون‌های محوطه (با d اندیس‌گذاری شده است).

Y: مجموعه‌ی جرثقیل‌های محوطه (با y اندیس‌گذاری شده است).

B: مجموعه‌ی بلوک‌ها (با b اندیس‌گذاری شده است).

Z: مجموعه‌ی مکان‌های ذخیره‌سازی (با z اندیس‌گذاری شده است).

Ψ: مجموعه‌ی روابط تقدم بین کانتینرها.

Z_b: مکان‌های ذخیره‌سازی متعلق به بلوک b.

B_y: بلوک‌های تحت مسئولیت جرثقیل محوطه‌ی y.

I_e: بخشی از کشتی که کانتینر i در آن قرار دارد.

- پارامترها

PQ_{iq}: زمان موردنیاز برای تخلیه‌ی کانتینر i .

PD_{idb}: زمان موردنیاز برای حمل کانتینر i.

PY_{iz}: زمان موردنیاز برای بارگذاری کانتینر i.

$PR_{yzz'}$: زمان موردنیاز برای حرکت از مکان ذخیره‌سازی z به مکان ذخیره‌سازی z' (اگر مکان‌های ذخیره‌سازی z و z' متعلق به بلوک یکسان باشند و توسط جرثقیل محوطه، یکسان بارگیری شوند، آنگاه $PR_{yzz'}=0$).

cap_z: ظرفیت هر مکان ذخیره‌سازی z.

CQ_{iq}: هزینه‌ی تخلیه‌ی کانتینر i توسط جرثقیل اسکله‌ی q.

CD_{idb}: هزینه‌ی حمل کانتینر i به بلوک b توسط کامیون محوطه‌ی d.

CY_{iyz}: هزینه‌ی بارگذاری کانتینر i در مکان ذخیره‌سازی z توسط جرثقیل محوطه‌ی y.

λ: ضریب تبدیل بیشترین زمان تکمیل (C_{max}) به هزینه.

M: عددی بزرگ.

- متغیرهای تصمیم

O_{iq}: اگر کانتینر i به جرثقیل اسکله‌ی q برای تخلیه تخصیص داده شود، مقدار آن ۱ و در غیر این‌صورت، صفر است.

X_{idb}: اگر کانتینر i توسط کامیون محوطه‌ی d به بلوک b حمل شود، مقدار آن ۱ و در غیر این‌صورت، صفر است.

k_{iyz}: اگر کانتینر i توسط جرثقیل محوطه‌ی y در مکان ذخیره‌سازی z بارگذاری شود، مقدار آن ۱ و در غیر این‌صورت، صفر است.

$F_{ii'}$: اگر تخلیه‌ی کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد، مقدار آن ۱ و در غیر این‌صورت، صفر است.

$G_{ii'}$: اگر حمل کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد، مقدار آن ۱ و در غیر این‌صورت، صفر است.

$H_{ii'}$: اگر بارگذاری کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد، مقدار آن ۱ و در غیر این‌صورت، صفر است.

STQ_i: زمان شروع تخلیه‌ی کانتینر i.

STD_i: زمان شروع حمل کانتینر i.

STY_i: زمان شروع بارگذاری کانتینر i.

C_{max}: بیشینه‌ی زمان تخلیه‌ی کانتینرها.

۴.۳. تابع هدف و محدودیت‌ها

$$Min\ V = \lambda C_{max} + \sum_{i\in I}\sum_{q\in Q} CQ_{iq}O_{iq} + \sum_{i\in I}\sum_{d\in D}\sum_{b\in B} CD_{idb}x_{idb} + \sum_{i\in I}\sum_{y\in Y}\sum_{z\in Z} CY_{iz}K_{iyz} \quad (1)$$

$$\sum_{q\in Q} O_{iq} = 1 \quad \forall(i\in I) \quad (2)$$

$$STQ_{i'} \geq STQ_i + PQ_{iq} - (3 - O_{iq} - O_{i'q} - F_{ii'})M \quad \forall(q\in Q,(i,i')\in I, i\neq i') \quad (3)$$

$$STQ_i \geq STQ_{i'} + PQ_{i'q} - (2 - O_{iq} - O_{i'q} + F_{ii'})M \quad \forall(q\in Q,(i,i')\in I, i\neq i') \quad (4)$$

$$STQ_i \geq STQ_{i'} + \sum_{q\in Q} PQ_{i'q}O_{i'q}M \quad \forall((i,i')\in \Psi) \quad (5)$$

$$\sum_{d\in D}\sum_{b\in B} X_{idb} = 1 \quad \forall(i\in I) \quad (6)$$

$$STD_{i'} \geq STD_i + PD_{idb} - (3 - x_{idb} - x_{i'db'} - G_{ii'})M \quad \forall(q\in Q,(i,i')\in I, i\neq i') \quad (7)$$

$$STD_i \geq STD_{i'} + PD_{i'db} - (2 - x_{idb} - x_{i'db'} + G_{ii'})M \quad \forall(q\in Q,(i,i')\in I, i\neq i') \quad (8)$$

$$STD_i \geq STQ_i + \sum_{q \in Q} PQ_{iq} O_{iq} \quad \forall (i \in I) \tag{9}$$

$$\sum_{z \in Z_b} \sum_{i \in I} K_{izy} = 0 \quad \forall (y \in Y, b \in B_y) \tag{10}$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{d \in D} X_{idb} \leq \sum_{z \in Z_b} cap_z \quad \forall (b \in B) \tag{11}$$

$$\sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} K_{izy} \leq \sum_{z \in Z} cap_z \quad \forall (z \in Z) \tag{12}$$

$$\sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z_b} K_{izy} = 1 \quad \forall (i \in I, b \notin B_y) \tag{13}$$

$$STY_{i'} \geq STY_i + PY_{iz} + PR_{zz'y} - (3 - K_{izy} - K_{i'z'y} - H_{ii'})M \quad \forall (q \in Q, (i,i') \in I, i \neq i') \tag{14}$$

$$STY_i \geq STY_{i'} + PY_{i'z'} + PR_{zz'y} - (2 - K_{izy} - K_{i'z'y} + H_{ii'})M \quad \forall (q \in Q, (i,i') \in I, i \neq i') \tag{15}$$

$$STY_i \geq STD_i + \sum_{d \in D} \sum_{b \in B} PD_{idb} x_{idb} \quad \forall (i \in I) \tag{16}$$

$$C_{max} \geq STY_i + \sum_{y \in Y} \sum_{z \in Z} PY_{iz} K_{izy} \quad \forall (i \in I) \tag{17}$$

$$O_{iq} \in \{0,1\} \quad \forall (i \in I, q \in Q) \tag{18}$$

$$X_{idb} \in \{0,1\} \quad \forall (i \in I, d \in D, b \in B,)$$

$$K_{izy} \in \{0,1\} \quad \forall (i \in I, z \in Z, y \in Y)$$

$$F_{ii'} \in \{0,1\} \quad \forall ((i,i') \in I)$$

$$G_{ii'} \in \{0,1\} \quad \forall ((i,i') \in I)$$

$$H_{ii'} \in \{0,1\} \quad \forall ((i,i') \in I)$$

$$STQ_i \quad \forall (i \in I)$$

$$STD_i \geq 0 \quad \forall (i \in I)$$

$$STY_i \geq 0 \quad \forall (i \in I)$$

$$C_{max} \geq 0$$

در مدل بهینه‌سازی پیشنهادی، محدودیت ۱، تابع هدف را نشان می‌دهد که شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها (هزینه‌ی زمانی تکمیل کانتینرها و هزینه‌ی عملیاتی (تخلیه، حمل، و بارگذاری)) است. محدودیت ۲، تضمین می‌کند هر کانتینر به یک جرثقیل اسکله تخصیص یابد. محدودیت‌های ۳ و ۴، زمان شروع و پایان تخلیه‌ی دو کانتینر توسط جرثقیل اسکله‌ی یکسان را نشان می‌دهند ($O_{iq}=1$, $O_{i'q}=1$). اگر تخلیه‌ی کانتینر i' بعد از کانتینر i باشد، محدودیت ۳ فعال می‌شود؛ در غیر این‌صورت، محدودیت ۴ فعال می‌شود. زمان شروع و پایان تخلیه‌ی کانتینرها با روابط تقدمی در محدودیت ۵ بیان می‌شود. محدودیت ۶ تضمین می‌کند هر کانتینر به یک کامیون محوطه برای حمل به بلوک b تخصیص یابد. محدودیت‌های ۷ و ۸، زمان شروع و پایان حمل دو کانتینر را توسط کامیون محوطه‌ی یکسان نشان می‌دهند (مطابق با توضیحات محدودیت‌های ۴ و ۵). محدودیت ۹، زمان تکمیل مرحله‌ی تخلیه‌ی هر کانتینر (زمان شروع مرحله‌ی حمل) را مشخص می‌کند. محدودیت ۱۰ بیان می‌کند در صورت تخصیص یک کانتینر به یک مکان ذخیره‌سازی، جرثقیل تحت مسئولیت آن مکان فعال شود. محدودیت‌های ۱۱ و ۱۲، مربوط به کنترل ظرفیت مکان‌های ذخیره‌سازی هستند. محدودیت ۱۳ تضمین می‌کند هر کانتینر باید به یک جرثقیل محوطه برای بارگذاری در مکان ذخیره‌سازی z تخصیص یابد. محدودیت‌های ۱۴ و ۱۵، زمان شروع و پایان بارگذاری کانتینرها را نشان می‌دهند. محدودیت ۱۶، زمان تکمیل مرحله‌ی حمل (زمان شروع مرحله‌ی بارگذاری) را مشخص می‌کند. دیرترین زمان تکمیل تخلیه‌ی کانتینرها (یعنی زمانی که آخرین کانتینر توسط جرثقیل محوطه بارگذاری می‌شود)، به‌عنوان $C_{\max}$ در محدودیت ۱۷ محاسبه می‌شود. درنهایت، در محدودیت ۱۸، دامنه‌ی تغییرات متغیرها مشخص شده است.

۴. نامعادله‌های معتبر[25]

با توجه به اینکه مسئله‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی به‌عنوان یک مسئله‌ی NP-hard شناخته می‌شود،[۳۳] در نتیجه درنظرگرفتن مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات و تخصیص مکان ذخیره‌سازی کانتینرها از درجه‌ی سختی مسئله نمی‌کاهد. ممکن است به‌دلیل پیچیدگی مسئله، سرعت حل مدل در به‌دست‌آوردن جواب بهینه کاهش یابد. در نتیجه، اضافه‌کردن قیدهایی با عنوان نامعادله‌های معتبر منجر به کاهش فضای جستجو می‌شود. در این صورت ممکن است منجر به کاهش زمان حل مسئله شود. با توجه به مدل پیشنهادی می‌توان نامعادله‌های ۱۹ الی ۲۴ را به مدل اضافه کرد:

$$F_{ii'} + F_{i'i} \leq 1 \quad \forall ((i,i') \in I, i \neq i') \tag{19}$$

$$F_{ii''} \geq F_{ii'} + F_{i'i''} - 1 \quad \forall ((i,i',i'') \in I, i \neq i', i \neq i'') \tag{20}$$

$$G_{ii'} + G_{i'i} \leq 1 \quad \forall ((i,i') \in I, i \neq i') \tag{21}$$

$$G_{ii''} \geq G_{ii'} + G_{i'i''} - 1 \quad \forall ((i,i',i'') \in I, i \neq i', i \neq i'') \tag{22}$$

$$H_{ii'} + H_{i'i} \leq 1 \quad \forall ((i,i') \in I, i \neq i') \tag{23}$$

$$H_{ii''} \geq H_{ii'} + H_{i'i''} - 1 \quad \forall ((i,i',i'') \in I, i \neq i', i \neq i'' \tag{24}$$

محدودیت ۱۹ نشان می‌دهد اگر تخلیه‌ی کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد ($F_{ii'}=1$)، آنگاه دیگر تخلیه‌ی کانتینر i' نمی‌تواند قبل از کانتینر i باشد

[25] Valid inequalities

$F_{ii'}=0$) یا ممکن است دو کانتینر هیچ ارتباطی با یکدیگر نداشته باشند ($F_{ii'}=0$ و $F_{i'i}=0$). محدودیت ۲۰ بیان می‌کند در صورتی که تخلیه‌ی کانتینر i قبل از کانتینر i' باشد ($F_{ii'}=1$) و تخلیه‌ی کانتینر i' نیز قبل از کانتینر i'' باشد($F_{i'i''}=1$)؛ آنگاه تخلیه‌ی کانتینر i حتماً قبل از کانتینر i'' است ($F_{ii''}=1$). به‌طور مشابه، برای مرحله‌ی حمل توسط کامیون محوطه و بارگذاری توسط جرثقیل محوطه نیز می‌توان محدودیت‌های ۲۱ الی ۲۴ را در نظر گرفت.

۵. نتایج محاسباتی

۱.۵. مثال عددی

در بخش کنونی، به بررسی یک مطالعه‌ی عددی با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده در جدول ۲ پرداخته شده است. نمونه‌ی مسئله با ۷ کانتینر، یک جرثقیل اسکله، دو کامیون محوطه، دو بلوک ذخیره‌سازی تحت مسئولیت جرثقیل‌های ۱ و ۲ با سه مکان ذخیره‌سازی منتخب بررسی شده‌اند. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی برای نمونه‌ی مذکور در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

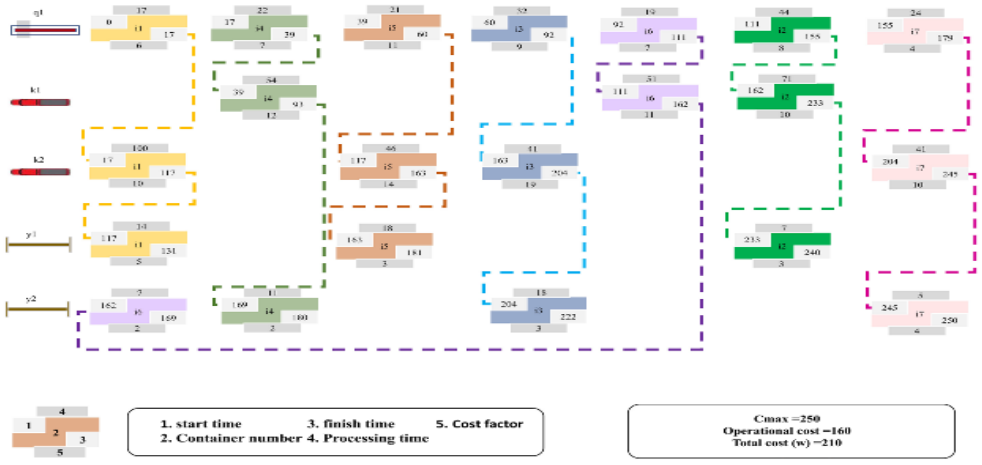
در شکل ۲، تخصیص کانتینرها به هریک از تجهیزات جابجایی، توالی، و زمان‌بندی (زمان‌های شروع و پایان) هر کانتینر و تجهیزات جابجایی، ضرایب هزینه‌ی هر یک از عملیات تخلیه، حمل، و بارگذاری هر کانتینر، بیشینه‌ی زمان تکمیل کانتینرها (C_{max})، هزینه‌ی عملیاتی (شامل هزینه‌ی عملیات تخلیه، بارگیری، و بارگذاری کانتینر توسط هر یک از تجهیزات جابجایی) و هزینه‌ی کل (شامل هزینه‌ی زمانی تکمیل کانتینرها و هزینه‌ی عملیاتی) مشاهده می‌شود. همچنین مقادیر بهینه‌ی حاصل از نمونه‌ی مذکور در پیوست‌های ۱ الی ۵ ارائه شده‌اند. این تذکر لازم است که فقط در صورتی عملیات کانتینر توسط تجهیز جابجایی جدید شروع می‌شود که عملیات مرحله‌ی قبل آن توسط تجهیز دیگر تکمیل شده باشد. همچنین تجهیز جابجایی جدید نیز در حال خدمت‌دهی به کانتینر دیگر نباشد.

۲.۵. تولید نمونه

- تمامی نمونه‌ها براساس چیدمان ارائه‌شده در شکل ۱ هستند. همچنین اساس تولید آن‌ها براساس اطلاعات مطرح در ادبیات موضوع با توجه به ساختار مسئله بوده است، تا شرایط شدنی‌بودن مسئله برقرار باشد.
- با بهره‌گیری از اطلاعات پژوهش لو[۲۶] و همکاران (۲۰۱۶)،[۳۹] مدت‌زمان تخلیه‌ی هر کانتینر توسط جرثقیل‌های اسکله به‌صورت تصادفی در بازه‌ی یکنواخت [۵۰ ، ۱۰]، مدت‌زمان موردنیاز برای حمل هر کانتینر به مکان تحویل بلوک مرتبط توسط کامیون محوطه به‌صورت تصادفی در بازه‌ی [۱۰۰ ,۳۰]، و مدت زمان بارگذاری کانتینر در پشته‌ی تخصیص داده‌شده توسط جرثقیل محوطه به‌صورت تصادفی در بازه‌ی [۵, ۲۵] تولید می‌شود.
- هزینه‌ی تخلیه‌ی هر کانتینر توسط جرثقیل اسکله به‌صورت تصادفی در بازه‌ی [۵۰ ,۱۰]، هزینه‌ی حمل هر کانتینر توسط کامیون محوطه به‌صورت

جدول ۲. داده‌های ورودی مدل پیشنهادی
(مجموعه/ پارامترهای تعریف‌شده برای نمونه‌ی مسئله‌ی موردنظر).

Set/parameter	value
I	|7|
E	|2|
Q	|1|
D	|2|
B	|2|
Z	|2|
Y	|2|
Z_{b_1}	|2|
Z_{b_2}	|1|
cap_{z_1}	5
cap_{z_2}	6
cap_{z_3}	7
λ	0.2



شکل ۲. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی.

[26] Luo

جدول ۳. نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی.

No.	c	q/d/y/b/z	Model with Valid Inequalities				Model with Valid Inequalities			
			Obj. Val.	LB	CPU Time	GAP 1 (%)	Obj. Val.	LB	CPU Time	GAP 2 (%)
1	5	3/1/1/1/1	205.6	205.6	1	0	205.6	205.6	1	0
2	5	4/2/1/2/1	153.8	153.8	1	0	153.8	153.8	<0	0
3	5	3/2/1/3/1	159.4	159.4	2	0	159.4	159.4	1	0
4	6	3/1/1/1/1	308.6	308.6	1	0	308.6	308.6	<0	0
5	6	4/2/1/2/1	202.2	202.2	6	0	202.2	202.2	4	0
6	6	3/2/1/3/1	197	197	5	0	197	197	4	0
7	7	3/1/1/1/1	340.6	340.6	10	0	340.6	340.6	4	0
8	7	4/2/1/2/1	231.4	231.4	11	0	231.4	231.4	8	0
9	7	3/2/1/3/1	227	227	7	0	227	227	6	0
10	8	3/2/1/1/1	307.13	307.13	346	0	307.13	307.13	187	0
11	8	4/2/1/2/1	282.43	282.43	11	0	282.43	282.43	8	0
12	8	3/2/2/3/1	269.11	269.11	89	0	269.11	269.11	73	0
13	9	3/2/2/2/1	296.6	296.6	402	0	296.6	296.6	352	0
14	9	3/2/2/3/1	262.8	262.8	126	0	262.8	262.8	60	0
15	9	4/2/2/4/1	290.2	290.2	57	0	290.2	290.2	71	0
16	10	4/2/2/3/2	294.8	294.8	412	0	294.8	294.8	150	0
17	10	5/3/2/4/2	283.1	283.1	56	0	283.1	283.1	51	0
18	10	6/3/2/5/2	285.5	285.5	125	0	285.5	285.5	83	0
19	15	5/3/2/3/2	405.4	394.42	3600	2.69	398.8	391.58	3600	1.81
20	15	6/3/3/4/3	383.8	372.8	3600	2.86	376.7	371.6	3600	1.35
21	15	7/3/3/5/3	379.4	365.3	3600	3.71	371.4	363.2	3600	2.2
Average						3.08				1.78

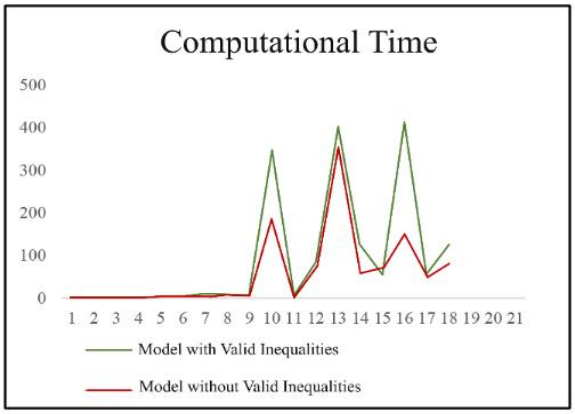
Note: Obj. Val. = Objective Function Value;
LB: Lower Bound;
CPU Time = Computational Time

تصادفی در بازه‌ی [۱۰۰, ۳۰]، و هزینه‌ی بارگذاری هر کانتینر به‌صورت تصادفی در بازه‌ی [۲۵, ۵] با الهام از اطلاعات پژوهش توکلی مقدم و همکاران (۲۰۰۹)،[۸] تولید می‌شود.

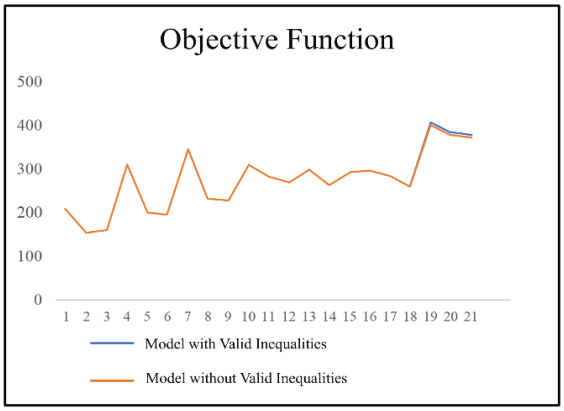
۳.۵. نتایج عددی

برای حل مسائل، تعداد کانتینرها (i) در بازه‌ی [۱۰, ۷]، تعداد جرثقیل‌های اسکله (q) در بازه‌ی [۳, ۱]، تعداد کامیون‌های محوطه (d) در بازه‌ی [۷, ۲]، تعداد جرثقیل‌های محوطه‌ی فعال (y) در بازه‌ی [۲, ۱]، تعداد بلوک‌های ذخیره‌سازی (b) در بازه‌ی [۴, ۲]، و تعداد مکان‌های ذخیره‌سازی(l) در بازه‌ی [۷, ۳] در نظر گرفته شده‌اند. همچنین سایر پارامترهای پیشنهادی براساس توضیحات بخش ۲.۵ تنظیم شده‌اند.

نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر و بدون درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر در جدول ۳ ارائه شده است؛ که در آن، به‌ترتیب اطلاعات ورودی هر نمونه، حد پائین، مقدار تابع هدف، مدت زمان



شکل ۳. مقایسه‌ی زمان محاسباتی مدل بدون درنظرگرفتن و با درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر.



شکل ۴. مقایسه‌ی تابع هدف مدل بدون درنظرگرفتن و با درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر.

محاسباتی بر حسب ثانیه، و درصد انحراف (GAP) جواب به‌دست‌آمده از حد پائین ارائه شده است. نتایج حاصل از جدول ۳ نشان می‌دهند که درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر منجر به افزایش سرعت حل مسئله برای دست‌یابی به جواب بهینه شده است (شکل ۳). همچنین براساس نتایج جدول اخیر که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود، در ۱۷ نمونه، مسئله‌ی اول جواب‌های حاصل از مدل با درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر منطبق بر جواب‌های حاصل از مدل بدون درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر است. از طرفی در نمونه‌ی مسئله‌های ۲۱-۱۸ مدل پیشنهادی در بازه‌ی زمانی ۱ ساعته قادر به دست‌یابی به جواب بهینه نبوده است. مدل پیشنهادی با درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر به جوابی با میانگین ۱/۷۸٪ نسبت به حد پائین به‌دست‌آمده از مدل به جواب رسیده است. این در حالی است که مدل پیشنهادی بدون درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر به جوابی با میانگین انحراف ۳/۰۸٪ نسبت به حد پایین، به جواب دست پیدا کرده است. لذا جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل پیشنهادی با درنظرگرفتن نامعادله‌های معتبر، کیفیت بالاتری داشته‌اند.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

پایانه‌ی کانتینری، قطب مهم انتقال محموله در زنجیره‌ی تأمین جهانی است. امروزه، رشد مستمر حمل‌ونقل کانتینری، الزام‌های بیشتری را برای کارایی عملیاتی خطوط کشتیرانی و پایانه‌های کانتینری مطرح می‌کند. تجهیزات جابجایی (جرثقیل اسکله، کامیون محوطه، و جرثقیل محوطه) از منابع اصلی در پایانه‌های کانتینری هستند، که عملکرد آن‌ها در یکدیگر تأثیر متقابل دارد و برنامه‌ریزی نامناسب هر یک از آن‌ها در برنامه‌ریزی سایرین، تأثیر منفی می‌گذارد. همچنین با رشد روزافزون تعداد کانتینرها، محوطه‌ی ذخیره‌سازی کانتینرها نیز با محدودیت ظرفیت روبه‌رو هستند. از طرفی مکان ذخیره‌سازی کانتینرها در مدت‌زمان خدمت‌دهی سایر تجهیزات نیز اثرگذار است. در نتیجه، به‌منظور افزایش کارایی عملیات تخلیه‌ی کانتینرها از کشتی، حمل آن‌ها به محوطه و درنهایت، ذخیره‌سازی آن‌ها در محوطه به ادغام اصلی‌ترین مسائل کناراسکله و محوطه پرداخته شده است، که منجر به نزدیک‌ترشدن به واقعیت نیز شده است. با توجه به مفروضات مطرح‌شده، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح جدید برای مسئله‌ی یکپارچه‌ی زمان‌بندی تجهیزات جابجایی و تخصیص مکان ذخیره‌سازی ارائه شده است. در مدل ذکرشده تخصیص کانتینرها به مکان‌های ذخیره‌سازی و همچنین تخصیص آن‌ها به هر یک از تجهیزات جابجایی به‌گونه‌ای انجام شده است که در سریع‌ترین زمان ممکن، کانتینرها از کشتی تخلیه و در محوطه بارگذاری شوند و کمترین هزینه‌ی عملیاتی را در پی داشته باشند. به‌منظور ارزیابی مدل پیشنهادی، نمونه‌های طراحی‌شده در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS پیاده‌سازی و با حل‌کننده‌ی CPLEX اجرا شده‌اند. همچنین با توجه به پیچیدگی مسئله‌ی یکپارچه و تسریع روند حل، نامعادله‌های معتبر متناسب با ساختار مسئله، معرفی و به مدل اضافه شده‌اند. نتایج محاسباتی بیانگر کارایی مدل پیشنهادی در دست‌یابی به جواب بهینه است. همچنین اضافه‌کردن نامعادله‌های معتبر منجر به تسریع روند حل شده و در نمونه‌ی مسائلی که CPLEX در بازه‌ی زمانی مشخص، قادر به دست‌یابی به جواب بهینه نبوده است، اضافه‌شدن نامعادله‌های معتبر منجر به دست‌یابی به جواب‌هایی با میانگین درصد خطای کمتری نسبت به حالتی که نامعادله‌های معتبر اضافه نشده‌اند، شده است. با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر، پیشنهادهایی برای مطالعه‌های آتی مطرح شده‌اند، که عبارت‌اند از:

۱) برای یکپارچه‌سازی هر چه بیشتر مسئله‌ی پیشنهادی و نزدیک‌ترشدن آن به واقعیت، علاوه‌بر عملیات تخلیه، عملیات بارگیری کشتی نیز در نظر گرفته شود.

۲) در مسئله‌ی حاضر از تداخل جرثقیل‌های اسکله صرف‌نظر شده است، اما در عمل فاصله‌های ایمنی بین جرثقیل‌ها باید رعایت شود، که این فرض نیز می‌تواند به مسئله اضافه شود.

۳) برای کاهش پیچیدگی مسئله، هر تجهیز فقط در یک واحد زمانی می‌تواند به یک کانتینر خدمت‌دهی کند؛ در حالی که با درنظرگرفتن جرثقیل‌های اسکله‌ی دوبازویی یا تریلرهای چندگانه، می‌توان به بیش از یک کانتینر در آن واحد خدمت‌دهی کرد.

۴) می‌توان مسئله‌ی پیشنهادی را در حوزه‌ی سبز با تابع هدف کمینه‌سازی کاهش سوخت مصرفی کامیون‌های محوطه و کاهش انتشار آلاینده‌های گلخانه‌ای مطرح کرد.

References - منابع

1. Li, S., Jia, S., Tao, Y. and Lin, X., 2024. Gate appointment design in a container terminal: A robust optimization approach. *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, *184*, pp.103495.

   doi: https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103495

2. Statista, 2022. Size of container ship fleet 2022, by nationality of operator. *Statista*. Available at: https://www.statista.com/statistics/263858/container (Accessed: 11 February 2026).

3. Azevedo, A.T., de Salles Neto, L.L., Chaves, A.A. and Moretti, A.C., 2018. Solving the 3D stowage planning problem integrated with the quay crane scheduling problem by representation by rules and genetic algorithm. *Applied Soft Computing*, *65*, pp.495–516. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.01.006

4. Bierwirth, C. and Meisel, F., 2015. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal Of Operational Research*, *244*(3), pp.675–689. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.030

5. Daganzo, C.F., 1989. The crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, *23*(3), pp.159–175. https://doi.org/10.1016/0191-2615(89)90001-5

6. Peterkofsky, R.I. and Daganzo, C.F., 1990. A branch and bound solution method for the crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, *24*(3), pp.159–172. https://doi.org/10.1016/0191-2615(90)90014-P

7. Kim, K.H. and Park, Y.-M., 2004. A crane scheduling method for port container terminals. *European Journal Of Operational Research*, *156*(3), pp.752–768.

   https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00133-4

8. Tavakkoli-Moghaddam, R., Makui, A., Salahi, S., Bazzazi, M. and Taheri, F., 2009. An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports. *Computers & Industrial Engineering*, *56*(1), pp.241–248. https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.05.011

9. Abou Kasm, O. and Diabat, A., 2020. Next-generation quay crane scheduling. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *114*, pp.694–715. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.02.015

10. Al-Dhaheri, N., Jebali, A. and Diabat, A., 2016. The quay crane scheduling problem with nonzero crane repositioning time and vessel stability constraints. *Computers & Industrial Engineering*, *94*,pp.230–244. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.011

11. Sun, D., Tang, L. and Baldacci, R., 2019. A Benders decomposition-based framework for solving quay crane scheduling problems. *European Journal Of Operational Research*, *273*(2), pp.504–515. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.009

12. Li, Y., Li, X., Zhang, C. and Wu, T., 2024. Decomposition algorithms for the robust unidirectional quay crane scheduling problems. *Computers & Operations Research*, *167*, pp.106670. https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106670

13. Sun, D., Tang, L., Baldacci, R. and Chen, Z., 2024. A decomposition method for the group-based quay crane scheduling problem. *INFORMS Journal On Computing*,*36*,pp.543–570. https://doi.org/10.1287/ijoc.2022.0298

14. Ng, W., 2005. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference. *European Journal Of Operational Research*, *164*(1), pp.64–78. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.025

15. Ng, W., 2005. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference. *European Journal Of Operational Research*, *164*(1), pp.64–78. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.025

16. Ng, W. and Mak, K., 2005. Yard crane scheduling in port container terminals. *Applied Mathematical Modeling*, *29*, pp.263–276.

17. Li, W., Wu, Y., Petering, M.E., Goh, M. and De Souza, R., 2009. Discrete-time model and algorithms for container yard crane scheduling. *European Journal Of Operational Research*, *198*(1), pp.165–172. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.08.019

18. He, J., Chang, D., Mi, W. and Yan, W., 2010. A hybrid parallel genetic algorithm for yard crane scheduling. *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, *46*(1), pp.136–155. https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.07.002

19. He, J., Huang, Y. and Yan, W., 2015. Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption. *Advanced Engineering Informatics*, *29*(1), pp.59–75. https://doi.org/10.1016/j.aei.2014.09.003

20. He, J., Tan, C. and Zhang, Y., 2019. Yard crane scheduling problem in a container terminal considering risk caused by uncertainty. *Advanced Engineering Informatics*, *39*, pp.14–24. https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.11.004

21. Liang, C.-J., Chen, M., Gen, M. and Jo, J., 2014. A multi-objective genetic algorithm for yard crane

scheduling problem with multiple work lines. *Journal Of Intelligent Manufacturing*, *25*, pp.1013–1024. https://doi.org/10.1007/s10845-013-0792-4

22. Liu, W., Zhu, X., Wang, L., Yan, B. and Zhang, X., 2021. Optimization approach for yard crane scheduling problem with uncertain parameters in container terminals. *Journal Of Advanced Transportation*,pp.1–15. https://doi.org/10.1155/2021/5537114
23. Bazzazi, M., Safaei, N. and Javadian, N., 2009. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal. *Computers & Industrial Engineering*, *56*(1), pp.44–52. https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.03.012
24. Zhang, C., Liu, J., Wan, Y.-W., Murty, K.G. and Linn, R.J., 2003. Storage space allocation in container terminals. *Transportation Research Part B: Methodological*, *37*(10), pp.883–903. https://doi.org/10.1016/S0191-2615(02)00089-9
25. Lin, D.- and Chiang, C.-W., 2017. The storage space allocation problem at a container terminal. *Maritime Policy & Management*, *44*(6), pp.685–704. https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1335897
26. Zhang, R.-Q., Wang, M. and Pan, X., 2019. New model of the storage location assignment problem considering demand correlation pattern. *Computers & Industrial Engineering*, *129*, pp.210–219. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.027
27. Cao, J., Shi, Q. and Lee, D.-H., 2010. Integrated quay crane and yard truck schedule problem in container terminals. *Tsinghua Science & Technology*,*15*(4),pp.467–474. https://doi.org/10.1016/S1007-0214(10)70089-4
28. Kaveshgar, N. and Huynh, N., 2015. Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers. *International Journal Of Production Economics*, *159*, pp.168–177. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.028
29. Tang, L., Zhao, J. and Liu, J., 2014. Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem. *European Journal Of Operational Research*,*236*(3),pp.978–990. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.050
30. Lee, D.-H., Wang, H.Q. and Miao, L., 2008. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, *44*(1), pp.124–135. https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.08.001
31. Hop, D.C., Van Hop, N. and Anh, T.T.M., 2021. Adaptive particle swarm optimization for integrated quay crane and yard truck scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, *153*, pp.107075. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.107075
32. Zhen, L., Yu, S., Wang, S. and Sun, Z., 2019. Scheduling quay cranes and yard trucks for unloading operations in container ports. Annals Of Operations Research, pp.455–478. https://doi.org/10.1007/s10479-016-2335-9
33. Skaf, A., Lamrous, S., Hammoudan, Z. and Manier, M.-A., 2021. Integrated quay crane and yard truck scheduling problem at the port of Tripoli-Lebanon. *Computers & Industrial Engineering*, *159*, pp.107448. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107448
34. Qin, T., Du, Y., Chen, J.H. and Sha, M., 2020. Combining mixed integer programming and constraint programming to solve the integrated scheduling problem of container handling operations of a single vessel. *European Journal Of Operational Research*,*285*(3),pp.884–901. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.02.021
35. Hsu, H.-P., Wang, C.-N., Fu, H.-P. and Dang, T.-T., 2021. Joint scheduling of yard crane, yard truck, and quay crane for container terminal considering vessel stowage plan: An integrated simulation-based optimization approach. *Mathematics*, *9*(18), pp.22– https://doi.org/10.3390/math9182236
36. Hsu, H.-P., Chou, C.-C. and Wang, C.-N., 2022. Heuristic/metaheuristic-based simulation optimization approaches for integrated scheduling of yard crane, yard truck, and quay crane considering import and export containers. *IEEE Access*, *10*, pp.64650–64670.10.1109/ACCESS.2022.3180752
37. Kizilay, D., Eliiyi, D.T. and Van Hentenryck, P., 2018. Constraint and mathematical programming models for integrated port container terminal operations. In: W.J. van Hoeve (ed.) *Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research - 15th International Conference, CPAIOR 2018, Delft, The Netherlands, June 26–29, 2018, Proceedings*, pp.344–360. Springer, Lecture Notes in Computer Science, *10848*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93031-2_25
38. Kizilay, D., Van Hentenryck, P. and Eliiyi, D.T., 2020. Constraint programming models for integrated container terminal operations. *European Journal Of Operational Research*, *286*(3), pp.945–962. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.025
39. Luo, J., Wu, Y. and Bergsten Mendes, A., 2016. Modelling of integrated vehicle scheduling and container storage problems in unloading process at an automated container terminal. *Computers & Industrial Engineering*, *94*, pp.32–44. https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.010

"پیوست‌ها"

پیوست ۱- مقادیر بهینه تخصیص هر کانتینر به کامیون محوطه برای حمل به بلوک ذخیره‌سازی (X_{idb}) توسط CPLEX.

X_{idb}		i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
d_1	b_1		1					
	b_2				1		1	
d_2	b_1			1				1
	b_2	1				1		

پیوست ۲- مقادیر بهینه تخصیص هر کانتینر به جرثقیل محوطه برای بارگذاری در مکان ذخیره‌سازی (K_{iyz}) توسط CPLEX.

K_{iyz}		i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
y_1	z_1		1			1		
	z_2	1						
	z_3							
y_2	z_1							
	z_2							
	z_3			1	1		1	1

پیوست ۳- مقادیر بهینه توالی تخلیه کانتینرها ($F_{ii'}$) توسط CPLEX.

$F_{ii'}$	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1			1		1		1
i_2							
i_3							1
i_4		1				1	
i_5			1				1
i_6							
i_7		1					

پیوست ۴. مقادیر بهینه‌ی توالی حمل کانتینرها ($G_{ii'}$) توسط CPLEX.

$G_{ii'}$	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1			1		1		1
i_2							
i_3							1
i_4		1				1	
i_5			1				1
i_6							
i_7		1					

پیوست ۵. مقادیر بهینه‌ی توالی حمل کانتینرها ($H_{ii'}$) توسط CPLEX.

$H_{ii'}$	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6	i_7
i_1		1			1		
i_2							
i_3							1
i_4							1
i_5		1					1
i_6			1	1			1
i_7	1	1					

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 45-61

Sharif University of Technology

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



Research Article

Topic Modeling and Sentiment Analysis of Customers Using Natural Language Processing and Machine Learning Techniques

Razieh Rahimi[1] and Reza Ghasemy Yaghin[*2]

[1]Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
[2]Department of Industrial Engineering and Management Systems, Amirkabir University of Technology.
* corresponding author: (yaghin@aut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:15 October 2024

Revised:15 January 2025

Accepted:10 March 2025

Keywords:

Sentiment analysis,
machine learning,
natural language processing,
text mining,
customer behavior.

Abstract

Given that modeling and predicting customer behavior using data science helps companies gain a better understanding of customer behavior, this research focuses on analyzing customer reviews in the women's clothing domain within e-commerce. We employ machine learning techniques and natural language processing (NLP) to achieve this goal. The machine learning models used include Support Vector Machine, Logistic Regression, Decision Tree, Random Forest, Multinomial Naive Bayes, Complement Naive Bayes, XGBoost, and LightGBM. To extract and vectorize text features from the reviews, we utilize the TF-IDF and Word2vec algorithms. We employ Topic Modeling using the Latent Dirichlet Allocation (LDA) method and k-means clustering. The dataset consists of women's clothing reviews, with the target variable being customer ratings in those reviews. The study is conducted in binary, three-class, and five-class scenarios. The target variable, which originally has five classes (scores 1 to 5), is categorized into two-class and three-class modes. In the two-class mode, scores below 3 are class zero, while scores of 3 and above are class one. In the three-class mode, scores below 3 are class zero, scores equal to 3 are class one, and scores above 3 are class two. In all three cases, the Random Forest model performs best, achieving an accuracy of 0.98 in the binary case, 0.95 in the three-class case, and 0.91 in the five-class case. After performing the required preprocessing and feature engineering, principal component analysis (PCA) and T SNE are applied. After that, the scatter diagram of the data is drawn and the optimal number of clusters, 3, is estimated using the elbow and silhouette diagrams. In the next step, by removing punctuation marks, stop words and words with fewer than three letters, converting the first letter of the words to lowercase and lemmatization, data cleaning was done. After that, topic modeling was done and each of the topics and words related to them were examined. In the next step, the topics were examined in different clusters. These analyses provide a comprehensive understanding of the key themes and concerns customers have when considering womenswear items in each of the four topics.

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:
Rahimi, R. and Ghasemy Yaghin, R. 2026. Topic modeling and sentiment analysis of customers using natural language processing and machine learning techniques, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.45-61. https://doi.org/10.24200/j65.2025.65318.2418

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

مدل‌سازی موضوعی و تحلیل احساس‌های مشتریان با استفاده از روش‌های پردازش زبان طبیعی و یادگیری ماشین

راضیه رحیمی[۱] و رضا قاسمی‌یقین[۲*]

[۱] دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

[۲] دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌های مدیریت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

[*] نویسنده مسئول (yaghin@aut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۲/۲۰

واژگان کلیدی:

تجزیه‌وتحلیل احساس‌ها،

یادگیری ماشین،

پردازش زبان طبیعی،

متن‌کاوی،

رفتار مشتری،

مدل‌سازی موضوعی.

چکیده

در نوشتارحاضر، به بررسی و تجزیه‌وتحلیل نظرهای مشتریان پوشاک زنان با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و پردازش زبان طبیعی پرداخته شده است. مدل‌های یادگیری ماشین استفاده‌شده، شامل: ماشین بردار پشتیبان، رگرسیون لجستیک، درخت تصمیم، جنگل تصادفی، بیز ساده‌ی چندجمله‌ای، بیز ساده‌ی مکمل، XGBoost ، و LightGBM بوده‌اند. به‌منظور برداری‌کردن و استخراج ویژگی متن نظرها از الگوریتم‌های TF-IDF و Word2vec استفاده شده است. مدل-سازی موضوعی با استفاده از روش تخصیص دیریکله‌ی پنهان و خوشه‌بندی K-Means انجام شده است. مجموعه‌ی داده‌ی استفاده‌شده مربوط به نظرهای پوشاک زنان و متغیر هدف، امتیازهای مشتریان در نظرها بوده است. مطالعه‌ی حاضر، در حالت‌های: دوکلاسه، سه‌کلاسه، و پنج‌کلاسه انجام و در هر سه حالت، بهترین عملکرد مربوط به مدل جنگل تصادفی با دقت ۰٫۹۸ در حالت دوکلاسه، ۰٫۹۵ در حالت سه‌کلاسه، و ۰٫۹۱ در حالت پنج‌کلاسه برآورد شده است.

۱. مقدمه

کاربران اینترنت با نوشتن نظرهای خود و رتبه‌بندی محصول‌ها از گیرنده‌های اطلاعات سنتی به ناشران اطلاعات تغییر پیدا کرده‌اند؛ که منجر به ذخیره‌ی حجم قابل‌توجهی از اطلاعات ارزشمند توسط وب‌سایت‌های تجارت الکترونیک می‌شود، و تجزیه‌وتحلیل آن‌ها به‌منظور به‌کارگیری روش‌های بازاریابی مناسب، از توانایی‌های پردازش شناختی انسان‌ها پیشی می‌گیرد.[۱ و ۲] رتبه‌بندی و نظرها، نقش مهمی در درک احساس‌های مشتریان دارند. تحلیل احساس‌ها در تجارت الکترونیک بسیار مهم است و به کسب‌وکارها کمک می‌کند تا بازخورد مشتری را تجزیه‌وتحلیل و روندها را شناسایی کنند. تحلیل احساس‌ها، راهبرد استفاده‌شده برای استخراج و ارزیابی احساس‌های بیان‌شده در داده‌های متنی است،[۳] و هدف آن استخراج مزایا و معایب محصول از نظرهای مشتریان، پرداختن به تجزیه‌وتحلیل نظرهای مثبت و منفی، و استخراج اطلاعات برجسته به‌منظور بهبود محصول، انتخاب برای تولید، و افزایش نرخ خرید است.[۴] برای تجزیه‌وتحلیل اطلاعات اخیر و درک احساس‌های مشتری، می‌توان از روش‌های مبتی بر یادگیری ماشین و پردازش زبان طبیعی استفاده کرد.

به همین منظور در پژوهش حاضر، رویکردی مبتنی بر روش‌های پردازش زبان طبیعی و مدل‌های یادگیری ماشین براساس نظرها و رتبه‌بندی‌های مشتریان ارائه شده است، که به کمک آن می‌توان با آگاهی از احساس‌های مشتریان خود، خدمات و راهبردهای بازاریابی مناسب را به‌کار گرفت. در نوشتار حاضر، با استفاده از مجموعه‌ی داده‌ی نظرهای پوشاک زنان در خریدهای الکترونیکی به بررسی رضایت یا نارضایتی از خرید مشتریان، شناسایی عوامل مؤثر در رفتار آن‌ها از طریق شناسایی احساس‌های متن نظرها، مدل‌سازی موضوعی براساس دسته‌بندی محصول‌ها به‌منظور شناسایی موضوع‌های کلیدی به همراه خوشه‌بندی مشتریان و درنهایت، ارائه‌ی مدل‌های کلاس‌بندی احساس‌ها با استفاده از روش‌های پردازش زبان طبیعی و یادگیری ماشین پرداخته شده است. درک احساس‌های نهفته در نظرهای مشتریان اهمیت فراوانی دارد و اطلاعات ارزشمندی در مورد رضایت مشتریان نسبت به محصول‌ها یا خدمات شرکت ارائه می‌دهد. احساس‌های مثبت، نشان‌دهنده‌ی خوشحالی و رضایت مشتریان و احساس‌های منفی، نشان‌دهنده‌ی زمینه‌های نیازمند بهبود هستند. با شناسایی احساس‌های مذکور، کسب‌وکارها می‌توانند راهبردهای خود را برای رسیدگی به نیازها و نگرانی‌های خاص مشتریان خود تنظیم کنند. به همین منظور هدف کلی نوشتار حاضر، ارائه‌ی روش‌ها و مدل‌هایی است که با ترکیب پردازش زبان طبیعی و یادگیری ماشین، اطلاعات و داده‌های شرکت‌های

استناد به این مقاله:

رحیمی، راضیه و قاسمی یقین، رضا، ۱۴۰۴. مدل‌سازی موضوعی و تحلیل احساس‌های مشتریان با استفاده از روش‌های پردازش زبان طبیعی و یادگیری ماشین. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص.۴۵-۶۱. https://doi.org/10.24200/j65.2025.65318.2418

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

پوشاک را به بینش‌های عمیق و عملی برای رشد و موفقیت آن‌ها تبدیل و از قدرت بازخوردهای مشتریان برای بهبود محصول‌ها، خدمات، و تجربه‌ی کلی مشتری از خرید خود استفاده کنند.

ساختار ادامه‌ی نوشتار به این صورت است، که در بخش ۲، به مرور ادبیات موضوع و بیان کارهای مرتبط؛ در بخش ۳، به ارائه‌ی روش‌شناسی و مبانی نظری؛ در بخش ۴، به ارزیابی مدل‌های پیاده‌سازی‌شده و ارائه‌ی نتایج به‌دست‌آمده؛ و در بخش ۵، به ارائه‌ی نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آینده پرداخته شده است.

۲. مرور ادبیات موضوع

خلاصه‌ی کارهای مرتبط در جدول ۱ ارائه شده است؛ که مطابق آن، مطالعات پیشین به‌منظور بررسی نظرهای مشتریان پوشاک در خریدهای الکترونیک با مجموعه داده‌های متفاوت، متغیر هدف، و مدل‌های یادگیری ماشین متفاوت انجام شده‌اند. از آنجایی که مجموعه داده‌ی استفاده‌شده در نوشتار حاضر با عنوان نظرهای تجارت الکترونیک پوشاک زنانه با برخی نوشتارهای پیشین،[۳ و ۵-۱۴] یکسان بوده است؛ در ادامه، به بررسی بیشتر آن‌ها پرداخته شده است. مجموعه داده‌ی مذکور در مطالعات متعددی استفاده شده است، که بیشتر بر تحلیل احساس‌های مشتریان و پیش‌بینی رفتارهای آن‌ها متمرکز بوده‌اند. برخی از آن‌ها، شامل تحلیل اکتشافی داده‌ها و پیش‌بینی احساس‌ها با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، مانند ماشین بردار پشتیبان و درخت تصمیم، همچنین مقایسه‌ی مدل‌های مختلف یادگیری ماشین برای تحلیل نظرهای مشتریان بوده‌اند. در مقایسه با پژوهش‌های ذکرشده، پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های مختلف یادگیری ماشین تلاش کرده است تا دقت مدل‌ها را در تحلیل و طبقه‌بندی نظرهای مشتریان بهبود بخشد. علاوه‌بر این، استفاده از روش‌های پردازش زبان طبیعی مانند TF-IDF و Word2Vec در استخراج ویژگی‌ها و مدل‌سازی موضوعی با روش تخصیص دیریکله‌ی پنهان، از ویژگی‌های خاص پژوهش حاضر است، که به دقت بیشتر در پیش‌بینی احساس‌ها و دسته‌بندی نظرها کمک می‌کند. لذا، با استفاده از ترکیب روش‌های مختلف و ارزیابی دقیق‌تر مدل‌ها، به نتایج متفاوتی نسبت به سایر مطالعات مشابه دست یافته است. در برخی مطالعات،[۳، ۹-۵، و ۱۱] متغیر هدف در نظر گرفته‌شده به‌منظور پیاده‌سازی مدل‌های یادگیری ماشین، ستون ویژگی شاخص پیشنهاد محصول در مجموعه‌ی داده و در حالت دوکلاسه (۰ برای پیشنهاد نکردن محصول توسط مشتری و ۱ برای پیشنهاد محصول توسط مشتری) انجام شده است. همچنین، در مطالعه‌های دیگری،[۱۲ و ۱۳] متغیر هدف در نظر گرفته‌شده، ستون ویژگی امتیاز محصول‌ها و در حالت دوکلاسه با مرز امتیاز ۳ (امتیازهای برابر ۳ و بالاتر به‌عنوان کلاس ۱ و امتیازهای کمتر از ۳ به‌عنوان کلاس ۰) صورت گرفته‌اند. موضوع قابل‌توجه این است که مجموعه داده‌ی استفاده‌شده در همه‌ی مطالعات یکسان بوده و همان‌طور که در ادامه با تجزیه‌وتحلیل داده‌های اکتشافی نشان داده شده است، مجموعه داده‌ی مذکور برای متغیرهای هدف شاخص، پیشنهاد محصول، و امتیاز مشتریان متعادل نبوده است. از آنجایی که بسیاری از مدل‌های یادگیری ماشین، مانند رگرسیون لجستیک، هر زمان که اختلاف نسبت بین تعداد نقاط داده نامتعادل باشد، با مشکلات عملکردی مواجه می‌شوند،[۸] و به‌منظور جلوگیری از غیرقابل‌اعتمادبودن نتایج و معیارهای ارزیابی مدل‌های پیاده‌سازی‌شده، موضوع متعادل‌کردن مجموعه‌ی داده مهم است و باید به آن توجه کرد.

چهار مطالعه در میان کارهای مرتبط انجام‌شده، بحث متعادل‌کردن مجموعه‌ی داده را مطرح و بررسی کرده‌اند. کوبروسلی[۱] و همکاران (۲۰۲۲)،[۶] به‌منظور انجام این کار به‌صورت تصادفی، مجموعه‌های متعادل آموزش و آزمایش را انتخاب کرده و توضیح دقیق‌تری از روش انجام کار ارائه نداده‌اند. سونیل و شیرازی (۲۰۲۳)،[۸] به‌منظور متعادل‌کردن مجموعه‌ی داده از روش افزایش تعداد داده‌ها در کلاس اقلیت استفاده کرده‌اند، اما به روش انجام آن به‌صورت صریح اشاره‌ای نکرده‌اند. لوکیلی[۲] (۲۰۲۳)،[۹] در بخش تجزیه‌وتحلیل اکتشافی، به موضوع متعادل‌نبودن مجموعه‌ی داده با متغیر هدف شاخص پیشنهاد محصول پی برده است. با این حال در ادامه‌ی نوشتارش، توضیحی مبنی بر استفاده از روش‌هایی برای رفع نامتعادل‌بودن مجموعه‌ی داده در نظر گرفته نشده است. شتی[۳] و همکاران (۲۰۲۳)،[۱۱] به نامتعادل بودن مجموعه‌ی داده اشاره کرده‌اند؛ اما راهکاری به‌منظور برطرف‌کردن آن ارائه نکرده‌اند. با این حال، ایشان بیان کرده‌اند که به‌دلیل نامتعادل‌بودن مجموعه‌ی داده، معیار درستی قابل‌اعتماد نیست و بهتر است از معیارهای دقت و پوشش برای ارزیابی عملکرد مجموعه‌ی داده‌های نامتعادل استفاده شود.

در مطالعه‌ی حاضر، با درنظرگرفتن امتیاز محصولات به‌عنوان متغیر هدف و به‌کارگیری روش SMOTE برای رفع مشکل نامتعادل‌بودن مجموعه‌ی داده و به کمک روش‌های یادگیری ماشین و پردازش زبان طبیعی، به تجزیه‌وتحلیل احساس‌ها در حالت‌های دوکلاسه، سه‌کلاسه، و پنج‌کلاسه پرداخته شده است. روش SMOTE، با استفاده از الگوریتم k- نزدیکترین همسایه به تولید داده‌های مصنوعی جدید می‌پردازد،[۱۵] و در مقایسه با روش‌های متداول، افزایش تعداد داده‌ها در کلاس اقلیت مانند OverSampling، که ممکن است داده‌های تکراری زیادی به مجموعه اضافه شوند و نتایج را غیرقابل اعتماد کنند، انتخاب بهتری است. همچنین انجام نوشتار حاضر در حالت‌های دو کلاسه، سه‌کلاسه، و پنج‌کلاسه به بررسی دقیق‌تر و با جزئیات بیشتری به رفتار و احساس‌های مشتریان پرداخته است. علاوه‌بر موضوعاتی که اشاره شد، در نوشتار کنونی، مدل‌سازی موضوعی و برآورد موضوع‌های نهفته در متن نظرها با استفاده از روش تخصیص دیریکله‌ی پنهان نیز انجام شده است. نتایج حاصل از همه‌ی موارد ذکرشده، اطلاعات مهمی در رابطه با شناخت عوامل مؤثر در رفتار مشتریان و تحلیل احساس‌های آن‌ها در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد.

۳. روش‌شناسی

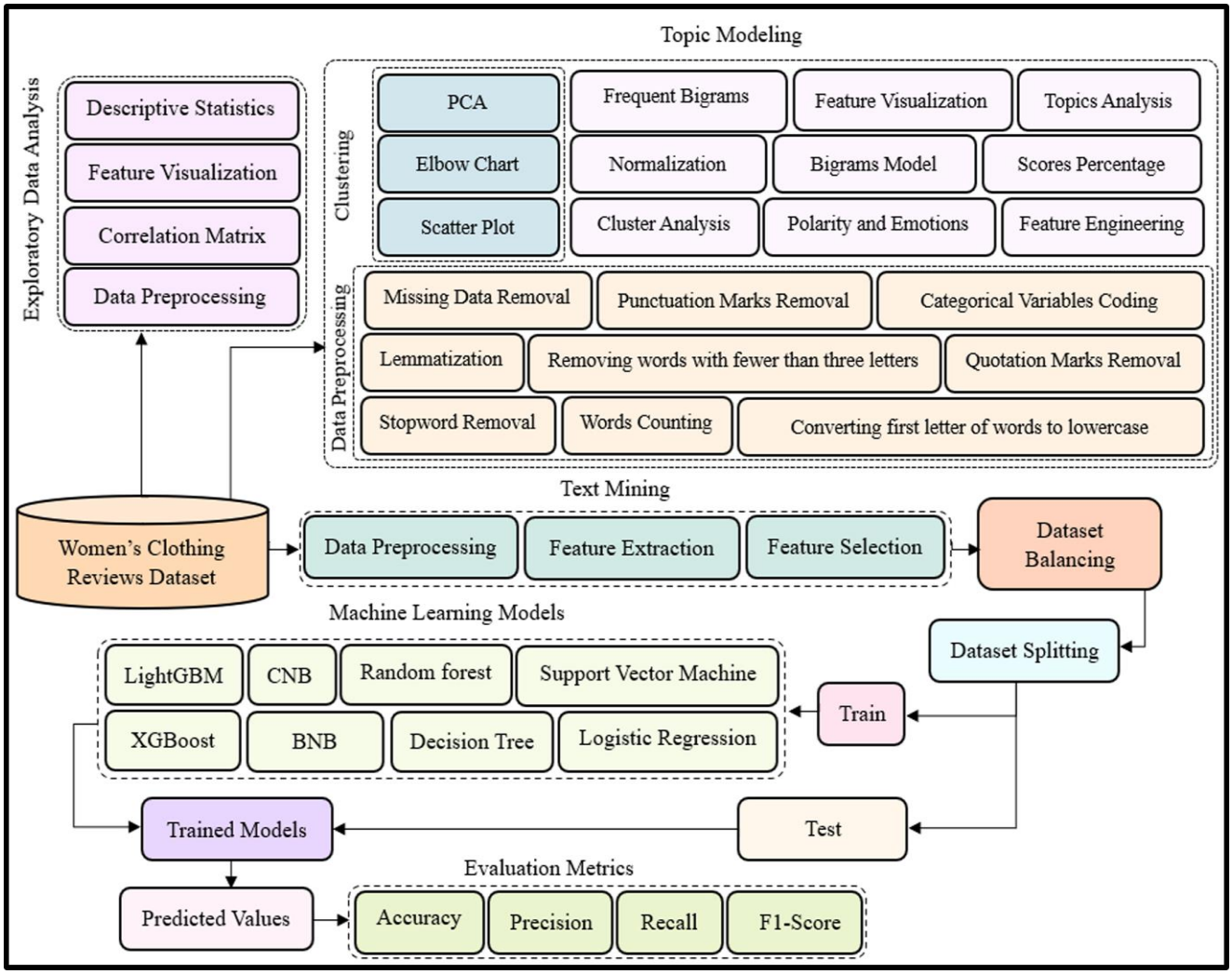
در شکل ۱، مراحل مطالعه‌ی حاضر مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، پس از انتخاب مجموعه‌ی داده‌ی مربوط به نظرهای پوشاک زنان، به انجام تمیزکردن داده‌ها و پیش‌پردازش‌هایی چون مدیریت مقادیر گمشده و حذف ستون مربوط به شماره‌ی ردیف داده‌ها پرداخته شده است.

در مرحله‌ی بعد، ابتدا به‌منظور شناخت و درک مجموعه‌ی داده به تجزیه‌وتحلیل اکتشافی پرداخته شده است، که در ادامه در مورد آن بحث شده است. در بخش بعد، پس از انجام پیش‌پردازش به انتخاب ویژگی[۴]، استخراج[۵]، و مهندسی ویژگی[۶] توسط الگوریتم TF-IDF، متعادل‌کردن مجموعه‌ی داده با استفاده از

[1] Kubrusly
[2] Loukili
[3] Shetty
[4] Feature Selection
[5] Feature Extraction
[6] Feature Engineering

جدول ۱. خلاصه‌ی کارهای مرتبط.

Title and publication year	Dataset	Target variable	Dataset balancing	ML models
Sentiment analysis of e-commerce customer reviews based on natural language processing 2020 [5]	Women's e-commerce clothing reviews	Recommended Index	-	**LR, SVM, RF, XGBoost, LightGBM**
A statistical analysis of textual e-commerce reviews using tree-based methods 2022 [6]	Women's e-commerce clothing reviews	Recommended Index	Random selection of balanced training (5,840) and test (2,504) Sets	**RF, XGBoost, DT, GB**
Analyzing online reviews of customers using machine learning techniques 2022 [7]	Women's e-commerce clothing reviews	Recommended Index	-	**NB, LR, SVM, NN**
Customer review classification using machine learning and deep learning techniques 2023 [8]	Women's e-commerce clothing reviews	Recommended Index	Enhancing the minority class sample size	**LR, Linear SVM, DT, RF, AdaBoost**
Explainable sentiment analysis for textile personalized marketing 2023 [3]	Women's e-commerce clothing reviews	Recommended Index	-	**LR**
Sentiment analysis of product reviews for e-commerce recommendation based on machine learning 2023 [9]	Women's e-commerce clothing reviews	Recommended Index	-	**LR, RF, KNN, CatBoost**
Exploring commonly used terms from online reviews in the fashion field to predict review helpfulness 2023 [16]	Customer reviews on amazon’s fashion platform	Positive feedback count	-	**RF, SVM, LR, SGB, TM, LDA**
It is about inclusion! Mining online reviews to understand the needs of adaptive clothing customers 2023 [17]	Customer reviews from Amazon, Silverts, IZ-Adaptive, and ResellerRatings	-	-	**TM, LDA**
Using Topic Modeling for Extracting Customers’ Expectations: a case of women apparel 2023 [10]	Women's e-commerce clothing reviews	-	-	**TM, LDA**
Sentiment forecasting in women’s fashion e-Commerce: a machine learning perspective 2024 [18]	Reviews on Women’s Apparel	Sentiment	-	**NB, SVM, NN, LR**
Hyperparameter optimization of machine learning models using grid search for amazon review sentiment analysis 2024 [11]	Women's e-commerce clothing reviews	Recommended Index	-	**DT, LR, SVM, NB, XGBoost, RF**
Sentiment exploring on feedback of e-commerce data using machine learning algorithms 2024 [12]	Women's e-commerce clothing reviews	Customer Ratings (Binarized with a Threshold of 3)	-	**LR, NB, MNB, BNB, SVM, RF, AdaBoost**
Factors influencing recommendations for women's clothing satisfaction: a latent dirichlet allocation approach using online reviews 2024 [14]	Women's e-commerce clothing reviews	-	-	**TP, LDA**
This study: Topic Modeling and Sentiment Analysis of Customers Using Natural Language Processing and Machine Learning Techniques	Women's e-commerce clothing reviews	Customer Ratings in Binary, Three-class, and Five-class Settings	SMOTE	**LR, SVM, DT, RF, CNB, MNB, XGBoost, LightGBM, TM, LDA, NLP**



شکل ۱. روش‌شناسی مطالعه‌ی حاضر.

روش SMOTE، و تفکیک آن به دو دسته‌ی مجموعه‌ی داده‌های آموزش و آزمایش صورت گرفته است. درنهایت، مدل‌های یادگیری ماشین موردنظر، پیاده‌سازی، و عملکرد آن‌ها ارزیابی شده است.

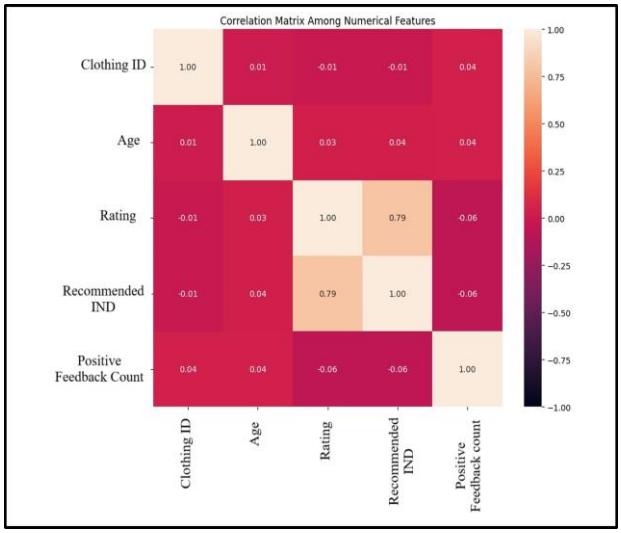
۳.۱. جمع‌آوری داده

مجموعه‌ی داده‌ی استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر، شامل داده‌های تجاری واقعی و با عنوان نظرهای تجارت الکترونیک پوشاک زنانه[۷]، از وب‌سایت Kaggle دانلود شده است.[۱۹] مجموعه‌ی داده شامل ۲۳۴۸۶ ردیف و ۱۰ ستون ویژگی بوده است و هر ردیف آن بیان‌کننده‌ی شناسه‌ی قطعه‌ی در حال بررسی، سن مشتری صاحب‌نظر، عنوان نظر، متن نظر، امتیاز مشتری به محصول موردنظر از ۱ (بدترین) تا ۵ (بهترین)، شاخص پیشنهاد محصول توسط مشتری، تعداد مشتریانی که این نظر را مثبت و کمک‌کننده دانسته‌اند، نام بخش محصول سطح بالا[۸]، نام بخش محصول، و نام کلاس محصول است. ستون‌های ویژگی مجموعه‌ی داده‌های اخیر، شامل: متغیرهای عددی[۹]، رشته‌ای[۱۰]، عددی ترتیبی[۱۱]، عددی دودویی[۱۲]، و طبقه‌ای[۱۳] می‌شود.

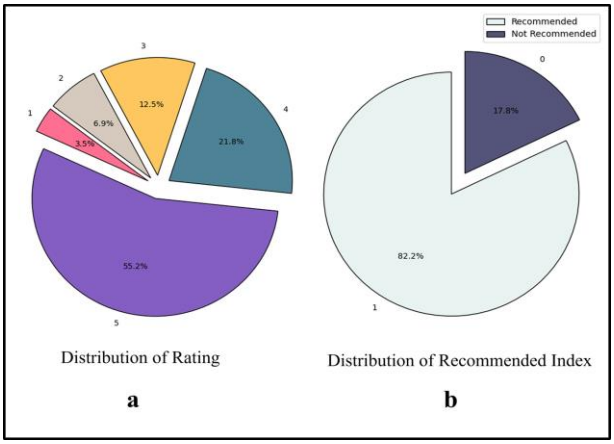
۳.۲. تجزیه‌وتحلیل داده‌های اکتشافی

به‌منظور انجام تجزیه‌وتحلیل داده‌های اکتشافی (EDA)[۱۴]، پس از بررسی و حذف مقادیر داده‌ی گمشده[۱۵]، ابتدا محاسبه‌ی پارامترهای آمار توصیفی برای ویژگی‌های عددی انجام و سپس ماتریس همبستگی ویژگی‌های مذکور ترسیم شده است. در ادامه، به تحلیل ویژگی‌ها پرداخته شده است. پس از حذف مقادیر داده‌های گمشده، تعداد ردیف‌های موردبررسی مجموعه‌ی داده برابر با ۱۹۶۶۲ در نظر گرفته شده است. میانگین گروه سنی افرادی که نظرهای خود را در رابطه با پوشاک خریداری‌شده‌ی زنان به اشتراک گذاشته‌اند، حدود ۴۳ سال و در بازه‌ی ۱۸ تا ۹۹ سال برآورد شده است. میانگین امتیازها برابر با ۴٫۱ و میانگین شاخص پیشنهاد محصول ۰٫۸۱ محاسبه شده و نشان‌دهنده‌ی آن است که در حالت کلی، مشتریان از خرید خود رضایت داشته‌اند. تعداد مشتریانی که نظرهای ثبت‌شده را مفید و کمک‌کننده دانسته‌اند، نیز از ۰ تا ۱۲۲ عدد متغیر بوده است. در شکل ۲، ماتریس همبستگی ویژگی‌های عددی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین مقدار ضریب همبستگی مربوط به ویژگی‌های امتیاز و شاخص پیشنهاد محصول و برابر با ۰٫۷۹ برآورد شده است. شکل ۳ (a)، نحوه‌ی

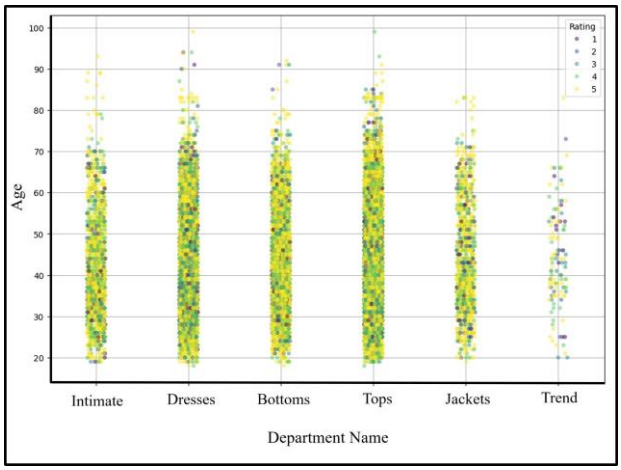
[7] Women's clothing e-commerce reviews
[8] Product high level division
[9] Numerical
[10] String
[11] Ordinal variable
[12] Binary variable
[13] Categorical
[14] Exploratory Data Analysis
[15] Missing values



شکل ۲. ماتریس همبستگی ویژگی‌های عددی.



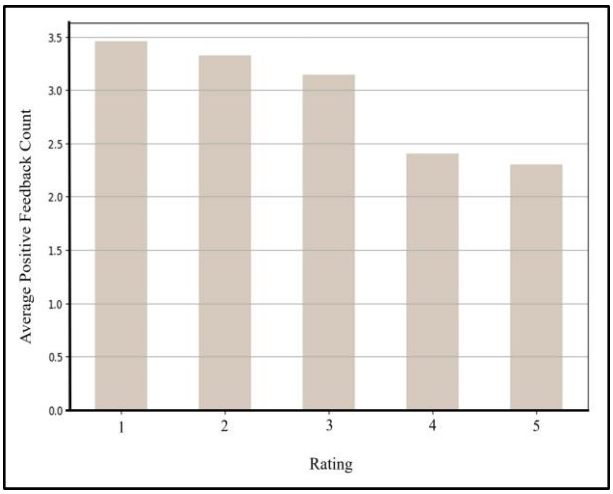
شکل ۳. (a) نحوه‌ی توزیع امتیازها، (b) توزیع شاخص پیشنهاد محصول.



شکل ۴ . امتیازهای مشتریان با توجه به گروه سنی و نام بخش.

توزیع امتیازهای موجود در مجموعه‌ی داده، شکل ۳ (b)، نحوه‌ی توزیع شاخص پیشنهاد محصول توسط مشتریان، و شکل ۴، امتیازهای مشتریان را با توجه به گروه سنی و نام بخش نشان می‌دهند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ۸۲٫۲٪ از مشتریان، محصول خریداری‌شده را به دیگران پیشنهاد می‌کنند. امتیاز ۵ با مقدار ۵۵٫۲٪، بیشترین سهم را در



شکل ۵. میانگین تعداد مفیدبودن نظرها برای هر امتیاز.

تعداد کل مجموعه‌ی داده داشته و پس از آن به ترتیب امتیازهای ۴، ۳، ۲، و ۱ قرار گرفته‌اند. بیشتر امتیازها توسط افراد در محدوده‌ی سنی ۲۰ تا ۷۵ سال ثبت شده و بیشترین نظرها، امتیاز ۳ و بالاتر داشته‌اند. در شکل ۵، میانگین تعداد مفیدبودن نظرها برای هر امتیاز مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، بیشترین مقدار میانگین تعداد مفیدبودن نظرها، مربوط به امتیازهای ۱ تا ۳ بوده است.

۳.۳. مدل‌سازی موضوعی

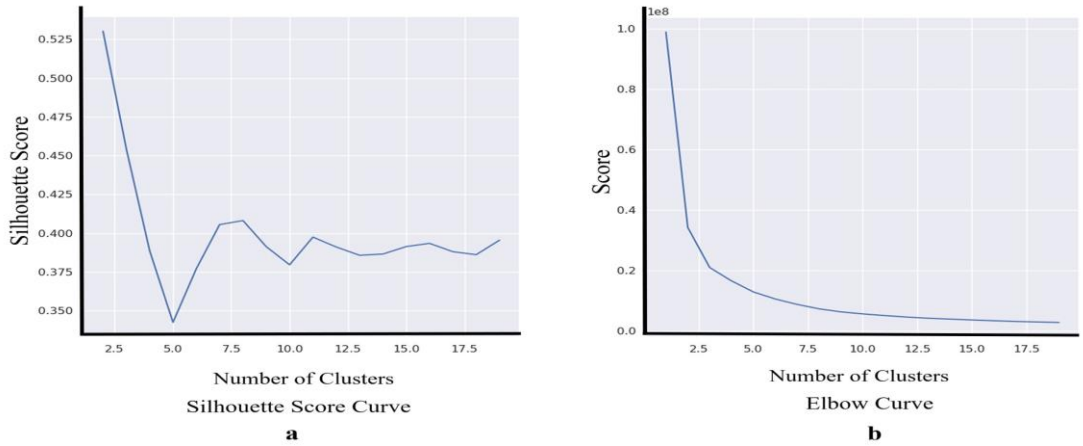
در بخش کنونی، ابتدا به بیان توضیح مختصری از روش تخصیص پنهان دیریکله (LDA)[۱۶] در مدل‌سازی موضوعی[۱۷]، خوشه‌بندی[۱۸]، و چرایی استفاده از دو روش مذکور در نوشتار حاضر پرداخته شده است. در ادامه، روش‌شناسی بخش حاضر، بیان و نتایج برآوردشده گزارش شده است.

- **تخصیص پنهان دیریکله**، شکلی از یادگیری ماشین بدون نظارت است، که برای کشف موضوع‌های پنهان از متن نظرها استفاده می‌شود و هدف آن، یافتن گروهی از موضوع‌هاست که کلمات مشاهده‌شده را در تمام اسناد به بهترین شکل توصیف کنند. اطلاعات تولیدشده از مدل ذکرشده، شامل واژگان کلیدی مرتبط با هر یک از موضوع‌ها و احتمال مرتبط‌شدن هر یک از نظرهای متنی با هر موضوع است.[۲۰]

- **خوشه‌بندی K-means**، از الگوریتم‌های یادگیری بدون نظارت است، که برای طبقه‌بندی مجموعه‌ای از داده‌ها به کلاس‌هایی از داده‌های مشابه استفاده می‌شود. طبقه‌بندی مجموعه‌ی داده‌ی N مورد براساس ویژگی‌ها به k زیرمجموعه‌ی مجزا با کمینه‌سازی فاصله بین آیتم داده و مرکز خوشه‌ی مرتبط انجام می‌شود.[۲۱]

در نوشتار حاضر، برای انجام مدل‌سازی موضوعی از روش تخصیص دیریکله‌ی پنهان و خوشه‌بندی K-Means به‌طور ترکیبی استفاده شده است. تخصیص دیریکله‌ی پنهان، به‌عنوان یک روش مبتنی بر احتمال، توانایی شبیه‌سازی توزیع موضوع‌های پنهان در اسناد مختلف را دارد و می‌تواند به‌طورمؤثری، موضوع‌های غالب در متن‌های مشتریان را شناسایی کند. روش تخصیص دیریکله‌ی پنهان به تحلیل ساختار معنایی داده‌ها کمک می‌کند و امکان استخراج ویژگی‌های دقیق موضوعی از متون نظرهای مشتریان را فراهم

[16] Latent Dirichlet Allocation
[17] Topic Modeling
[18] Clustering



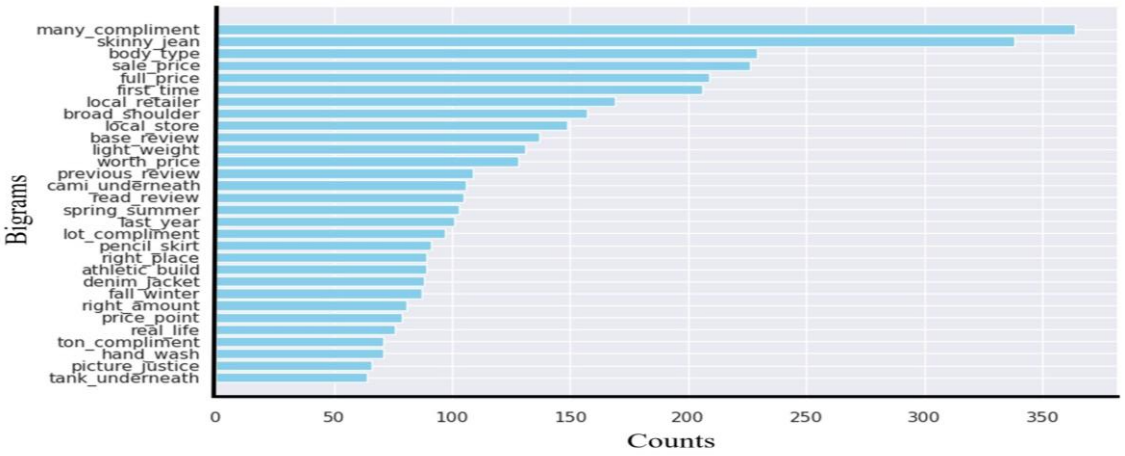
شکل ۶. (a) نمودار میانگین سیلوئت، (b) نمودار Elbow.

می‌آورد. به‌علاوه، به‌دلیل سادگی در پیاده‌سازی، قابلیت تفسیر بالا، و کارایی آن در تحلیل داده‌های متنی با حجم بالا به‌عنوان یکی از روش‌های محبوب در پردازش زبان طبیعی شناخته می‌شود. به‌ویژه برای مسائلی که نیاز به شناسایی و استخراج موضوع‌های پنهان از مجموعه‌های بزرگ داده دارند، انتخابی مناسب و کارآمد است.[۲۲] در کنار آن، الگوریتم خوشه‌بندی K-Means برای تقسیم‌بندی اسناد به خوشه‌های مختلف، براساس توزیع‌های موضوعی به‌دست‌آمده از تخصیص پنهان دیریکله استفاده شده است. ترکیب مذکور، داده‌ها را براساس شباهت‌های موضوعی به‌طورمؤثری گروه‌بندی می‌کند و تحلیل‌های دقیق‌تری را از نظرهای مشتریان امکان‌پذیر می‌سازد. علاوه‌بر این، در مطالعه‌ی حاضر، ارتباط موضوع‌های غالب در هر خوشه با سن مشتریان و تعداد کلمات در متن نظرهای مشتریان بررسی شده است. تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که چگونه سن و طول متن نظرها می‌تواند بر تمایل به صحبت در مورد موضوع‌های خاص تأثیر بگذارد و به درک بهتر الگوهای رفتاری و اولویت‌های مشتریان کمک کند.

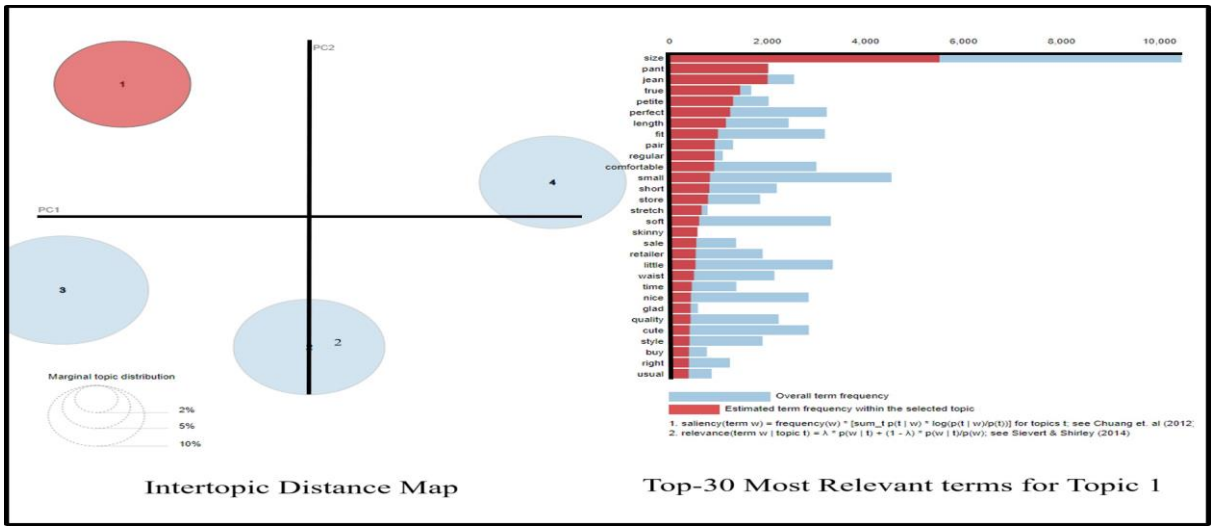
بررسی هر خوشه به‌طور ویژه مزایای زیادی از منظر راهبردهای بازاریابی و توسعه‌ی کسب و کار در بر دارد. با شناسایی ویژگی‌های خاص هر خوشه، کسب‌وکارها می‌توانند راهبردهای بازاریابی متناسب با نیازها و خواسته‌های خاص مشتریان در هر گروه را طراحی کنند. برای مثال، یک خوشه ممکن است تمایل زیادی به ویژگی‌های خاص محصول نشان دهد، که نیاز به تبلیغات هدفمند و تشویق به خرید دارد؛ در حالی که خوشه‌ای دیگر ممکن است بیشتر به خدمات پس از فروش یا تجربه‌ی مشتری علاقه‌مند باشد. به‌علاوه، تحلیل موضوع‌های موجود در هر خوشه می‌تواند به کسب‌وکارها کمک کند تا پیشنهادهای محصولات و خدمات را براساس اولویت‌های خاص مشتریان هر خوشه سفارشی کند و تجربه‌ی مشتری را بهبود بخشد. در نتیجه، روش مذکور نه فقط به تحلیل دقیق‌تر رفتار مشتریان کمک می‌کند، بلکه می‌تواند راهکارهای مؤثری برای رشد کسب‌وکار و جذب مشتریان بیشتر ارائه دهد.

پس از انجام پیش‌پردازش‌هایی مانند مدیریت مقادیر گمشده، کدبندی ویژگی‌های طبقه‌ای، شمارش تعداد کلمات، و تعداد کلمات یکتا، شناسه‌های لباس با فراوانی کمتر از ۱٪ تعداد کل، شناسایی و شناسه‌ی یکسانی به آن‌ها نسبت داده شده است. سپس تعداد تکرار هر یک از شناسه‌های لباس، نرمال و در ستونی با نام شناسه‌ی لباس جدید به مجموعه‌ی داده اضافه شده است. در مرحله‌ی بعد، میزان قطبیت و احساس‌های متن نظرها به همراه عنوان آن‌ها، برآورد و در ستونی با عنوان امتیاز احساس‌های کل به مجموعه‌ی داده افزوده شده است. به‌منظور بهبود عملکرد الگوریتم خوشه‌بندی K-Means، کاهش ابعاد و رسم مجموعه‌ی داده، داده‌ها با استفاده از تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)[۱۹] و سپس تحلیل T-SNE[۲۰] به ابعاد پایین‌تر کاهش یافته و به‌عنوان ورودی الگوریتم K-Means در نظر گرفته شده‌اند. T-SNE یک روش کاهش ابعاد غیرخطی است، که برای نمایش ساختارهای پیچیده‌ی داده‌ها در فضای دو یا سه بُعدی بسیار مؤثر است و امکان خوشه‌بندی مؤثرتر داده‌های پیچیده را با حفظ روابط غیرخطی میان نقاط داده فراهم می‌کند.[۲۳] پس از آن، با استفاده از نمودار Elbow و معیار سیلوئت، تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها برآورد شده است. روش elbow برای تعیین تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها در الگوریتم K-Means براساس معیار مجموع مربعات خطا (SSE)[۲۱] عمل می‌کند. معیار SSE، مجموع فاصله‌های مربعات داده‌ها تا نزدیک‌ترین مرکز خوشه را اندازه‌گیری و به‌عنوان شاخصی برای پراکندگی داده‌ها درون خوشه‌ها عمل می‌کند. برای این منظور، SSE برای تعداد خوشه‌های مختلف محاسبه و مقادیر به‌دست‌آمده در قالب یک نمودار رسم و نقطه‌ای که در آن کاهش SSE روند کندتری پیدا کرده است، به‌عنوان مقدار بهینه‌ی تعداد خوشه‌ها انتخاب شده است. کاهش SSE به این معناست که داده‌ها به خوشه‌های مجزا و منسجم‌تری تقسیم می‌شوند.[۲۴] میانگین سیلوئت نیز به‌منظور ارزیابی کیفیت خوشه‌بندی داده‌ها استفاده شده است، که نشانگر انسجام درون‌خوشه‌ای و جداشدگی بین خوشه‌هاست؛ که برای محاسبه‌ی آن، فاصله‌ی هر نقطه از نقاط دیگر در خوشه‌ی خود و نزدیک‌ترین خوشه محاسبه می‌شود.[۲۵] در مطالعه‌ی حاضر، مقدار سیلوئت برای تعداد دو خوشه برابر با ۰٫۵۳ و برای تعداد سه خوشه برابر با ۰٫۴۵ به‌دست آمده است. این تفاوت نشان می‌دهد که هر دو تعداد خوشه (دو و سه خوشه) کیفیت مشابهی در خوشه‌بندی داده‌ها داشته‌اند. از طرفی، با توجه به نمودار elbow، تعداد سه خوشه به‌عنوان تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها با کمترین مجموع مربعات خطا و تقسیم‌بندی بهتر داده‌ها شناسایی شده است. با توجه به اینکه نتایج روش elbow و امتیاز سیلوئت به‌طورکلی هم‌راستا هستند و تعداد سه خوشه، هم‌زمان کیفیت بالاتری در خوشه‌بندی و انسجام بهتر داده‌ها ارائه می‌دهد، تعداد سه خوشه به‌عنوان تعداد بهینه‌ی خوشه‌ها در نظر گرفته شده است. درنهایت، عملیات خوشه‌بندی با استفاده از الگوریتم K-means انجام شده است. در شکل ۶ (a)، نمودار میانگین سیلوئت و در شکل

[19] Principal component analysis
[20] T-distributed Stochastic Neighbor Embedding
[21] Sum of Squared Errors



شکل ۷. سی بایگرام پرتکرار.



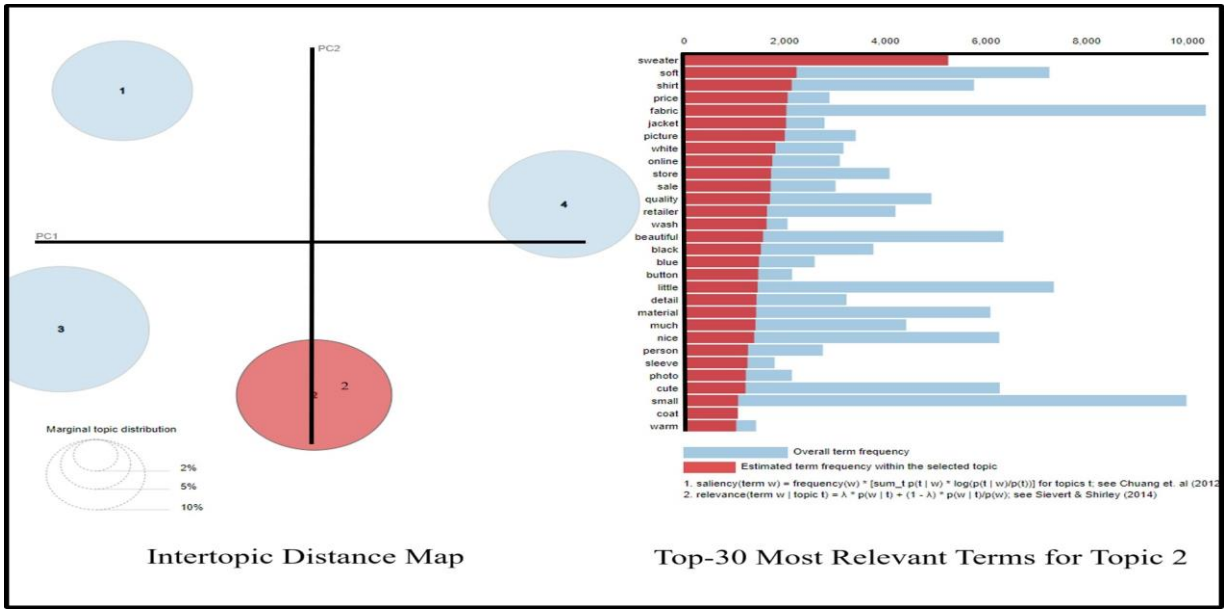
شکل ۸. نمودار فاصله‌ی بین موضوعی و کلمات پرتکرار موضوع یک.

۶ (b)، نمودار Elbow برای محاسبه‌ی تعداد خوشه‌های بهینه مشاهده می‌شوند.

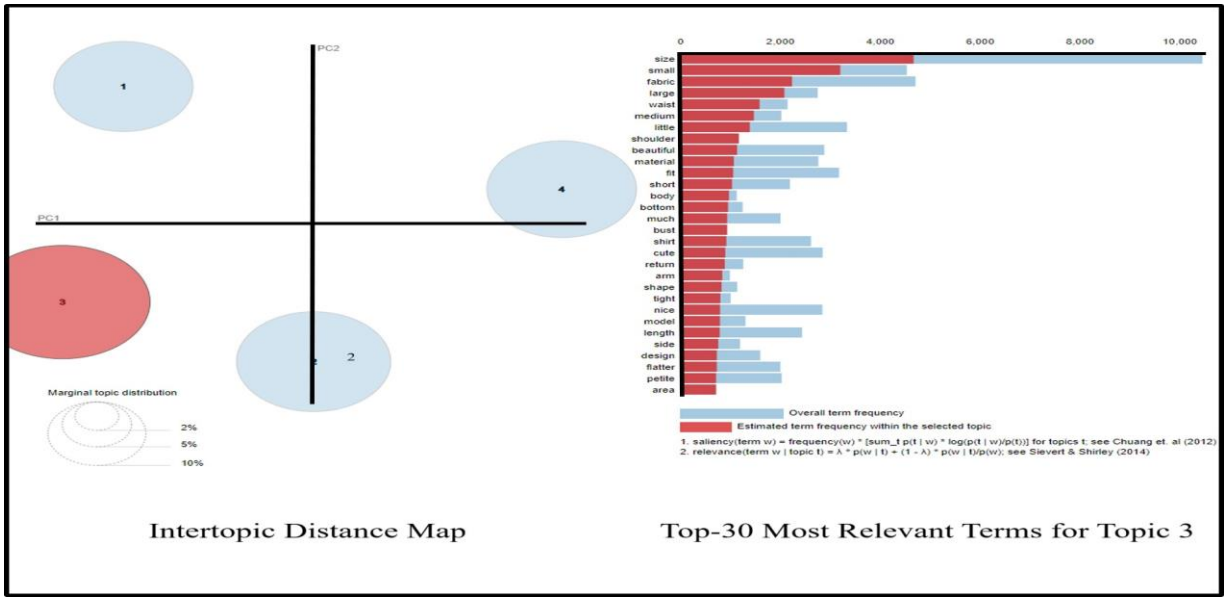
در مرحله‌ی بعد، برای اطمینان حاصل‌کردن از اینکه کلمات به‌درستی براساس بخش گفتارشان[۲۲] به‌صورت کلمه بیان می‌شوند، با استفاده از یک تابع، اسم، صفت، قید، و یا فعل بودنشان مشخص شده است. پس از آن با حذف علامت‌های نگارشی، کلمات توقف و کلمات دارای کمتر از سه حرف، تبدیل حرف اول کلمات به حرف کوچک و ریشه‌یابی[۲۳] تمیزسازی داده‌ها انجام شده است. سپس با استفاده از کلمات اسم و صفت به ساخت مدل بایگرام[۲۴] به کمک روش Word2vec (برای استخراج ویژگی) و برآورد ۳۰ بایگرام پرتکرار پرداخته شده است. بایگرام‌های مذکور در شکل ۷ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، عبارت‌هایی مانند تمجید فراوان نشان می‌دهد که در حالت کلی، مشتریان از خرید خود رضایت دارند.

از طرفی، نوع اندام، قیمت فروش، ارزش کالا با توجه به قیمت، مقایسه با فروشنده‌های محلی، وزن سبک، و نحوه‌ی شست‌وشو از عبارت‌های پرتکرار و در نتیجه از موضوعاتی هستند که باید به آن‌ها توجه کرد. دسته‌بندی لباس‌ها، مانند: شلوار جین، دامن، ژاکت، و غیره، تناسب و اندازه‌ی لباس‌ها و همچنین فصل‌های سال نیز از موضوعات مهم در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۸، نمودار فاصله بین موضوعی و کلمات پرتکرار مربوط به موضوع یک؛ در شکل ۹، نمودار بین موضوعی و کلمات پرتکرار مربوط به موضوع دو؛ در شکل ۱۰، نمودار فاصله بین موضوعی و کلمات پرتکرار موضوع سه؛ و در شکل ۱۱، نمودار فاصله بین موضوعی و کلمات پرتکرار مربوط به موضوع چهار مشاهده می‌شوند. همچنین، در جدول ۲، بررسی هر یک از موضوع‌ها و کلمات مرتبط با آن‌ها به صورت مختصر ارائه شده است. تحلیل‌های صورت‌گرفته، درک جامعی از موضوع‌های کلیدی و نگرانی‌هایی که مشتریان هنگام بررسی اقلام لباس زنانه در هر یک از چهار موضوع دارند، ارائه می‌دهند. موضوع قابل‌توجه این است که در جدول اخیر، ترتیب دسته‌بندی هر یک از موضوع‌ها براساس تعداد کلمات به‌کاررفته در آن دسته است. بنابراین در موضوع یک، پراهمیت‌ترین مورد: تناسب و اندازه؛ در موضوع دو: پارچه و راحتی؛ در موضوع سه: تناسب و اندازه؛ و در موضوع چهار، تناسب و راحتی هستند. پس از آن، تخصیص دیریکله‌ی پنهان برای حالت‌های ۲ تا ۲۳ موضوعی آزمایش و با توجه به معیار coherence، بهترین تعداد موضوع‌ها، چهار در نظر گرفته شده است.

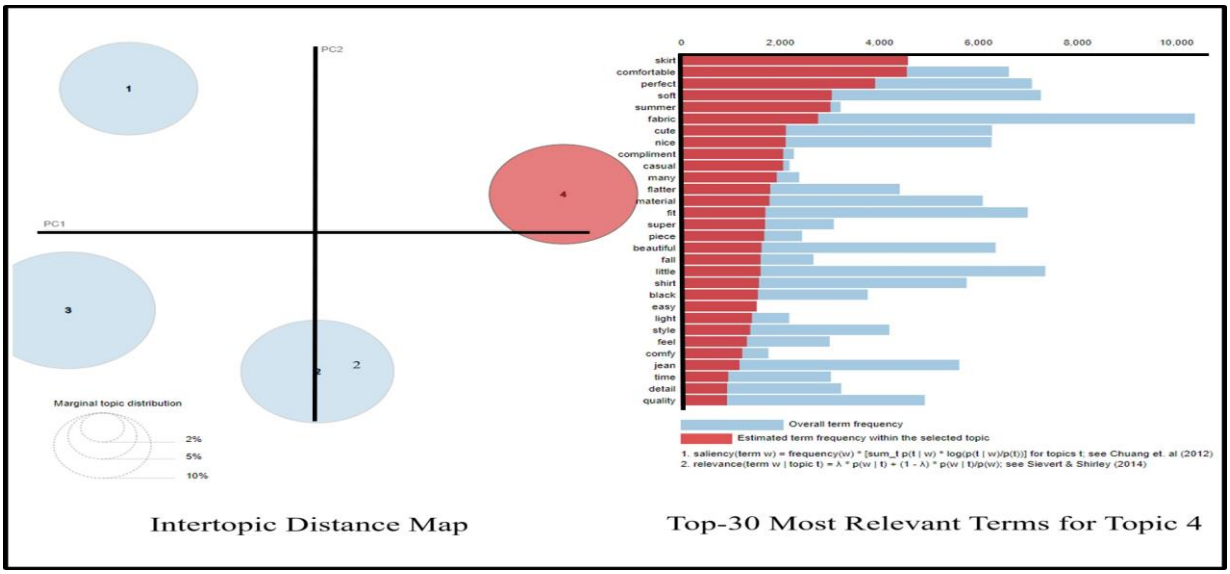
[22] Part-of-speech
[23] Lemmatization
[24] Bigram



شکل ۹. نمودار فاصله‌ی بین موضوعی و کلمات پرتکرار موضوع دو.



شکل ۱۰. نمودار فاصله‌ی بین موضوعی و کلمات پرتکرار موضوع سه.



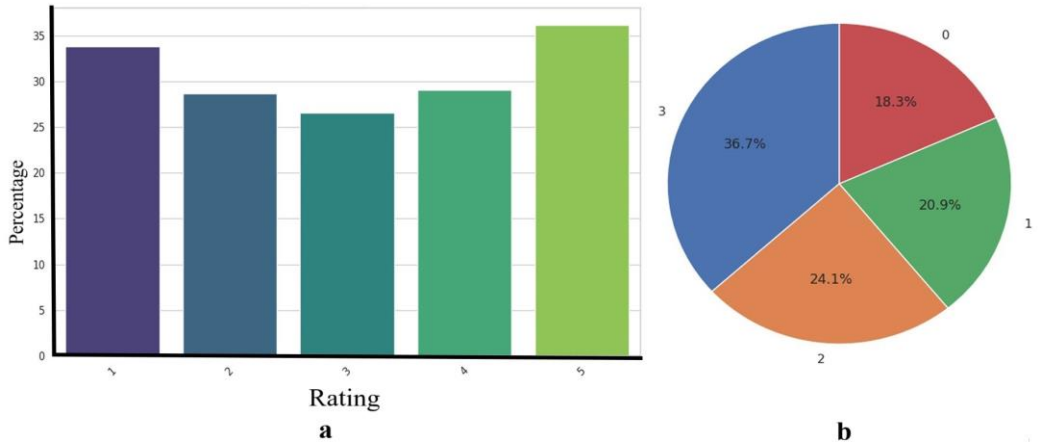
شکل ۱۱. نمودار فاصله‌ی بین موضوعی و کلمات پرتکرار موضوع چهار.

جدول ۲. تجزیه‌وتحلیل نتایج مدل‌سازی موضوعی.

	Items		Frequent words	Analysis
Topics	Topic one (focusing on pants and jeans)	Fit	"size," "petite," "regular," "small," "waist," "short," "usual"	Phrases such as size, petite, regular, small, waist, short, and usual emphasize the importance of fit. Buyers frequently mention the fit of pants or jeans, the need for various sizes (e.g., small), and achieving a perfect fit.
		Comfort	"comfortable," "stretch","soft", "skinny"	Words such as comfortable, stretch, and soft indicate that buyers prioritize the feel of the clothing.
		Style	"pair," "perfect," "nice," "cute," "style," "quality"	Words such as pair, perfect, nice, cute, style, and quality highlight the importance of the appearance and overall style of the pants and jeans.
		Shopping experience	"store," "sale," and "retailer"	Phrases such as stores, sale, and retailer indicate that the shopping experience, including the location and method of purchasing items, plays a significant role in customer satisfaction.
		Occasions and applications	"time," "buy," "right,", "glad"	Words such as time, buy, right, and glad indicate that customers evaluate these items based on their suitability for various occasions and their overall satisfaction with their purchase.
	Topic two (focusing on jacket and shirt)	Fabric and comfort	"soft," "fabric," "material," "warm," "nice"	Words such as soft, fabric, material, warm, and nice indicate that customers value comfortable and high-quality materials in jackets and shirts.
		Style	"beautiful," "cute," "black," "blue," "button," and "detail"	Phrases such as beautiful, cute, black, blue, button, and details indicate that visual appeal and design details are very important to customers.
		Price and value	"price," "sale," and "retailer"	Words such as price, sale, and retailer indicate that customers consider the cost and value of money when evaluating these items. Finding good deals and feeling that the item is worth the price are also important factors.
		Fit	"small" and "little"	The use of words such as small and little indicates that fit and size are important considerations. Customers often discuss whether items meet their expectations and whether the sizing is accurate.
		Shopping experience	"store," "online," "photo," and "picture"	Phrases such as store, online, photo, and picture highlight the importance of the shopping experience, both in-store and online. Customers discuss how items appear in photos versus in person and their overall shopping experience.
	Topic three (focusing on shirts and tops)	Fit	"size," "small," "large," "medium," "shoulder," "waist," "body," "bust," and "arm"	Words such as size, small, large, medium, shoulder, waist, body, bust, and arm indicate a strong emphasis on how shirts fit different parts of the body and concerns regarding overall sizing.
		Fabric and material	"fabric," "material," and "soft"	Phrases such as fabric, material, and soft highlight the importance of fabric quality and comfort. Customers often comment on their feelings about the materials and their overall quality.
		Style	"beautiful," "cute," "nice," "design," "flatter," "shape," and "model"	Words such as beautiful, cute, nice, design, flatter, shape, and model indicate the importance of appearance and style. Customers consider how shirts look and whether they are flattering to their body shape.
		Occasions and applications	"return", "design"	The word return indicates that some reviews might discuss the return process due to fit or quality issues. Words such as design suggest that customers consider shirts for various occasions.
		Details	"short," "bottom," "tight," "length," "side," "area"	Terms like short, bottom, tight, length, side, and area highlight the significance of specific details regarding the fit and design of shirts to customers. These terms frequently appear in customer feedback, underscoring the importance of particular shirt attributes in influencing customer satisfaction.
	Topic four (focusing on skirts and casual	Fit and comfort	"comfortable," "soft," "fit," "comfy," "perfect"	Terms like comfortable, soft, fit, comfy, and perfect suggest that customers prioritize the feel and fit of skirts. The focus is on selecting items that offer both comfort and a proper fit.
		Style	“cute,” “nice,” “beautiful,” “flatter,” “style,” “detail,” and “quality”	Words such as cute, nice, beautiful, flatter, details, and quality underscore the significance of appearance and style. Customers value skirts that are visually appealing and feature attractive design elements.
		Occasions and applications	"casual," "summer," "fall," "piece," "easy,"	Phrases such as casual, summer, fall, piece, and easy suggest that customers seek versatile skirts suitable for different seasons and occasions. The ability to pair these skirts with various tops, such as shirts and blouses, is also a key consideration.
		Fabric and material	"fabric," "material," "light," and "feel"	Words such as fabric, material, light, and feel highlight the importance of fabric quality and the tactile experience of skirts. Customers frequently remark on the suitability of materials for various weather conditions and their overall quality.
		Shopping experience and satisfication	"compliment," "time," and "glad"	Words such as compliments, time, and glad suggest that customer satisfaction is significantly influenced by the feedback they receive when wearing skirts. Positive experiences and compliments from others enhance their overall satisfaction with the purchase.

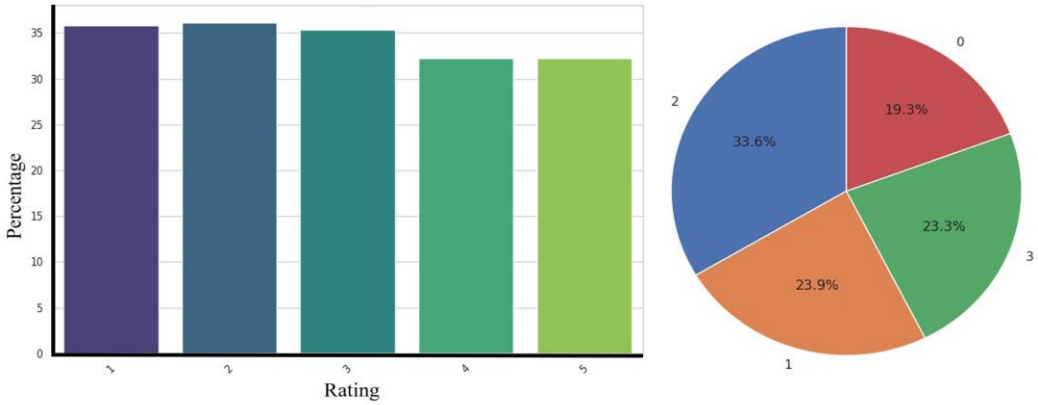
درنهایت، تجزیه‌وتحلیل مربوط به هر خوشه با توجه به درصد امتیازها، مصورسازی ویژگی‌های عددی، و موضوع‌های اصلی در آن خوشه انجام شده است. در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴، به ترتیب درصد موضوع‌ها و امتیازها در خوشه‌های یک، دو، و سه مشاهده می‌شوند.

در شکل ۱۵، نحوه‌ی توزیع برخی از ویژگی‌های عددی در هر سه خوشه مشاهده می‌شود. با توجه به نمودارهای گزارش‌شده، خوشه‌ی یک، شامل زنان جوان و میانسال با گروه سنی ۲۵-۴۰ است، که نظرهای نسبتاً دقیقی (۱۰-۵۰ کلمه) نوشته‌اند و حدود ۴۷٪ از نظرهای آن‌ها مربوط به موضوع ۳ و متمرکز بر تناسب و راحتی، پارچه و جنس، ظاهر و استایل، و جزئیات پیراهن و تاپ است. خوشه‌ی دو، دربرگیرنده‌ی نظرهای زنان میانسال و سالمند با گروه سنی ۶۰-۳۵ سال است؛ که نظرهای آن‌ها به‌صورت توصیفی با نزدیک به ۴۰-۹۰ کلمه و تقریباً ۳۳٪ آن‌ها مربوط به موضوع ۲ است. همان‌طور که گفته شد، این موضوع بیشتر روی ژاکت و پیراهن، راحتی، پارچه و ارزش، و قیمت متمرکز شده است. خوشه‌ی سه، شامل نظرهای همه‌ی گروه‌های سنی از ۲۵ تا ۶۰ سال است، که نظرهای بسیار دقیق با تعداد ۸۰-۱۱۰ کلمه نوشته‌اند. نزدیک به ۴۲٪ از نظرهای اخیر مربوط به موضوع ۲ است.



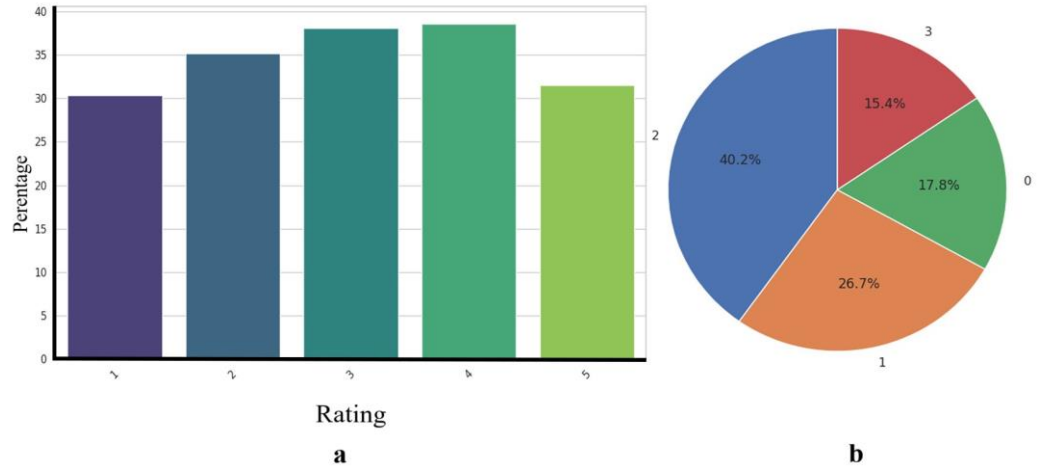
a b

شکل ۱۲. (a) درصد امتیازها، (b) درصد موضوع‌ها (در خوشه‌ی یک).



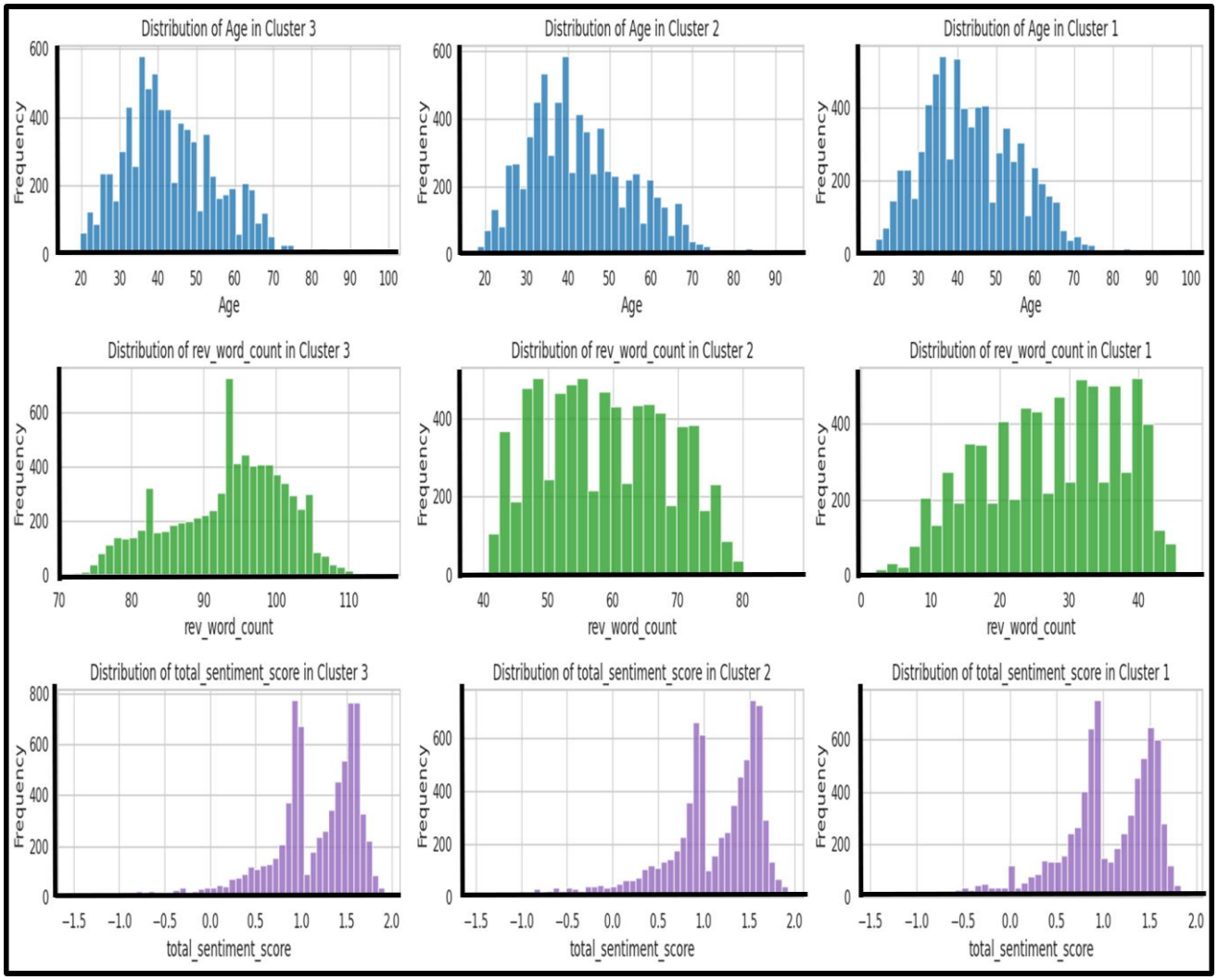
a b

شکل ۱۳. (a) درصد امتیازها، (b) درصد موضوع‌ها (در خوشه‌ی دو).



a b

شکل ۱۴. (a) درصد موضوع‌ها، (b) درصد امتیازها (در خوشه‌ی سه).



شکل ۱۵. نحوه‌ی توزیع ویژگی‌های عددی در خوشه‌ها.

۳.۴. انتخاب ویژگی

پس از بررسی میزان همبستگی ویژگی‌ها با ویژگی امتیاز به‌عنوان متغیر هدف و با توجه به درستی به‌دست‌آمده از اعمال مدل‌های یادگیری ماشین بر مجموعه‌ی داده، تصمیم گرفته شد که به‌منظور انجام مطالعه‌ی حاضر از ویژگی متن نظرها و امتیاز استفاده شود.

۳.۵. پیش‌پردازش داده‌ها و استخراج ویژگی

در مطالعه‌ی حاضر، به‌منظور انجام پیش‌پردازش و استخراج ویژگی از الگوریتم TFIDF به همراه حذف کلمات توقف استفاده شده است؛ که در ادامه، به بیان توضیح مختصری از آن‌ها پرداخته شده است.

- **کلمات توقف:** رایج‌ترین اصطلاح‌ها در یک زبان که ارزش معنایی ندارند و فقط به درک کلی متن کمک می‌کنند، را کلمات توقف می‌گویند؛ که با حروف تعریف، حروف اضافه، علائم نگارشی، حروف ربط، و ضمایر مشخص می‌شوند. حذف آن‌ها مقدار توکن‌ها را کاهش می‌دهد و تحلیل را بهبود می‌بخشد.[۶]

- **الگوریتم TFIDF برای استخراج ویژگی:** به‌منظور تبدیل متن به بردار و همچنین امکان محاسبه‌ی وزن نسبت داده‌شده به هر عبارت موجود در سند، ابزار TfidfVetorizer از کتابخانه‌ی sklearn استفاده می‌شود، که برای انجام عملیات اخیر از الگوریتم TF-IDF استفاده می‌شود؛ و درنهایت، کلمات موجود در متن نظر را به یک ماتریس برداری تبدیل می‌کند.[۸ و ۱۱]

۳.۶. متعادل‌کردن مجموعه‌ی داده

همان‌طور که در قسمت تجزیه‌وتحلیل داده‌های اکتشافی در بخش بررسی ویژگی امتیاز مشاهده شد، مجموعه‌ی داده دارای توزیع نامتعادل کلاس امتیازهاست. بنابراین، به‌منظور اعمال مدل‌های یادگیری ماشین، ابتدا باید مجموعه‌ی داده متعادل شود. از آنجایی که در روش‌های معمول، افزایش داده‌های اقلیت، مانند OverSampling، ممکن است داده‌های تکراری زیادی به مجموعه اضافه و نتایج را غیرقابل‌اعتماد کنند، روش انتخابی برای متعادل‌کردن مجموعه‌ی داده در مطالعه‌ی حاضر، روش SMOTE[۲۵] انتخاب شده است؛ که با استفاده از الگوریتم k- نزدیک‌ترین همسایه به‌منظور متعادل‌کردن مجموعه‌ی داده، نمونه‌های مصنوعی جدید تولید می‌کند.[۱۵] از آنجایی که متغیر هدف امتیاز معمولاً پنج کلاس (امتیاز ۱ تا ۵) دارد، به‌منظور انجام مطالعه و اجرای مدل‌ها در حالت‌های دوکلاسه و سه‌کلاسه، امتیازها دسته‌بندی شده‌اند. در حالت دوکلاسه، امتیازهای قبل از ۳ به‌عنوان کلاس ۰ و امتیاز ۳ و بالاتر به‌عنوان کلاس ۱ تعریف شده‌اند. در حالت سه‌کلاسه، امتیازهای قبل از

[25] Synthetic Minority Oversampling Technique

۳ به‌عنوان کلاس ۰، امتیاز ۳ به‌عنوان کلاس ۱، و امتیازهای بالاتر از آن به‌عنوان کلاس ۲ در نظر گرفته شده‌اند. در مرحله‌ی بعد، به اجرای مدل‌های یادگیری ماشین پرداخته شده است. پس از بررسی کارهای مرتبط و مطالعات پیشین و همچنین اعمال برخی از مدل‌های یادگیری ماشین و با توجه به درستی حاصل، مدل‌های یادگیری ماشین در نظر گرفته‌شده برای مطالعه‌ی حاضر عبارت از: رگرسیون لجستیک، ماشین بردار پشتیبان، جنگل تصادفی، LightGBM، درخت تصمیم، XGBoost، بیز ساده‌ی چندجمله‌ای، و بیز ساده‌ی مکمل (CNB)[۲۶] بوده‌اند، که در ادامه، به بیان توضیح مختصری از آن‌ها پرداخته شده است.

۳.۷. مدل‌های یادگیری ماشین

- **رگرسیون لجستیک،** از مدل‌های یادگیری ماشین تحت‌نظارت است، که در کلاس‌بندی، تحلیل، و پیش‌بینی با استفاده از مشاهده‌های قبلی یک مجموعه‌ی داده استفاده می‌شود. رگرسیون لجستیک، از یک تابع لجستیک به نام تابع سیگموئید که احتمال رخ‌دادن متغیر وابسته را بین ۰ و ۱ محدود می‌کند، برای تخمین احتمال‌ها استفاده می‌کند.[۱۲ و۲۶]
- **ماشین بردار پشتیبان،** از الگوریتم‌های یادگیری ماشین تحت‌نظارت به‌منظور انجام وظایف کلاس‌بندی است و هدف آن یافتن ابرصفحه‌ای است که بیشترین حاشیه بین کلاس‌های داده‌های آموزشی را داشته باشد.[۵ و ۲۶]
- **درخت تصمیم،** روش یادگیری ماشین تحت‌نظارت است، که در مسائل رگرسیون و همچنین کلاس‌بندی استفاده می‌شود و با خلاصه‌کردن ویژگی-های داده از داده‌های آموزشی به پیش‌بینی مقدار متغیر هدف کمک می-کند.[۲۶ و ۲۷]
- **جنگل تصادفی،** از روش‌های کلاس‌بندی مبتنی بر یادگیری گروهی[۲۷] است، که با استفاده از روش گروه‌بندی موازی[۲۸] و ترکیب چندین درخت تصمیم و انتخاب تصادفی داده‌ها و ویژگی‌ها، عملکرد مدل را بهبود می‌بخشد. بنابراین، مشکل بیش‌برازش را به میزان کمینه می‌رساند و درستی پیش‌بینی را افزایش می‌دهد.[۱۲ و ۲۶]
- **LightGBM،**[29] الگوریتمی مبتنی بر یادگیری گروهی و درخت‌های تصمیم است، که با استفاده از چارچوب GBDT[30] طراحی شده است. این مدل با استفاده از روش‌های نمونه‌برداری یک‌طرفه‌ی مبتنی بر گرادیان (GOSS)[۳۱] و دسته‌بندی ویژگی‌های انحصاری (EFB)[۳۲]، در حالی که زمان آموزش و استفاده از حافظه را کاهش می‌دهد، عملکرد مدل را بهبود می‌بخشد.[۵ و ۲۶]
- **بیز ساده‌ی چندجمله‌ای و مکمل:** بیز ساده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین تحت‌نظارت مبتنی بر احتمال و قضیه‌ی بیز با فرض استقلال بین هر جفت ویژگی است و هدف آن بهبود احتمال پسین با استفاده از داده‌های آموزشی است، که درنهایت منجر به یک قانون تصمیم‌گیری برای داده‌های جدید می‌شود.[۲۶ و ۲۸] بیز ساده‌ی چندجمله‌ای براساس تعداد دفعاتی که یک کلمه در یک سند ظاهر می‌شود، عمل می‌کند. الگوریتم بیز ساده‌ی مکمل، نیز اقتباسی از بیز ساده‌ی چندجمله‌ای است، که به جای محاسبه‌ی احتمال یک نمونه متعلق به یک کلاس خاص، احتمال تعلق نمونه به همه‌ی کلاس‌ها را محاسبه می‌کند.[۱۲ و ۲۹]
- **XGBoost** [۳۳] (تقویت گرادیان شدید)، شکلی از الگوریتم‌های تقویت گرادیان است که تقریب‌های دقیق‌تری را هنگام تعیین بهترین مدل در نظر می‌گیرد و مانند جنگل‌های تصادفی، یک الگوریتم یادگیری مجموعه‌ای است که یک مدل نهایی را براساس یک سری مدل‌های جداگانه، معمولاً درخت‌های تصمیم، تولید می‌کند.[۲۶ و ۲۷]

۳.۸. معیارهای ارزیابی

معیارهای ارزیابی استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر عبارت‌اند از: درستی، دقت، پوشش، و امتیاز F1، که خلاصه‌ای از نحوه‌ی محاسبه و توضیحات آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است.

۴. ارزیابی و نتایج

در بخش کنونی، به بیان معیارهای ارزیابی برآوردشده توسط مدل‌های یادگیری

جدول ۳. معیارهای ارزیابی و نحوه‌ی محاسبه.[۶، ۹، و ۱۱]

Name	Formula	Definition
Recall	$TPR = \frac{TP + TN}{FN + TP}$	**The proportion of true positive samples that are correctly classified as positive**
Accuracy	$A = \frac{TP + TN}{TN + FP + FN + TP}$	**The proportion of correct predictions among the total number of predictions**
Precision	$P = \frac{TP}{FP + TP}$	**The proportion of predicted positive instances that are actually positive**
F1-Score	$F1 = 2\frac{P \times TPR}{P + TPR}$	**To measure the harmonic mean of precision and recall, providing a balanced evaluation by considering both false positives and false negatives**

[26] Complement Naive Bayes
[27] Ensemble learning
[28] Parallel ensembling
[29] Light Gradient Boosting Machine
[30] Gradient Boosted Decision Trees
[31] Gradient-based One-Side Sampling
[32] Exclusive Feature Bundling
[33] Extreme Gradient Boosting (XGBoost)

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج حالت دوکلاسه با کارهای مشابه.

		shetty, et.al (2023)				This study			
		Evaluation Metrics							
		Accuracy	Precision	Recall	F1-score	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Machine Learning Models	Support Vector Machine	0.94	0.94	0.99	0.96	0.95	0.96	0.95	0.95
	Logistic regression	0.93	0.94	0.99	0.97	0.90	0.91	0.92	0.91
	Decision Tree	-	-	-	-	0.91	0.92	0.92	0.92
	Random forest	0.90	0.90	1.00	0.95	0.98	0.96	0.99	0.98
	AdaBoosting	0.91	0.93	0.97	0.95	-	-	-	-
	Bernoulli Naive Bayes	0.92	0.95	0.97	0.96	-	-	-	-
	Multinomial Naive Bayes	0.89	0.89	1.00	0.94	0.87	0.86	0.94	0.89
	Complement Naive Bayes	-	-	-	-	0.87	0.92	0.86	0.89
	XGBoost	-	-	-	-	0.91	0.91	0.94	0.93
	LightGBM	-	-	-	-	0.90	0.91	0.92	0.91

جدول ۵. نتایج حالت‌های سه‌کلاسه و پنج‌کلاسه.

		Three-class				Five-class			
		Evaluation Metrics							
		Accuracy	Precision	Recall	F1-score	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Machine Learning Models	Support Vector Machine	0.90	0.90	0.88	0.89	0.83	0.83	0.83	0.83
	Logistic regression	0.84	0.83	0.78	0.79	0.75	0.74	0.74	0.75
	Decision Tree	0.83	0.81	0.81	0.81	0.72	0.72	0.72	0.72
	Random forest	0.95	0.96	0.93	0.94	0.91	0.92	0.91	0.91
	Multinomial Naive Bayes	0.78	0.83	0.68	0.67	0.73	0.73	0.73	0.73
	Complement Naive Bayes	0.81	0.81	0.75	0.76	0.72	0.73	0.72	0.72
	XGBoost	0.86	0.87	0.82	0.83	0.79	0.80	0.79	0.79
	LightGBM	0.85	0.85	0.81	0.82	0.81	0.81	0.81	0.80

ماشین اجراشده در حالت‌های دوکلاسه، سه‌کلاسه، و پنج‌کلاسه پرداخته شده است. در بین کارهای مرتبط بیان‌شده در بخش‌های قبل، مطالعه‌ی شتی و همکاران (۲۰۲۳)،[۱۲] با عنوان کاوش احساس‌های بازخورد داده‌های تجارت الکترونیک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، دارای متغیر هدف یکسان با مطالعه‌ی حاضر بوده است، اما فقط در حالت دوکلاسه صورت گرفته است. در جدول ۴، به‌منظور مقایسه‌ی معیارهای ارزیابی، دو مطالعه‌ی صورت-گرفته طراحی شده‌اند. معیارهای ارزیابی بیان‌شده در جدول اخیر، هر دو بر روی مجموعه‌ی داده‌ی یکسان و با استفاده از الگوریتم استخراج ویژگی TF-IDF در نظر گرفته شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بالاترین درستی در مطالعه‌ی شتی و همکاران، مربوط به مدل ماشین بردار پشتیبان با درستی ۰٫۹۴ و بهترین عملکرد در مطالعه‌ی حاضر مربوط به مدل جنگل تصادفی با درستی ۰٫۹۸، و پس از آن درستی مدل ماشین بردار پشتیبان برابر با ۰٫۹۵ در نظر گرفته شده است. موضوع قابل‌توجه این است که در مطالعه‌ی شتی و همکاران (۲۰۲۳)، به‌منظور رفع نامتعادل‌بودن مجموعه‌ی داده، راهکاری ارائه نشده است.

مقادیر درستی، دقت، پوشش، و امتیاز F1 برای مدل‌های یادگیری ماشین اجراشده در حالت‌های سه‌کلاسه و پنج‌کلاسه در جدول ۵ مشاهده می‌شود. در حالت سه‌کلاسه، بهترین عملکرد مربوط به مدل جنگل تصادفی با درستی ۰٫۹۵، دقت ۰٫۹۶، پوشش ۰٫۹۳، و امتیاز F1 ۰٫۹۴ بوده است. پس از آن مدل ماشین بردار پشتیبان با داشتن مقادیر درستی ۰٫۹۰، دقت ۰٫۹۰، پوشش ۰٫۸۸، و امتیاز F1 ۰٫۸۹ عملکرد خوبی داشته است. در حالت پنج‌کلاسه نیز بهترین عملکرد مربوط به مدل جنگل تصادفی با درستی ۰٫۹۱، دقت ۰٫۹۲، پوشش

۰٫۹۱ ، و امتیاز F1 ۰٫۹۱ بوده است. پس از آن مدل ماشین بردار پشتیبان با داشتن مقادیر درستی ۰٫۸۳، دقت ۰٫۸۳، پوشش ۰٫۸۳، و امتیاز F1 ۰٫۸۳ عملکرد خوبی داشته است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آینده

با توجه به اهمیت شناخت رفتار مشتریان به‌منظور ادامه‌ی فعالیت در دنیای امروز، در مطالعه‌ی حاضر به بررسی احساس‌های نظرهای تجارت الکترونیک پوشاک زنان با استفاده از روش‌های پردازش زبان طبیعی و یادگیری ماشین پرداخته شده است. مدل‌های یادگیری ماشین استفاده‌شده، شامل ماشین بردار پشتیبان، رگرسیون لجستیک، درخت تصمیم، جنگل تصادفی، بیز ساده‌ی چندجمله‌ای، بیز ساده‌ی مکمل، XGBoost، و LightGBM هستند. به‌منظور برداری‌کردن و استخراج ویژگی متن نظرها از الگوریتم‌های TF-IDF و Word2vec استفاده شده است. مدل‌سازی موضوعی با استفاده از روش تخصیص دیریکله‌ی پنهان و خوشه‌بندی k-means انجام شده است. معیارهای ارزیابی استفاده‌شده در مطالعه‌ی حاضر، شامل درستی، دقت، پوشش، و امتیاز F1 بوده‌اند. از آنجایی که متغیر هدف امتیاز در حالت معمول پنج کلاس (امتیاز ۱ تا ۵) دارد، به‌منظور انجام مطالعه و اجرای مدل‌ها در حالت‌های دوکلاسه و سه‌کلاسه، امتیازها دسته‌بندی شده‌اند. در حالت دوکلاسه، امتیازهای قبل از ۳ به‌عنوان کلاس ۰ و امتیاز ۳ و بالاتر به‌عنوان کلاس ۱ تعریف شده‌اند. در حالت سه‌کلاسه، امتیازهای قبل از ۳ به‌عنوان کلاس ۰، امتیاز ۳ به‌عنوان کلاس ۱، و امتیازهای بالاتر از آن به‌عنوان کلاس ۲ در نظر گرفته شده‌اند. پس از اعمال الگوریتم‌های یادگیری ماشین و پردازش زبان طبیعی در هر سه حالت، بهترین عملکرد مربوط به مدل جنگل تصادفی با درستی ۰٫۹۸ در حالت دوکلاسه، ۰٫۹۵ در حالت سه‌کلاسه، و ۰٫۹۱ در حالت پنج‌کلاسه برآورد شده‌اند.

مطالعه‌ی حاضر، ترکیبی از متن‌کاوی و پردازش زبان طبیعی است، اما براساس اهداف و روش‌شناسی، بیشتر بر روی حوزه‌ی متن‌کاوی متمرکز بوده است. هدف اصلی پژوهش، تحلیل و طبقه‌بندی نظرهای مشتریان با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین بوده است. روش‌های پردازش زبان طبیعی، مانند: TF-IDF و Word2Vec برای برداری‌سازی و استخراج ویژگی‌های متنی استفاده شده و نقش پشتیبانی‌کننده‌ای در پیش‌پردازش داده‌ها و آماده‌سازی آن‌ها برای مدل‌سازی ایفا کرده‌اند. علاوه‌بر این، فرآیندهایی مانند دسته‌بندی مجدد متغیر هدف، متعادل‌سازی داده‌ها با SMOTE و استفاده از الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل احساس‌ها، نشان‌دهنده‌ی تمرکز پژوهش بر کشف الگوها و پیش‌بینی‌ها از داده‌های متنی هستند. در حالی که روش‌های پردازش زبان طبیعی در بخش‌هایی، مانند مدل‌سازی موضوعی و استخراج ویژگی به‌کار رفته‌اند، نقش اصلی آن‌ها پشتیبانی از تحلیل داده‌های متنی و مدل‌سازی بوده است. بنابراین، پژوهش حاضر، بیشتر در حوزه‌ی متن‌کاوی قرار می‌گیرد و روش‌های پردازش زبان طبیعی به‌عنوان ابزارهایی برای تسهیل فرآیند متن‌کاوی استفاده می‌شوند. به‌منظور انجام پژوهش در کارهای آینده می‌توان علاوه‌بر مدل‌های یادگیری ماشین، از مدل‌های یادگیری عمیق نیز به‌منظور تجزیه‌وتحلیل احساس‌ها استفاده کرد. روش‌های استخراج ویژگی در پردازش زبان طبیعی نیز الگوریتم‌های متفاوتی دارند، که می‌توان به‌منظور بررسی نظرها و رفتار مشتریان آن‌ها را به‌کار گرفت.

References - منابع

1. Mabrouk, A., Redondo, R.P.D. and Kayed, M., 2021. Seopinion: summarization and exploration of opinion from e-commerce websites. *Sensors*, *21*(2), pp.636. https://doi.org/10.3390/s21020636.
2. Huang, H., Asemi, A. and Mustafa, M.B., 2023, July. Sentiment analysis application in e-Commerce: current models and future directions. In *International Conference on Electronic Government and the Information Systems Perspective*, pp.67-72. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39841-4_5.
3. Kasimu, M., Hellen, N. and Marvin, G., 2023. Explainable sentiment analysis for textile personalized marketing. In *The Fourth Industrial Revolution and Beyond: Select Proceedings of IC4IR+*, pp.473-488. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8032-9_33.
4. Zainal, S.R.M. and Xiang, C., 2023. Examining women's e-commerce clothing reviews. *International Journal of Business and Technology Management*, *5*(1), pp.22-38. Available at: https://myjms.mohe.gov.my/index.php/ijbtm/article/view/21637. Date accessed: 04 aug. 2024.
5. Lin, X., 2020, April. Sentiment analysis of e-commerce customer reviews based on natural language processing. In *Proceedings of the 2020 2nd international conference on big data and artificial intelligence*, pp.32-36. https://doi.org/10.1145/3436286.3436293.
6. Kubrusly, J., Neves, A.L. and Marques, T.L., 2022. A statistical analysis of textual e-commerce reviews using tree-based methods. *Open Journal of Statistics*, *12*(3), pp.357-372. https://doi.org/10.4236/ojs.2022.123023.
7. Muniasamy, A. and Bhatnagar, R., 2022. Analyzing online reviews of customers using machine learning techniques. In *Rising Threats in Expert Applications and Solutions: Proceedings of FICR-TEAS 2022*, pp.485-493. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1122-4_51.

8. Sunil, N. and Shirazi, F., 2023, July. Customer review classification using machine learning and deep learning techniques. In *International Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 581-597. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35915-6_42.

9. Loukili, M., Messaoudi, F. and El Ghazi, M., 2023. Sentiment analysis of product reviews for e-commerce recommendation based on machine learning. *International Journal of Advances in Soft Computing & Its Applications*, *15*(1). https://doi.org/10.15849/IJASCA.230320.01.

10. Sharma, H., 2023. Using Topic Modeling for Extracting Customers' Expectations: a case of women apparel. *Business Perspectives and Research*, p.22785337221150831. https://doi.org/10.1177/22785337221150831.

11. Shetty, A.M., Aljunid, M.F., Manjaiah, D.H. and Shaik Afzal, A.M., 2023, July. Hyperparameter optimization of machine learning models using grid search for amazon review sentiment analysis. In *International Conference on Data Science and Applications*, pp. 451-474. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7814-4_36.

12. Shetty, A.M., Aljunid, M.F. and Manjaiah, D.H., 2023, February. Sentiment exploring on feedback of e-commerce data using machine learning algorithms. In *International Conference on Emerging Research in Computing, Information, Communication and Applications*, pp.107-129. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7622-5_8.

13. Yabes, I., Aryanti, N., Pradana, R.J., Setiawan, K.E. and Hasani, M.F., 2023, October. Classifying and predicting the rating sentiment of women's e-commerce clothing reviews: a comparative study using SVM, ANN, and BERT Models. In *2023 5th International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS)*, pp.1-6. https://doi.org/10.1109/ICORIS60118.2023.10352189.

14. Shashank, S. and Behera, R.K., 2024. Factors influencing recommendations for women's clothing satisfaction: a latent dirichlet allocation approach using online reviews. *Journal of Retailing and Consumer Services*, *81*, pp.104011. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2024.104011.

15. Padurariu, C. and Breaban, M.E., 2019. Dealing with data imbalance in text classification. *Procedia Computer Science*, *159*, pp.736-745. https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.229.

16. Mahdikhani, M., 2023. Exploring commonly used terms from online reviews in the fashion field to predict review helpfulness. *International Journal of Information Management Data Insights*, *3*(1), pp.100172. https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2023.100172.

17. Li, M., Zhao, L. and Srinivas, S., 2023. It is about inclusion! Mining online reviews to understand the needs of adaptive clothing customers. *International Journal of Consumer Studies*, *47*(3), pp.1157-1172. https://doi.org/10.1111/ijcs.12895.

18. Shobha Rani, V., Deepthi, K., Ramu, V. and Shirisha, G., 2024, January. Sentiment forecasting in women's fashion e-Commerce: a machine learning perspective. In *International Conference on Multi-Strategy Learning Environment*, pp.597-610. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1488-9_44.

19. NICAPOTATO; Women's e-commerce clothing reviews, 2018. https://www.kaggle.com/datasets/nicapotato/womens-ecommerce-clothing-reviews.

20. Heng, Y., Gao, Z., Jiang, Y. and Chen, X., 2018. Exploring hidden factors behind online food shopping from amazon reviews: a topic mining approach. *Journal of Retailing and Consumer Services*, *42*, pp.161-168. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2018.02.006.

21. Kim, S.W. and Gil, J.M., 2019. Research paper classification systems based on TF-IDF and LDA schemes. *Human-centric Computing and Information Sciences*, *9*, pp.1-21. https://doi.org/10.1186/s13673-019-0192-7.

22. Zhong, K., Jackson, T., West, A. and Cosma, G., 2024. Natural language processing approaches in industrial maintenance: a systematic literature review. *Procedia Computer Science*, *232*, pp.2082-2097. https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.029.

23. Vadivel, A., Meena, K., Sumathy, P., Selvaraj, H., Shanmugavadivu, P., & S. G., S., Eds., 2024. *Interactive and Dynamic Dashboard: Design Principles*,1st Edn., CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003542735.

24. Cui, M., 2020. Introduction to the k-means clustering algorithm based on the elbow method. *Accounting, Auditing and Finance*, *1*(1), pp.5-8. https://dx.doi.org/10.23977/accaf.2020.010102.

25. Januzaj, Y., Beqiri, E. and Luma, A., 2023. Determining the optimal number of clusters using silhouette score as a data mining technique. *International Journal of Online & Biomedical Engineering*, *19*(4). https://doi.org/10.3991/ijoe.v19i04.37059.

26. Sarker, I.H., 2021. Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. *SN*

computer science, *2*(3), pp.160. https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-x.

27. Pedregosa, F., 2011. Scikit-learn: Machine learning in python Fabian. *Journal of machine learning research*, *12*, pp.2825. https://doi.org/10.1002/hbm.25822.

28. Noor, A. and Islam, M., 2019, July. Sentiment analysis for women's e-commerce reviews using machine learning algorithms. In *2019 10th International conference on computing, communication and networking technologies (ICCCNT)*, pp.1-6. https://doi.org/10.1109/ICCCNT45670.2019.89444.36.

29. Chrismanto, A.R., Sari, A.K. and Suyanto, Y., 2023. Enhancing spam comment detection on social media with emoji feature and post-comment pairs approach using ensemble methods of machine learning. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3299853.

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 63-77

Sharif University of Technology

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



Research Article

Designing a Model for Sustainable Power Transmission Capacity Using Systems Dynamics Approach

Mohammad Taghi Farahnak[1], Mohammad Ali Afshar Kazemi[1], Ali Mohaghar[*2] and Mohammad Ali Keramati[1]

[1]Department of Industrial Management, Faculty of Management, Central Tehran branch-Islamic Azad university, Tehran, Iran.
[2] Faculty of management, University of Tehran, Iran.
* corresponding author: (amohaghar@ut.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:23 October 2024

Revised:18 January 2025

Accepted:22 February 2025

Keywords:

System dynamics,
power transmission capacity,
Substations,
transmission and super-distribution lines,
investment in transmission capacity development.

Abstract

In this research, a system dynamics approach has been employed to model and simulate the structural dynamics of capacity development for power transmission, specifically focusing on substations operating at 400, 230, 232, and 66-63 kilovolts. The model takes into account the exogenous factors of electricity demand and supply. This study reviews previous domestic and international research, providing a suitable framework for analyzing investment policies in the transmission industry. The diagram of subsystems incorporates variables such as inflation, electricity demand, and electricity supply in an exogenous manner. In the causal loop diagram, key variables including existing transmission capacity, equipment depreciation, equipment age, maintenance costs, transmission network losses, and transformer failure probability are considered, with both direct and indirect relationships among them modeled accordingly. After establishing the stock and flow diagram model, mathematical relationships between the model variables were incorporated. Various conventional validation methods for system dynamics models were utilized to ascertain the model's credibility, including boundary tests, structural evaluation tests, and behavioral reproduction tests. The results from the behavioral reproduction test indicated that the model accurately simulated the past 40 years of transmission capacity with over 90% accuracy. Upon validating the model, three scenarios were simulated within this domain. The outcomes reveal that in the second scenario, where electricity demand is optimistically projected to increase due to savings or other changes over a 20-year horizon, the annual construction of transmission capacity calculated by the model results in the smallest gap between required and actual capacity. Conversely, in the third scenario, where both electricity demand increases and annual capacity construction continues based on a previous five-year average, the largest discrepancy between required and actual transmission capacity is expected by the year 2041. The numerical results from these three scenarios concerning the construction of transmission capacity by substation type are presented in this paper.

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:
Farahnak, M.T, Afshar Kazemi, M.A., Mohaghar, A. and Keramati, M.A. 2026. Designing a model for sustainable power transmission capacity using systems dynamics approach, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.63-77. https://doi.org/10.24200/j65.2025.65260.2415

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

طراحی مدلی جهت تأمین ظرفیت پایدار شبکه‌ی انتقال برق با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها

محمدتقی فرحناک[۱]، محمدعلی افشار کاظمی[۱]، علی محقر[۲*] و محمدعلی کرامتی[۱]

[۱]گروه مدیریت صنعتی، دانشکده‌ی مدیریت، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

[۲]گروه مدیریت، دانشکده‌ی مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (amohaghar@ut.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۲/۰۴

واژگان کلیدی:

پویایی‌شناسی سیستم‌ها،

ظرفیت انتقال برق،

خطوط انتقال و فوق توزیع،

سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت انتقال.

چکیده

در پژوهش حاضر، با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها، ساختار سیستمی توسعه‌ی ظرفیت انتقال به تفکیک پست‌های ۴۰۰، ۲۳۰، ۱۳۲، و ۶۶-۶۳ کیلوولت با درنظرگرفتن تقاضا و عرضه‌ی برق به‌صورت برون‌زا مدل‌سازی و شبیه‌سازی شده است. پس از ایجاد مدل جریان و انباشت، روابط ریاضی بین متغیرهای مدل وارد شده است. سپس جهت تعیین اعتبار با انواع روش‌های اعتبارسنجی مرسوم، مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها، مانند: آزمون حدی، آزمون ارزیابی ساختاری، و آزمون بازسازی رفتار مرجع استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی ۳ سناریو در حوزه‌ی توسعه‌ی ظرفیت انتقال نشان می‌دهند که با توجه به روند صعودی تقاضا، در صورتی که روند احداث ظرفیت انتقال همانند دوره‌های گذشته باشد، اختلاف قابل‌توجهی مابین مقدار ظرفیت انتقال موردنیاز و ظرفیت انتقال در دسترس به‌وجود خواهد آمد. لذا، جهت جبران اختلاف با کمک مدل پژوهش حاضر، نتایج عددیِ احداث ظرفیت انتقال به‌صورت سالانه تا افق ۲۰ ساله، شبیه‌سازی و ارائه شده است.

۱. مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین مشکلاتی که امروزه صنعت برق با آن دست به گریبان است، مربوط به نوسازی و بهبود شبکه‌های انتقال انرژی و همچنین فرسودگی تجهیزات موجود است.[۱] علاوه‌براین، نبود اطمینان در مورد زمان، مکان، و مقدار سرمایه‌گذاری‌های موردنیاز، به چالشی دیگر در این حوزه به‌شمار می‌آید.[۲ و ۳] طبق گزارش‌های وزارت نیرو، شبکه‌ی انتقال برق در ایران، همواره از کمبود سرمایه‌گذاری‌های به‌موقع رنج می‌برد و همین امر ضرورت توسعه‌ی سریع‌تر زیرساخت‌های مذکور را نشان می‌دهد.[۴]

ایجاد برنامه‌های بلندمدت برای تکامل شبکه‌ی انتقال می‌تواند به بهبود سیستم‌ها و تجهیزات مرتبط کمک کند و نیازهای مصرف‌کنندگان انرژی را به‌خوبی برآورده سازد.[۵] مطالعات انجام‌شده در این زمینه، روش‌های مختلفی برای تشویق سرمایه‌گذاری در بخش انتقال ارائه کرده‌اند.[۶] همچنین تأثیر سیاست‌های تعرفه‌ای در جریان نقدی شبکه‌ی برق بررسی شده و مدلی برای بهینه‌سازی تصمیم‌های سرمایه‌گذاری توسعه یافته است.[۷] زامبرانو[1] و همکاران (۲۰۱۹)،[۸] نیز با استفاده از روش‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها توانسته‌اند رابطه‌ی بین میزان سرمایه‌گذاری و ظرفیت انتقال برق را شبیه‌سازی کنند و به این نتیجه رسیده‌اند که برنامه‌ریزی ظرفیت انتقال می‌تواند به دو شیوه‌ی متمرکز یا غیرمتمرکز صورت گیرد، که هر کدام چالش‌ها و مزایای منحصر به‌فرد خود را دارند. در این راستا، ایشان همچنین به بررسی شرایط صنعت برق کلمبیا پرداخته‌اند.

علاوه‌براین، برخی مطالعات پیشین نشان داده‌اند که بیشتر تحلیل‌ها بر بخش تولید متمرکز بوده‌اند،[۹] و نظر به وجود تعدد متغیرهای دخیل، روابط بازخوری بین متغیرها و همچنین ساختار سنی بین ظرفیت‌های انتقال استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها در حوزه‌ی اخیر اجتناب‌ناپذیر است.[۱۰-۱۴] نتایج نشان داده‌اند که علاوه‌بر سرمایه‌گذاری در تجهیزات تولید، توجه به پژوهش و توسعه (R&D) و افزایش بهره‌وری نیز ضروری است. همچنین، مدیریت تقاضا و کاهش آن از طریق بهبود کارایی تجهیزات مصرف‌کننده‌ی نهایی، نقش مهمی در پایداری تقاضا و تولید ایفا می‌کند.[۱۵]

در ایران، نیز محقر و نجفزاده (۲۰۱۷)، مدلی برای توسعه‌ی بخش عرضه در صنعت برق با توجه به ابعاد فنی، اقتصادی، و زیست‌محیطی ارائه کرده‌اند، که

[1] Zambrano

استناد به این مقاله:

فرحناک، محمدتقی، افشار کاظمی، محمدعلی، محقر، علی و کرامتی، محمدعلی، ۱۴۰۴. طراحی مدلی جهت تامین ظرفیت پایدار شبکه انتقال برق با استفاده از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص. ۶۳-۷۷. https://doi.org/10.24200/j65.2025.65260.2415

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

می‌تواند به برنامه‌ریزی بلندمدت تأمین انرژی الکتریکی کمک کند.[۱۶] مقایسه‌ی روند توسعه‌ی موجود با روند مبتنی بر مدل اخیر نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها می‌تواند به صرفه‌جویی اقتصادی در توسعه‌ی برق منجر شود.

همچنین احمدوند و کلانتری (۲۰۱۹)،[۱۷] مدلی برای سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت توزیع برق ارائه کرده‌اند، که شامل یک روش ترکیبی از ویژگی‌های توسعه‌ی متمرکز و غیرمتمرکز بوده و باعث بهبود زمان‌بندی سرمایه‌گذاری نسبت به شیوه‌ی غیرمتمرکز شده و هزینه‌های مصرف را کاهش داده است.

علاوه‌براین، تلفات انرژی نیز یکی از عواملی است که نیاز به سرمایه‌گذاری بیشتر در صنعت برق را افزایش می‌دهد. با استفاده از داده‌های سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۳ در ایران، تلفات انرژی با دو روش پویایی‌شناسی سیستم‌ها و رگرسیون پیش‌بینی شده و نتایج نشان داده‌اند که روش‌های اقتصادسنجی دقت بیشتری نسبت به مدل‌های پویایی‌شناسی سیستم‌ها دارند و مدل‌های مذکور بیشتر برای نمایش روابط علت و معلولی متغیرها مناسب هستند.[۱۸] احمد و همکاران (۲۰۱۶)،[۱۹] نیز به بررسی و دسته‌بندی مطالعات مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها در حوزه‌ی مدیریت و برنامه‌ریزی برق بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ پرداخته و دریافته‌اند که ارزیابی سیاست‌ها و توسعه‌ی ظرفیت تولید، دو موضوع برجسته‌ی موردتوجه هستند. وانگ و همکاران (۲۰۱۹)،[۲۰] در چین به اصلاح تعرفه‌های انتقال و توزیع (T&D) و تأثیر آن در ظرفیت مالی شرکت‌های برق پرداخته و با استفاده از مدل‌سازی پویایی‌شناسی سیستم‌ها، تغییرات درآمد و هزینه‌های شرکت‌های برق را پس از اصلاحات بررسی کرده و دریافته‌اند که درآمد T&D به‌تدریج افزایش پیدا کرده و استهلاک دارایی‌ها، نقش مهمی در ظرفیت مالی داشته است.

درنهایت، مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که میزان سرمایه‌گذاری و احداث ظرفیت انتقال نیازمند برنامه‌ریزی بلندمدت است. با توجه به تأثیر متغیرهای متعدد در حوزه‌ی اخیر و دینامیک روابط بین آن‌ها، برنامه‌ریزی در این زمینه پیچیده و نیازمند ابزاری است که بتواند تمامی متغیرهای اصلی را شبیه‌سازی کند و سناریوهای مناسبی برای آینده ارائه دهد.

تفکر غیرخطی و نگاه پویا به پدیده‌ها و پیامدها، از نکات مغفول در تصمیم‌گیری‌های مدیران در کسب‌وکارها و سازمان‌های تجاری و غیرتجاری است. نادیده‌گرفتن پویایی ذاتی پدیده‌ها می‌تواند منجر به اتخاذ تصمیم‌های ضعیف و بی‌کیفیت شود، که به جای حل مسائل، مشکلات جدیدی ایجاد می‌کنند و بر چالش‌های موجود می‌افزایند.[۲۱] پویایی‌شناسی سیستم‌ها، کارآمدبودن خود را در موضوعات مختلف اقتصادی و اجتماعی به خوبی نشان داده‌اند و امکانات مناسبی را در این خصوص در اختیار قرار می‌دهند.[۲۲] ویژگی‌های بارز پویایی‌شناسی سیستم‌ها در مقایسه با سایر روش‌ها، که منجر به به‌کارگیری آن در پژوهش حاضر شده است، به این شرح هستند:

- امکان درنظرگرفتن ارتباط‌های علّی و بازخوردی بین متغیرها (عموم روش‌های آماری مثل رگرسیون، این قابلیت را ندارند).
- امکان لحاظ‌کردن تأخیرهای زمانی بین متغیرهای مختلف، مانند تأخیر بین سرمایه‌گذاری و توسعه‌ی ظرفیت.
- امکان شبیه‌سازی کامپیوتری و مشاهده‌ی رفتار متغیرهای اصلی در بستر زمان.
- امکان استفاده از قابلیت زنجیره‌ی سنی در شبیه‌سازی، چرا که احتمال برکناری ظرفیت با سن تجهیزات، رابطه‌ی مستقیمی دارد و در گذر زمان، سن تجهیزات افزایش می‌یابد.
- امکان تعریف سناریو و مشاهده‌ی آثار آن در رفتار آینده‌ی متغیرهای تشکیل‌دهنده‌ی ساختار مدل.

افزون بر تعداد متغیرها و شاخص‌های اصلی دینامیک مدل، که درسیستم شبکه‌ی انتقال منجر به افزونگی و پیچیدگی می‌شوند؛ ظرفیت‌های انتقال با سن متفاوت و تلفات آن‌ها، تقاضا و عرضه‌ی برقِ متغیر در طول زمان و ارتباط بین ظرفیت موردانتظار و ظرفیت واقعی و سایر متغیرهایی که در مسئله دخالت دارند؛ منجر به پیچیدگی و بروز ابهام‌هایی در درک تأثیر و تأثر متغیرهای مذکور بر هم می‌شوند. کاربرد رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها در عین حفظ نگاه کلی، مرز سیستم را مشخص و ارتباط بین متغیرهای اخیر را مشخص می‌کند و سبب ایجاد یک مدل ذهنی مشترک بین تصمیم‌گیرندگان و تصمیم‌سازان می‌شود.

پژوهش حاضر، از این جهت با مطالعات پیشین متمایز است که از رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی توسعه‌ی ظرفیت انتقال در آینده استفاده کرده است. تاکنون هیچ پژوهشی در ایران به بررسی رفتار توسعه‌ی ظرفیت انتقال با استفاده از ابزار مذکور و دیگر روش‌ها نپرداخته است. لذا، با توجه به خلأ ذکرشده، در پژوهش حاضر به پیش‌بینی و شبیه‌سازی میزان احداث ظرفیت انتقال با تفکیک پست‌های ۴۰۰، ۲۳۰، ۱۳۲، و ۶۶-۶۳ در شرایط مختلف پرداخته شده است. در جدول ۱، خلاصه‌ی نتایج مطالعات پیشین در حوزه‌ی تولید، انتقال، و توزیع ارائه شده و و تفاوت‌های آن‌ها را با پژوهش حاضر روشن ساخته است.

پژوهش حاضر با ارائه‌ی یک مدل جدید سیستمی و دینامیک به یک سؤال کلیدی پاسخ داده است: با توجه به روند فزاینده‌ی تقاضا، توسعه‌ی ظرفیت انتقال در کشور به تفکیک پست‌های مختلف چه میزان باشد تا پایداری ظرفیت شبکه‌ی انتقال در صنعت برق حفظ شود و صنعت تحت تأثیر کمبود و ناترازی قرار نگیرد؟

ساختار نوشتار حاضر بدین صورت سازماندهی شده است که در ابتدا، توضیحات مختصری درخصوص رویکرد پویایی‌شناسی سیستم‌ها ارائه شده است. سپس با کمک نمودار زیرسیستم‌ها، متغیرهای اصلی تأثیرگذار در حوزه‌ی صنعت انتقال برق نشان داده شده‌اند. پس از آن فرضیه‌های دینامیکی در قالب نمودار علت و معلولی تبیین و براساس نمودار علت و معلولی کلی، نمودار جریان- انباشت ترسیم شده است. با تعریف روابط ریاضی بین متغیرها، مدل شبیه‌سازی شده و اعتبارسنجی آن صورت گرفته است. سپس تحت ۳ سناریو، بر روی میزان احداث ظرفیت انتقال در طی ۲۰ سال آینده، بحث و بررسی شده است.

۲. روش شناسی پژوهش

پویایی‌شناسی سیستم‌ها، یک رویکرد بین‌رشته‌ای و جامع است، که هدف آن درک و حل مسائل هدفمند است؛ که به تحلیل و بررسی تعاملات پیچیده در سیستم‌ها می‌پردازد، تا به شناخت بهتر چالش‌های موجود و ارائه‌ی راه‌حل‌های مؤثرکمک کند.[۲۶] گام‌های اجرای پویایی‌شناسی سیستم‌ها را می‌توان در ۵ گام خلاصه کرد:[۲۷]

- در گام اول، ابتدا چارچوب مسئله‌ی موردنظر پژوهش تعریف و پس از شناخت

جدول ۱. مقایسه‌ی مطالعات پیشین با پژوهش حاضر.

Row	Reference	Country	Sector Analyzed	Main Focus of the Study
1	[14]	Iran	Distribution	Electricity demand modeling
2	[17]	Iran	Distribution	Investment in electricity distribution capacity expansion
3	[18]	Iran	Transmission	Transmission loss analysis
4	[16]	Iran	Generation	Long-term electricity supply planning
5	[11]	USA	Generation	Application of computational models for power plant construction simulation
6	[15]	Canada	Distribution and Generation	Investment in research and development (R&D)
7	[21]	Malaysia	Distribution	Evaluation of tariff rate changes and their impacts on the power generation sector
8	[7]	China	Transmission	Impact of transmission and distribution tariff policies on the cash flow of the power industry
9	[10]	China	Distribution and Transmission	Capital investment allocation strategies in transmission and distribution sectors
10	[8]	Colombia	Transmission	Investment in transmission capacity, installed capacity, reserve margins, and electricity demand
11	[12]	Iran	Distribution and Generation	Effects of energy pricing policies on electricity supply–demand instability
12	[24]	Iran	Generation	System dynamics modeling of power generation expansion planning
13	[25]	China	Distribution	Electricity consumption forecasting using system dynamics methodology
14	[22]	Iran	Generation and Distribution	Comparative assessment of supply-side expansion and demand-side management
Current Study		Iran	Transmission	Determining the extent of development of the power grid transmission capacity for sustainable electricity supply under different demand scenarios, taking into account the impact of loss variables, inflation, age chain, and depreciation of transmission equipment, and providing a cause-and-effect and state-flow model to examine the trend of power transmission capacity by different substations

دقیق آن، با مطالعه‌ی منابع موجود و نظرهای صاحب‌نظران، مرز سیستم با کمک نمودار زیرسیستم‌ها مشخص می‌شود.

- در گام دوم، نمودار علی- معلولی سیستم ایجاد می‌شود. همچنین، حلقه‌ها و بازخوردها با علامت مثبت و منفی در شکل نشان داده می‌شوند و علامت کمان‌ها به لحاظ اثرگذاری مثبت یا منفی تعیین می‌شود. همچنین در گام حاضر، پس از شناسایی متغیرهای انباشت و جریان، نمودار جریان و انباشت[1] نیز ترسیم می‌شود.

- در گام سوم، با شناسایی ساختار و قوانین تصمیم‌گیری، پارامترها و روابط ریاضی تعیین می‌شوند.

- در گام چهارم، شبیه‌سازی با کمک نرم‌افزار Vensim PLE صورت می‌گیرد. برای اعتبارسنجی مدل از آزمون‌هایی مانند رفتار مرجع، آزمون ساختاری، آزمون رفتار ساختاری، آزمون رفتار حدی، و... استفاده شده و اعتبار مدل بررسی شده است نمونه‌ی موردی پژوهش حاضر، سیستم انتقال برق کشور ایران و بازه‌ی زمانی اعتبارسنجی در آزمون بازسازی رفتار مرجع از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۱ بوده است.

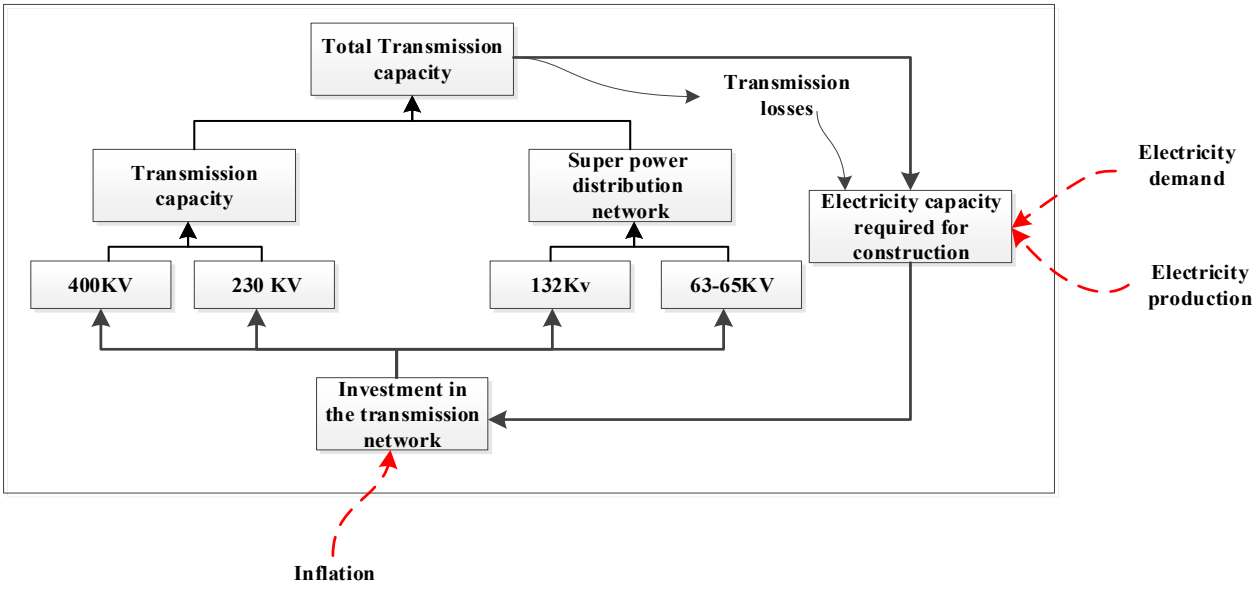
- درگام پنجم، به‌منظور آزمایش راهبردها، از مدل برای کمّی‌سازی تأثیر راهبردهای پیشنهادی استفاده می‌شود. که در پژوهش حاضر، افق شبیه‌سازی، ۲۰ ساله در نظر گرفته شده است.

۲. مدل سازی

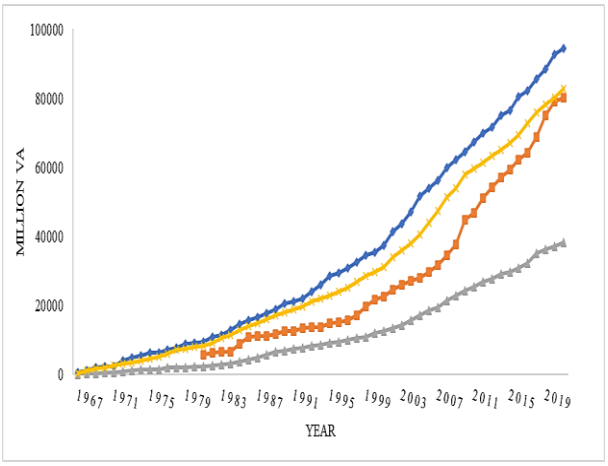
۲. ۱. نمودار زیرسیستم‌ها یا معماری کلی سیستم

نمودار زیرسیستم‌های تبیین‌شده در شکل ۱، که به گونه‌ای تصویری بزرگ از سیستم موردبررسی است، ارائه شده است. به‌طورکلی، مدل ارائه‌شده در پژوهش

[1] Stock and flow diagram



شکل ۱. نمودار زیرسیستم‌ها یا معماری کلی سیستم انتقال در پژوهش.



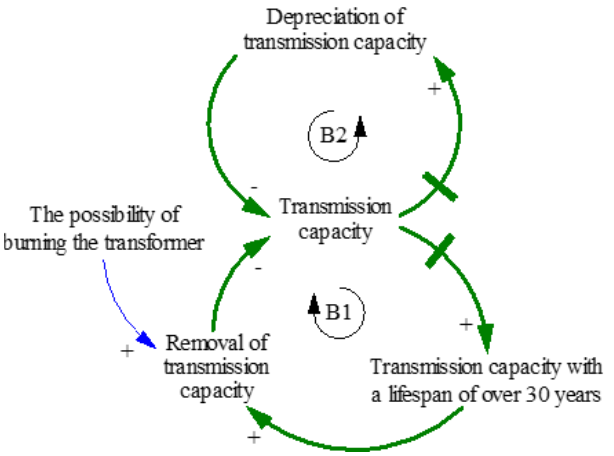
شکل ۲. روند ظرفیت انتقال برق در کشور.[۴]

حاضر، شامل: ۱) ظرفیت پست‌ها و خطوط انتقال برق، ۲) سرمایه‌گذاری در ظرفیت انتقال برق، ۳) تقاضا و عرضه‌ی برق در شبکه است. در مدل پژوهش، متغیرهایی مانند: تقاضای برق، تولید برق، و تورم به صورت برون‌زا به مدل وارد شده‌اند.

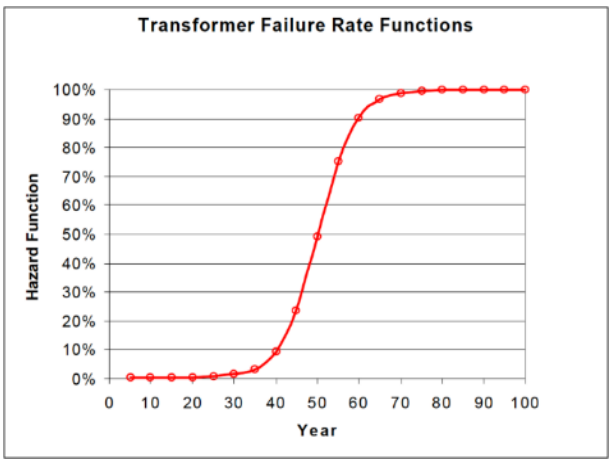
۲.۲. نمودار علت و معلولی

از جمله بازخوردهای در نظر گرفته‌شده در مدل پژوهش حاضر، مشتمل بر سه حلقه‌ی تعدیل‌کننده و دو حلقه‌ی فزاینده است. دو حلقه‌ی متعادلی مدل مربوط به عمر تجهیزات شبکه‌ی انتقال هستند. نمودار روند افزایش ظرفیت انتقال برق در شبکه‌ی کشور ایران در شکل ۲ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، اولین ظرفیت‌های انتقال توسعه داده‌شده مربوط به سال ۱۹۶۷ و ماقبل آن است و هم‌اکنون، تجهیزات مذکور بالای ۵۰ سال، سن دارند.

حلقه‌ی تعادلی B۱ در شکل ۳ مشاهده می‌شود؛ که به‌دلیل افزایش عمر ترانسفورماتورها احتمال سوختن به‌صورت ناگهانی و براساس تابع توزیع هازارد[۲] [۲۸] وجود دارد. همچنین در حلقه‌ی B۲ به‌دلیل افزایش عمر و تلفات آن، تجهیزات انتقال برق مستهلک می‌شوند.[۷]



شکل ۳. حلقه‌ی تعادلی دوم و سوم تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.

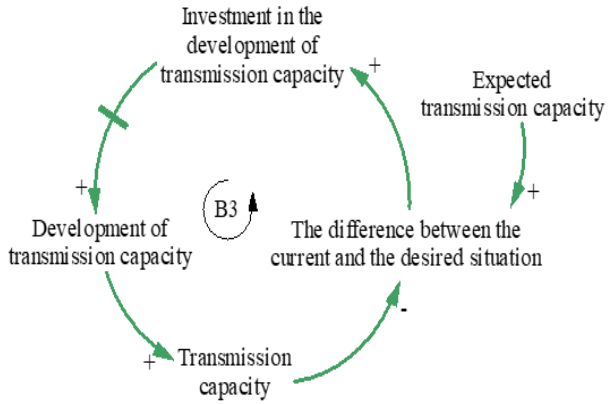


شکل ۴. نمودار تابع توزیع هازارد.[۲۳]

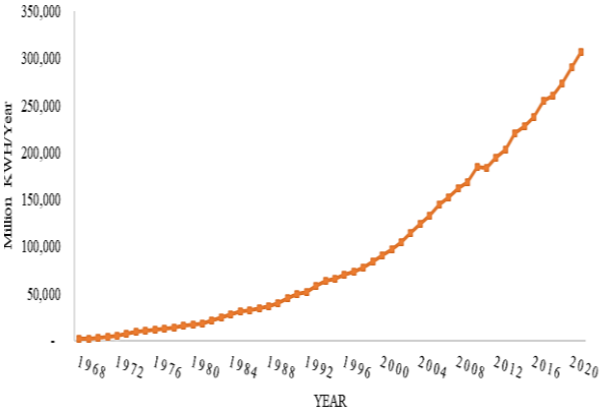
نمودار تابع توزیع هازارد در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با افزایش عمر ترانسفورماتورها، احتمال سوختن آن‌ها با رفتاری S شکل افزایش می‌یابد.

در حلقه‌ی تعادلی B۳ (مطابق شکل ۵)، با کاهش ظرفیت انتقال، اختلاف بین ظرفیت موردانتظار و ظرفیت موجود، افزایش و سرمایه‌گذاری نیز افزایش پیدا

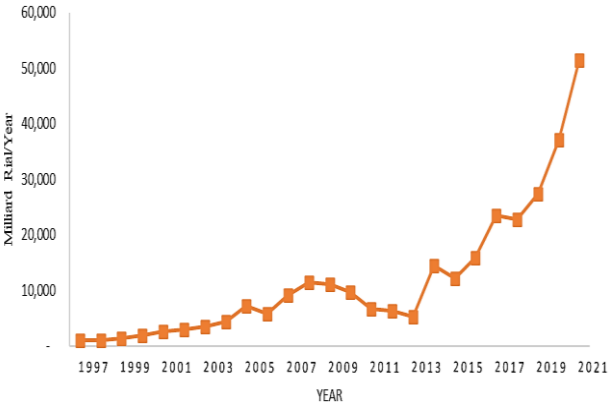
[2] Hazard function



شکل ۵. حلقه‌ی تعادلی سوم تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.



شکل ۶. نمودار روند صعودی میزان جمع تقاضای برق در کلیه‌ی بخش‌ها.[۴]

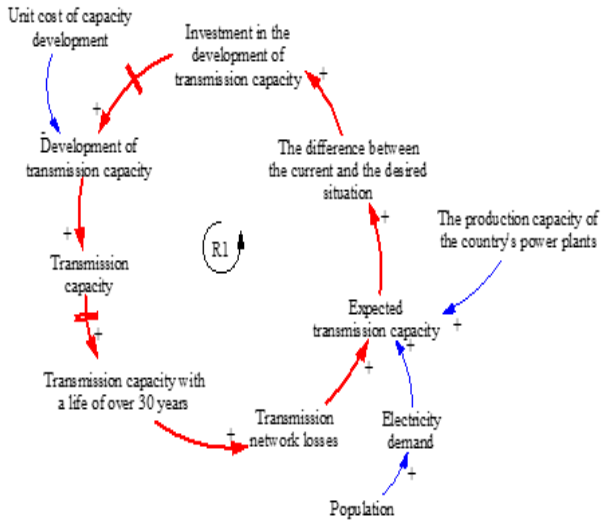


شکل ۷. روند صعودی مقدار واقعی سرمایه‌گذاری در شبکه‌ی انتقال به قیمت ثابت سال ۱۹۹۷.[۴]

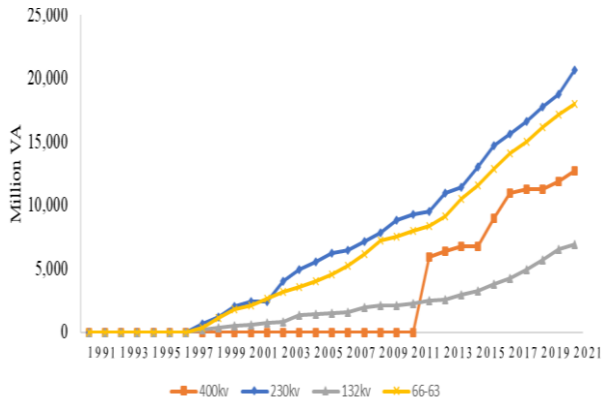
می‌کند.[۸] با افزایش‌یافتن سرمایه‌گذاری با تأخیر توسعه‌ی ظرفیت و به تبع ظرفیت انتقال نیز بیشتر می‌شود. بنابراین، کاهش‌یافتن ظرفیت انتقال درنهایت و با گذر زمان طی حلقه‌ی مذکور جبران خواهد شد.

این تذکر لازم است که ظرفیت انتقال موردانتظار براساس دو بخش عمده‌ی تقاضای برق و ظرفیت تولید برق شکل می‌گیرد. نمودار رفتار مقدار تقاضای برق کل شبکه (مشتمل بر تقاضای بخش عمومی، خانگی، صنعتی، کشاورزی، و روشنایی معابر) در شکل ۶ مشاهده می‌شود.

در شکل ۷، نمودار مقدار واقعی سرمایه‌گذاری (بر مبنای سال پایه‌ی ۱۹۹۷) در شبکه‌ی انتقال مشاهده می‌شود. یکی از دلایل عمده‌ی روند صعودی



شکل ۸. حلقه‌ی فزاینده‌ی اول تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.



شکل ۹. مقدار توان شبکه‌ی انتقال با عمر بالای ۳۰ سال به تفکیک نوع ترانسفورماتور.[۴]

سرمایه‌گذاری واقعی، افزایش تقاضا و تولید برق است، که منجر به افزایش ظرفیت انتقال موردانتظار می‌شود. اختلاف مقدار موردانتظار و مقدار واقعی منجر به افزایش سرمایه‌گذاری می‌شود. در نمودار مذکور، تأثیر تورم حذف شده است و تمامی قیمت‌ها به قیمت ثابت سال ۱۹۹۷ هستند.

کارآیی شبکه‌ی انتقال به معنای نسبت توان خروجی شبکه به توان ورودی آن تعریف می‌شود. تلفات شبکه‌ی انتقال نیز از اختلاف کارآیی با عدد ۱ محاسبه می‌شود.[۲۹] در شکل ۸، حلقه‌ی فزاینده‌ی تأثیر تلفات شبکه‌ی انتقال در توسعه‌ی ظرفیت انتقال، که یک حلقه‌ی تأثیرگذار در بلندمدت است، مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، هر چه سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت انتقال افزایش یابد، توسعه‌ی ظرفیت بیشتر می‌شود و ظرفیت نیز فزونی می‌یابد. اما در بلندمدت، عمر ظرفیت شبکه‌ی انتقال بیشتر می‌شود و تلفات شبکه نیز افزایش می‌یابد.[۱] بنابراین، نیاز به ظرفیت بیشتری به‌منظور جبران تلفات است، که درنهایت منجر به افزایش سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت انتقال می‌شود.

در شکل ۹، مقدار توان شبکه‌ی انتقال، که عمر بالای ۳۰ سال دارند، مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، از سال ۱۹۹۷ به بعد، عمر شبکه‌ی انتقال برق به ۳۰ سال رسیده است. لذا، تلفات ناشی از تجهیزات مذکور نیز افزایش خواهد یافت.

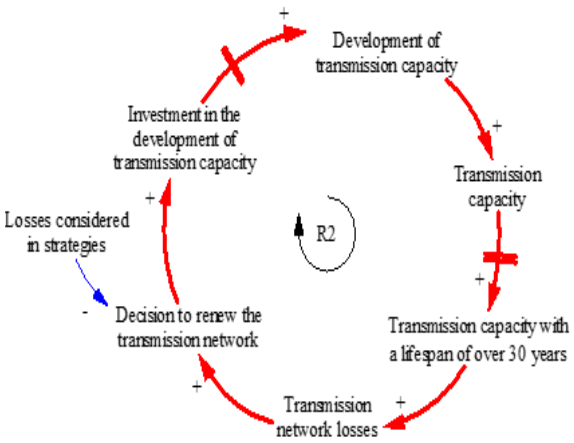
در شکل ۱۰، نیز حلقه‌ی فزاینده‌ی دوم، یعنی تأثیر تلفات شبکه و تلفات موردانتظار در راهبردها در توسعه‌ی ظرفیت انتقال مشاهده می‌شود. هر چه

ظرفیت توسعه داده‌شده بیشتر شود، در بلندمدت، عمر تجهیزات ذکرشده بالا می‌رود و تلفات آن‌ها افزایش می‌یابد.[۱ و ۳۰] اختلاف مقدار تلفات واقعی و تلفات مدنظر، راهبردهای تصمیم به نوسازی و سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت جدید را افزایش می‌دهد و منجر به افزایش ظرفیت انتقال می‌شود.

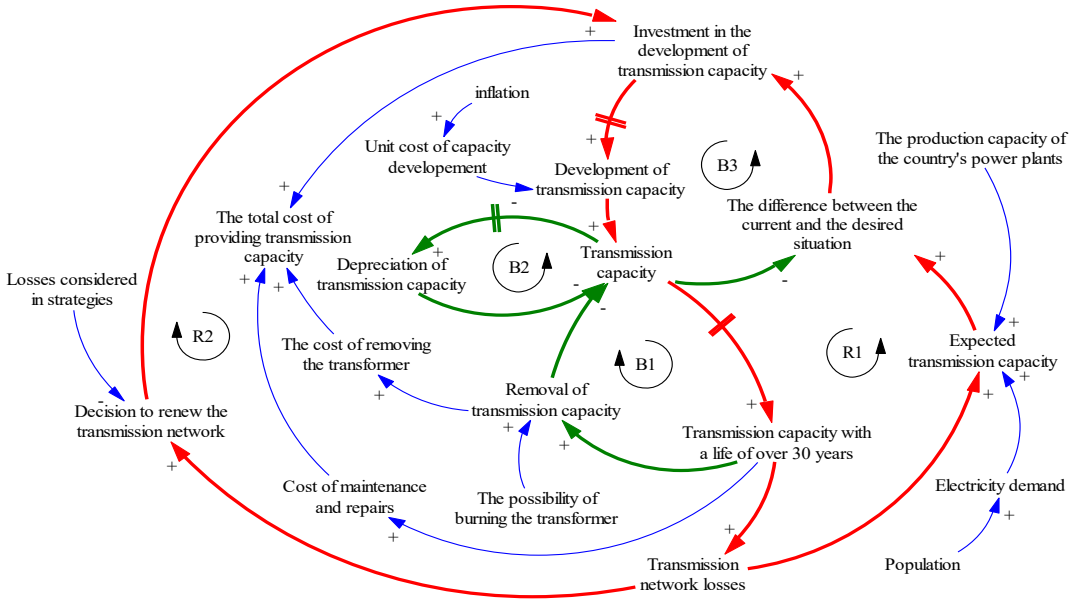
از پیوند تمامی حلقه‌ی تبیین‌شده در شکل اخیر، نمودار علت و معلولی کلی ارائه‌شده در شکل ۱۱ ایجاد می‌شود، که مدل علت و معلولی کلی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

۳.۲ . نمودار حالت- جریان

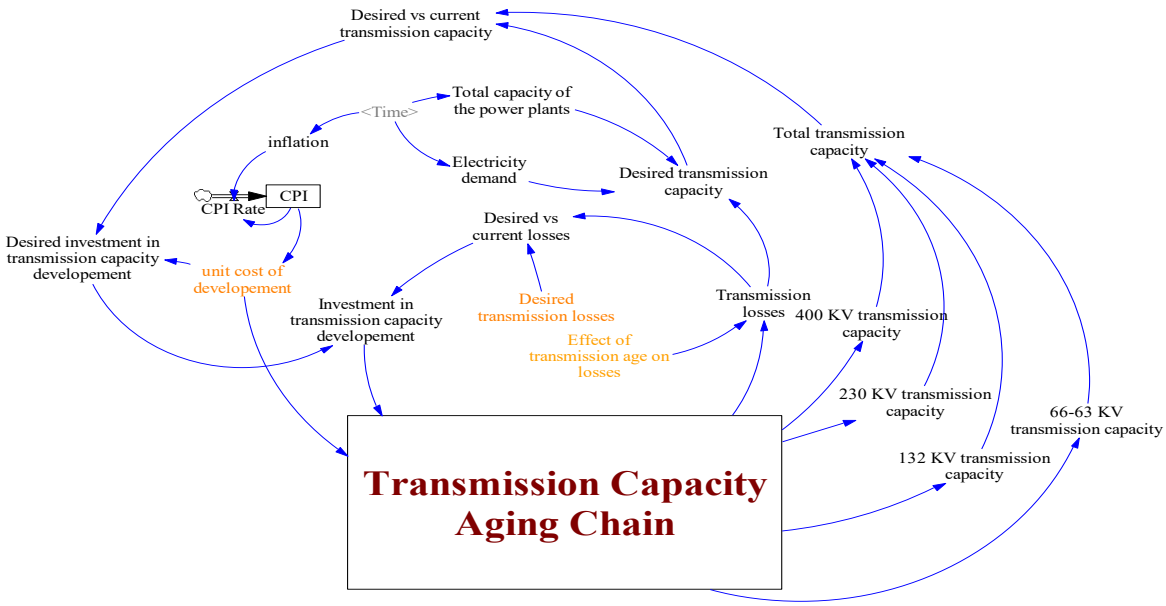
با درنظرگرفتن متغیرهای ظرفیت ترانسفورماتورها، به تفکیک چهار نوع شبکه، طول مدارهای انتقال به تفکیک چهار نوع، و شاخص قیمتی مصرف‌کننده (CPI) به‌عنوان متغیر انباشت، نمودارهای جریان- انباشت در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شوند.



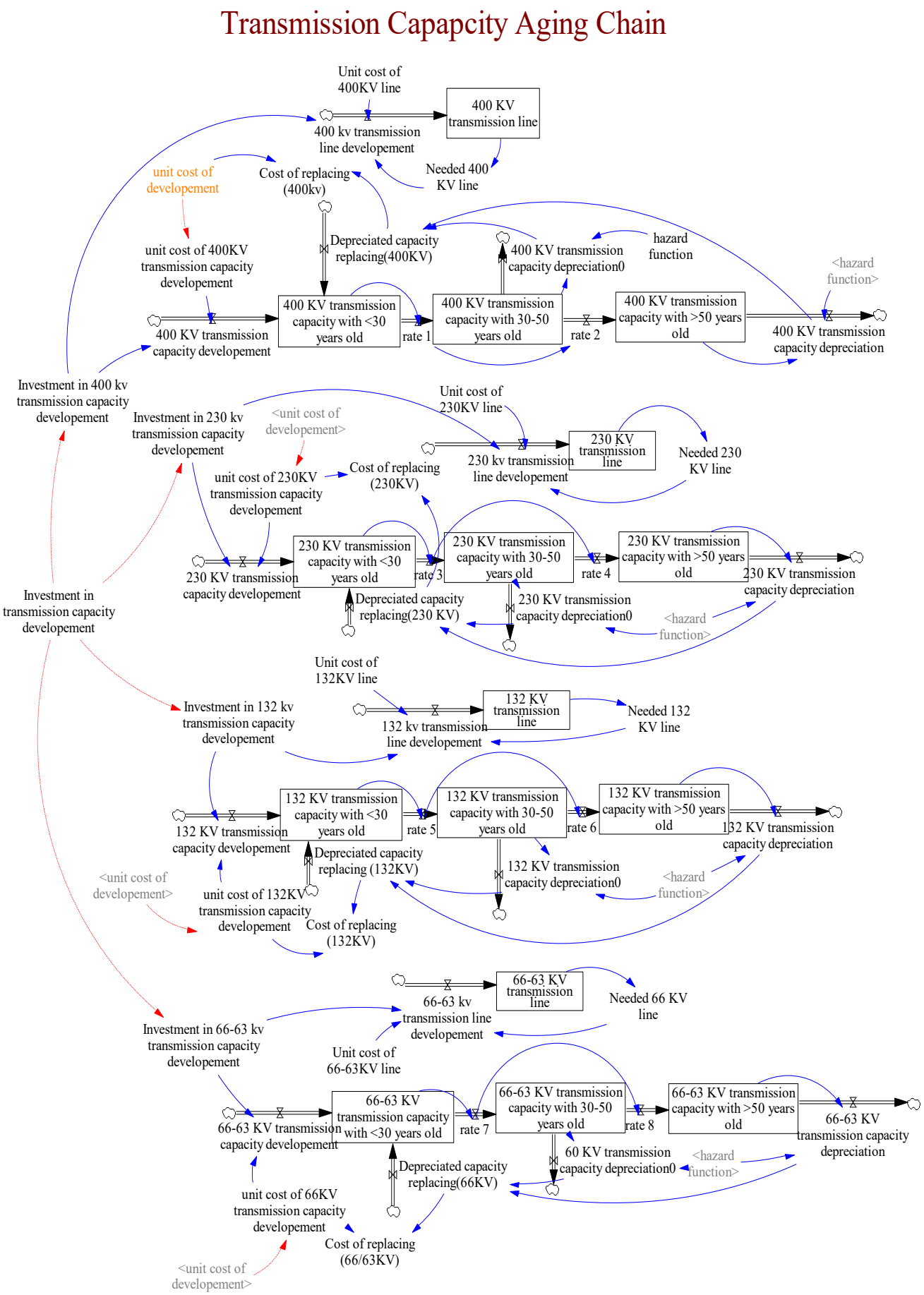
شکل۱۰. حلقه‌ی فزاینده‌ی دوم تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.



شکل ۱۱. نمودار علت و معلولی کلی پژوهش.



شکل ۱۲. نمودار حالت- جریان حاوی متغیرهای تأثیرگذار در ظرفیت انتقال.



شکل ۱۳. نمودار حالت- جریان قسمت زنجیره‌ی سنی ظرفیت انتقال.

پس از ترسیم نمودار جریان- انباشت، لازم است تا روابط ریاضی بین متغیرها تعریف شوند. لذا در ادامه، به ارائه‌ی مهم‌ترین روابط ریاضی در نظر گرفته‌شده پرداخته شده است.

رابطه‌ی ریاضی مقدار توسعه‌ی ظرفیت پست‌ها بر مبنای تأخیر اطلاعاتی مرتبه‌ی اول در نظر گرفته شده است. معادله‌ی ۱، ارتباط بین مقدار سرمایه‌گذاری و مقدار ظرفیت توسعه داده‌شده را نشان می‌دهد؛ که در آن، D_K نشانگر میزان توسعه‌ی ظرفیت هر کدام از ظرفیت‌ها، I_K مقدار سرمایه‌گذاری صورت‌گرفته در هر کدام از ظرفیت‌ها، و U_K نشان‌دهنده‌ی هزینه‌ی واحد توسعه‌ی هر کدام از ظرفیت‌هاست. در معادله‌ی ۱، تابع Delay1i بیانگر تأخیر مرتبه‌ی اول اطلاعاتی است.

$$D_K = Delay1i(\frac{I_K}{U_K},1,0) \qquad (1)$$

K∈ 400KV,230KV,132KV and 63-66KV transmission capacity

شایان ذکر است مقدار سرمایه‌گذاری در حوزه‌ی افزایش ظرفیت انتقال نیز براساس مقدار ظرفیت انتقال موردانتظار (DTC) و مقدار تلفات موردانتظار (DTL) به صورت معادله‌ی ۲ محاسبه می‌شود؛ که در آن، TC نشانگر مقدار ظرفیت انتقال وضع موجود و TL بیانگر مقدار تلفات وضع فعلی هستند.

$$I_K = U_K \times \max(0, DTC - TC) \times (1 + DTL - TL)^2) \qquad (2)$$

پارامتر تعیین‌کننده‌ی میزان تلفات انتقال، متوسط سن کل ظرفیت انتقال است، که به‌صورت معادله‌ی ۳ محاسبه می‌شود؛ که در آن، TC_i به معنای مقدار ظرفیت انتقال با عمر i سال و A، نشانگر متوسط عمر شبکه‌ی انتقال هستند.

$$A = \frac{\sum_i i \times TC_i}{\sum_i i} = \frac{1 \times TC_1 + 2 \times TC_2 + \ldots + TC_{100}}{1 + 2 + \ldots + 100} \qquad (3)$$

برای محاسبه‌ی میزان تلفات شبکه‌ی انتقال نیز از تابع جدولی LookUp مطابق رابطه‌ی ۴ استفاده شده است؛ که براساس آن، میزان تلفات شبکه، تابعی از متوسط سن شبکه‌ی انتقال (A) است و به ازاء هر مقدار از A، مقدار تلفات شبکه را با استفاده از درون‌یابی محاسبه می‌کند.

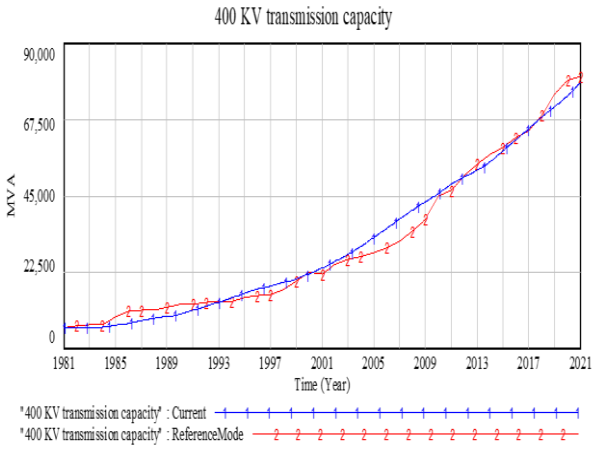
$$TL = F(A) \qquad (4)$$

جهت نمایش بهتر، قسمت زنجیره‌ی سنی ظرفیت‌های انتقال که به تفکیک ۴ ظرفیت مذکور طراحی شده است، در نمودار جریان- انباشت جداگانه ارائه شده است. در شکل ۱۲، متغیرهایی که در ظرفیت انتقال تأثیرگذارند، مشاهده می‌شوند؛ که در نمودار اخیر، میزان سرمایه‌گذاری در توسعه‌ی ظرفیت و هزینه‌ی واحد توسعه‌ی ظرفیت به قسمت زنجیره‌ی سنی ظرفیت وارد و میزان ظرفیت انتقال به تفکیک ۴ ظرفیت از قسمت مذکور خارج شده است. مدل مربوط به قسمت ظرفیت‌های انتقال نیز در شکل ۱۳ مشاهده می‌شوند.

۳. بحث و بررسی

۳. ۱. اعتبارسنجی مدل

در بخش حاضر، پس از شبیه‌سازی مدل، به اعتبارسنجی آن پرداخته شده است. استرمن[3] در کتاب پویایی‌شناسی کسب و کار آزمون‌های حدی، ارزیابی



شکل ۱۴. مقایسه‌ی داده‌های واقعی و مقدار شبیه‌سازی متغیر ظرفیت انتقال پست‌های ۴۰۰KV (خطا (MAE)[1]: ۶/۹٪).

ساختاری، بازسازی رفتار مرجع، و ... را برای کسب اطمینان از اعتبار مدل در دستیابی به اهداف موردنظر معرفی کرده است.[۲۷] در پژوهش حاضر، نیز اعتبار مدل با استفاده از انواع روش‌ها، مانند: ارزیابی ساختاری، آزمون حدی، و بازسازی رفتار مرجع تأیید شده است، که در بخش کنونی، فقط به ارائه‌ی نتایج آزمون بازسازی رفتار مرجع بسنده شده است.

در آزمون بازسازی رفتار مرجع، نتایج شبیه‌سازی مدل با داده‌های تاریخی موجود برای متغیرهای اصلی مقایسه شده‌اند. مدل پژوهش حاضر توانسته است رفتار متغیرهای ظرفیت انتقال را با دقت خوبی شبیه‌سازی کند. به عنوان نمونه، در شکل ۱۴، نتایج حاصل از شبیه‌سازی و داده‌های تاریخی متغیر ظرفیت انتقال ۴۰۰ KV ملاحظه می‌شود؛ که مطابق آن، مدل توانسته است رفتار متغیر ظرفیت انتقال را با دقتی بالای ۹۰٪ بازسازی کند. مقدار خطای بازسازی رفتار برای متغیرهای ظرفیت‌های انتقال ۲۳۰، ۱۳۲، و ۶۳-۶۶ کیلوولت نیز ۹/۹، ۶/۹، و ۸/۴ درصد بوده است.

۳. ۲. تحلیل آینده‌ی صنعت انتقال برق با تحلیل سناریو

در بخش حاضر، ۳ سناریو مطابق جدول ۲ تعریف شده‌اند؛ و در ادامه، نتایج عددی آن‌ها مقایسه و ارائه شده است.

- **سناریوی اول: ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق تا سال ۲۰۴۱**

روند تقاضای برق کشور از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۱ در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود.[۴] در صورتی که قرار باشد ارتباط بین تقاضای برق و سال با یک رابطه‌ی رگرسیونی برازش شود، معادله‌ی ۵، بهترین ارتباط را نشان می‌دهد.

$$y = 152x^2 - 413,285x + 280,447,791 \qquad (5)$$

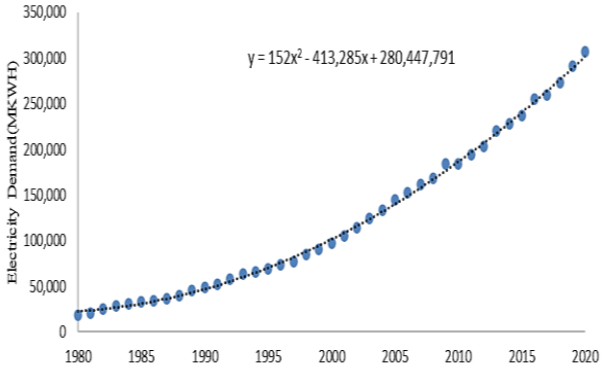
اگر با استفاده از معادله‌ی ۵ به پیش‌بینی تقاضای برق برای ۲۰ سال آینده پرداخته شود، روند تقاضا به صورت نمودار قرمزرنگ در شکل ۱۶ خواهد بود.

با اعمال سناریوی ادامه‌ی روند جاری، نتایج شبیه‌سازی برای متغیرهای احداث ظرفیت به صورت نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ است و جهت جبران کمبود ظرفیت باید بر طبق نتایج شبیه‌سازی ذکرشده نسبت به احداث ظرفیت در ظرفیت‌های چهارگانه اقدام شود. بنابراین می توان گفت در صورتی که میزان تقاضا مطابق با روند شکل ۱۶ افزایش یابد، جهت جلوگیری از کمبود

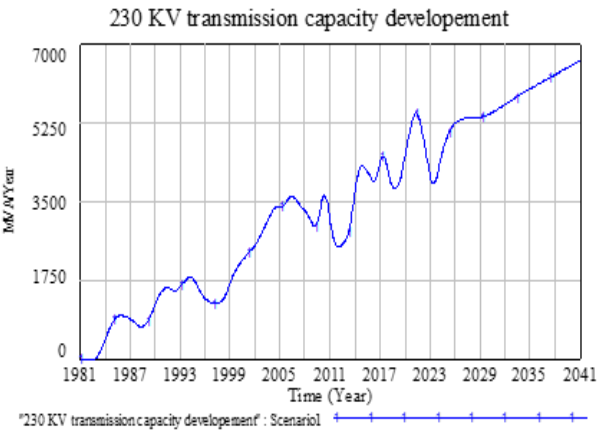
[3] Sterman

جدول ۲. سناریوهای تعریف‌شده بر روی تقاضا و توسعه‌ی ظرفیت انتقال برق.

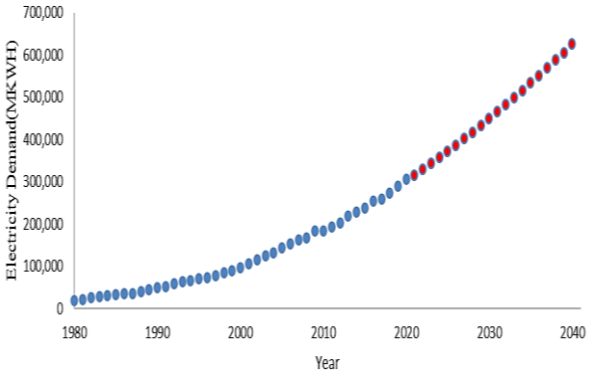
Scenario	Electricity Demand Assumption	Transmission Capacity Expansion
Scenario 1	Electricity demand follows the historical trend	Transmission capacity expansion is endogenously simulated by the model based on the extent of capacity shortfalls
Scenario 2	Electricity demand follows an optimistic trajectory in accordance with the forecasts of Salimian et al. (2021) [31]	Transmission capacity expansion is endogenously simulated by the model based on the extent of capacity shortfalls
Scenario 3	Electricity demand follows the historical trend	Transmission capacity is expanded according to the average development rate observed over the past five years



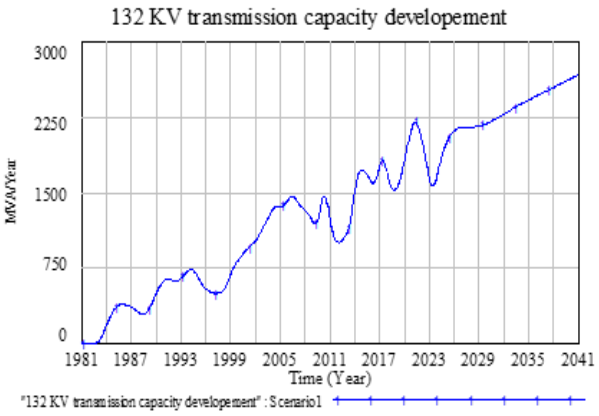
شکل ۱۵.رابطه‌ی ریاضی درجه‌ی دوم براساس داده‌های تقاضای برق کشور در ۴۰ سال گذشته.



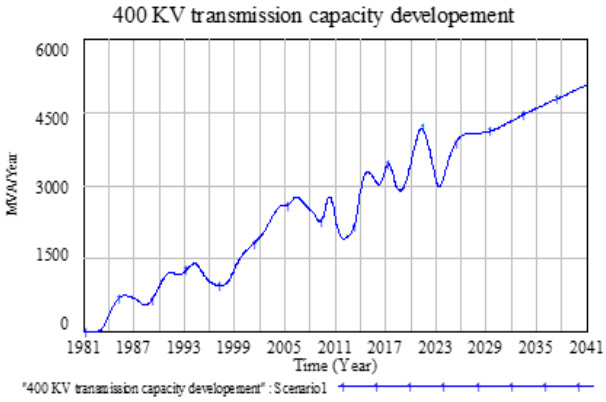
شکل ۱۸. ظرفیت انتقال ۲۳۰KV در سناریوی اول.



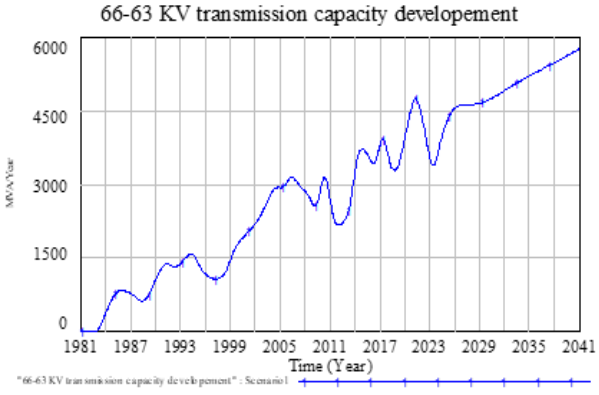
شکل ۱۶.پیش‌بینی مصرف برق کشور با توجه به روند گذشته با استفاده از تابع غیرخطی درجه‌ی دوم.



شکل ۱۹. ظرفیت انتقال ۱۳۲KV در سناریوی اول.



شکل ۱۷.ظرفیت انتقال ۴۰۰KV در سناریوی اول.



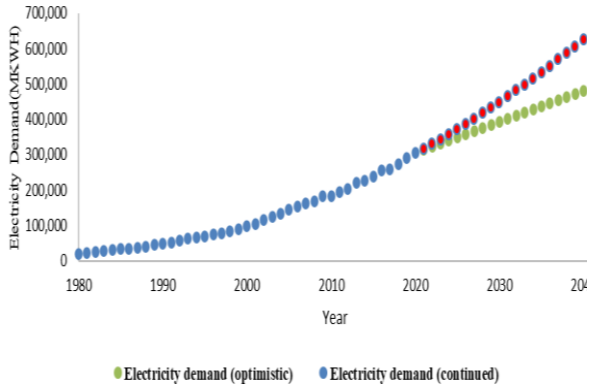
شکل ۲۰. ظرفیت انتقال 66-63KV در سناریوی اول.

ظرفیت انتقال، باید سرمایه‌گذاری‌ها به گونه‌ای باشند که تا سال ۲۰۴۱ مقدار ظرفیت انتقال به میزان ۱۲۸٪ افزایش یابد.

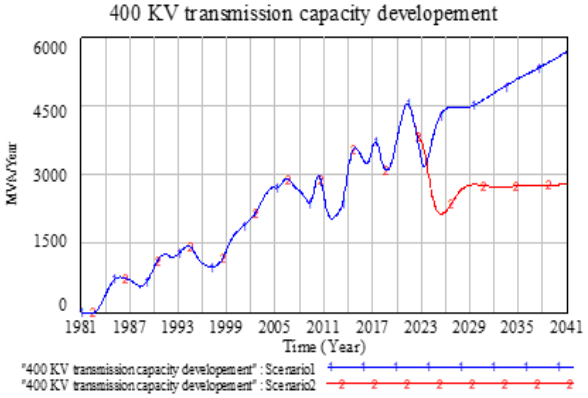
- **سناریوی دوم: روند کاهشی تقاضای برق تا سال ۲۰۴۰ (سناریوی خوشبینانه)**

سلیمیان و همکاران (۱۴۰۰)، به پیش‌بینی تقاضای برق تا سال ۲۰۴۰ پرداخته‌اند.[۳۱] ایشان تقاضای برق کشور در سال ۲۰۴۱ را با درنظرگرفتن صرفه‌جویی بیشینه و به‌صورت خوش‌بینانه ۴۸۱/۷۱۰ تراوات ساعت پیش‌بینی کرده‌اند. با درنظرگرفتن پیشنهاد پژوهش حاضر، سناریوی دوم به صورت نمودار سبزرنگ در شکل ۲۱در نظر گرفته شده است.

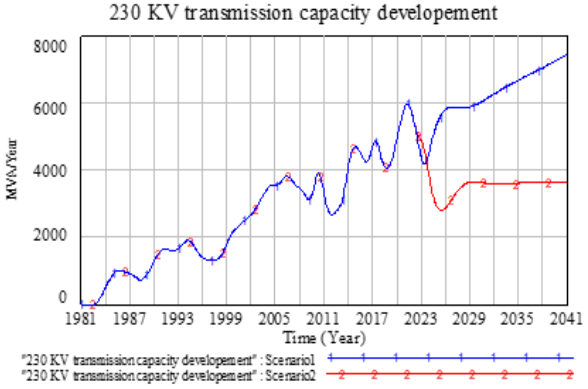
با اعمال سناریو ی دوم، نتایج به‌دست‌آمده در شکل‌های ۲۲ الی ۲۵ درخصوص متغیرهای مدل مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، در صورتی که تقاضای برق طبق سناریوی خوشبینانه، روندی با شیب کمتر نسبت به ادامه‌ی شرایط فعلی داشته باشد، نیاز به احداث ظرفیت انتقال به میزان قابل‌توجهی کاهش پیدا



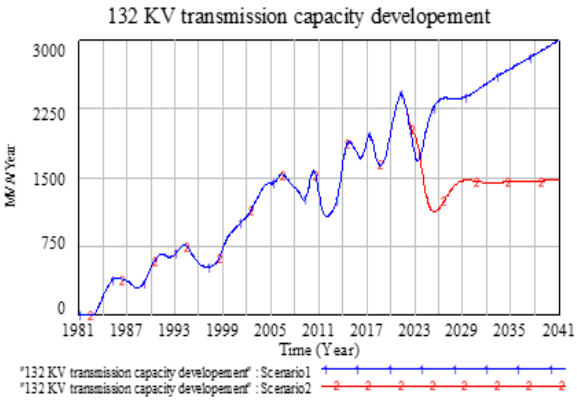
شکل ۲۱. پیش‌بینی مصرف برق کشور با توجه به روند خوش‌بینانه.[۳۱]



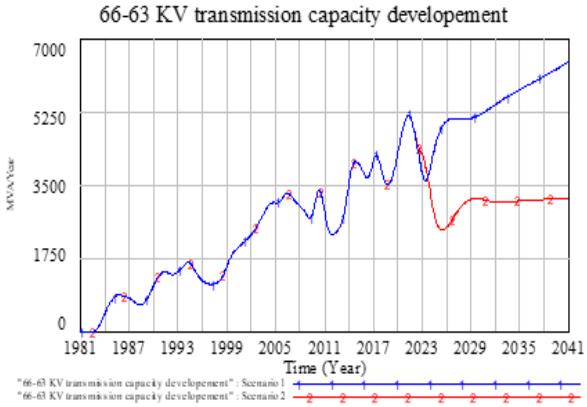
شکل ۲۲. ظرفیت انتقال ۴۰۰KV در دو سناریو.



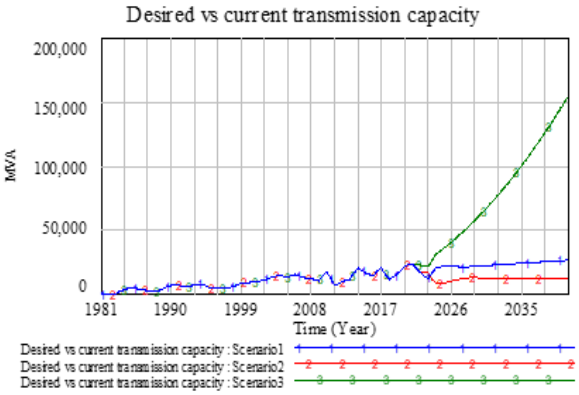
شکل ۲۳. ظرفیت انتقال ۲۳۰KV در دو سناریو.



شکل ۲۴. ظرفیت انتقال ۱۳۲KV در دو سناریو.



شکل ۲۵. ظرفیت انتقال KV ۶۶-۶۳ در دو سناریو.



شکل ۲۶. اختلاف بین ظرفیت موردنیاز و ظرفیت ایجادشده در سناریوی سوم.

خواهد کرد و سیاست بهبود در سناریوی دوم بدین صورت تعریف می‌شود که سرمایه‌گذاری‌ها باید به گونه‌ای باشند که ظرفیت انتقال تا سال ۲۰۴۱ به میزان ۸۰٪ افزایش یابد.

- **سناریوی سوم: ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق و ادامه‌ی روند احداث ظرفیت طبق روند ۵ ساله‌ی گذشته**

در سناریوی سوم، فرض شه است که روند تقاضای برق مانند سناریوی اول افزایشی باشد و احداث ظرفیت انتقال از سال ۲۰۲۱ به بعد به جای آنکه در مدل تعیین شود، به صورت برون‌زا و هر ساله به اندازه‌ی میانگین احداث ۵ سال (۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱) ادامه یابد (مطابق جدول ۳).

در شرایط ذکرشده، مطابق شکل ۲۶ درخصوص میزان کمبود ظرفیت، نسبت قابل‌انتظاری حاصل شده است. مهم‌ترین نکته درخصوص ادامه‌ی شرایط مذکور

جدول ۳. مقدار احداث ظرفیت شبکه‌ی انتقال با توجه به میانگین مقدار ۵ ساله (مگاولت آمپر).

Year	Construction of 400KV	Construction of 230KV	Construction of 132KV	Construction of 66-63KV
2017	1,910	1,575	1,386	3,338
2018	4,670	3,676	3,027	3,050
2019	6,245	2,814	949	2,462
2020	4,050	4,060	910	1,899
2021	1,145	1,723	1,223	2,556
Average of 5 years	3,604	2,770	1,499	2,661

جدول ۴. میزان احداث ظرفیت انتقال پس از اجرای ۳ سناریوی پژوهش حاضر.

Year	400 KV construction			230 KV construction			132 KV construction			63-66 KV construction		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
2022	4065	4065	3604	5328	5328	2770	2146	2146	1499	4625	4625	2661
2023	3608	3245	3604	4729	4253	2770	1905	1713	1499	4105	3692	2661
2024	3566	2591	3604	4674	3396	2770	1883	1368	1499	4057	2948	2661
2025	3740	2317	3604	4902	3037	2770	1975	1223	1499	4255	2636	2661
2026	3952	2318	3604	5180	3038	2770	2086	1224	1499	4496	2637	2661
2027	4117	2421	3604	5397	3174	2770	2174	1278	1499	4684	2755	2661
2028	4228	2514	3604	5543	3295	2770	2233	1327	1499	4811	2860	2661
2029	4310	2559	3604	5649	3355	2770	2275	1351	1499	4903	2912	2661
2030	4385	2568	3604	5748	3366	2770	2315	1356	1499	4989	2922	2661
2031	4466	2561	3604	5854	3357	2770	2358	1352	1499	5081	2914	2661
2032	4554	2553	3604	5969	3347	2770	2404	1348	1499	5181	2905	2661
2033	4647	2553	3604	6092	3346	2770	2454	1348	1499	5287	2905	2661
2034	4742	2558	3604	6216	3353	2770	2504	1351	1499	5396	2911	2661
2035	4835	2564	3604	6338	3361	2770	2553	1354	1499	5501	2917	2661
2036	4923	2566	3604	6454	3364	2770	2600	1355	1499	5602	2919	2661
2037	5010	2567	3604	6568	3364	2770	2645	1355	1499	5701	2920	2661
2038	5098	2568	3604	6683	3366	2770	2692	1356	1499	5801	2921	2661
2039	5187	2569	3604	6799	3367	2770	2739	1356	1499	5902	2922	2661
2040	5277	2571	3604	6917	3370	2770	2786	1357	1499	6004	2925	2661
2041	5367	2573	3604	7036	3373	2770	2834	1358	1499	6107	2927	2661

اختلافی است که بین میزان ظرفیت موجود و ظرفیت موردانتظار به‌وجود می‌آید. از آنجا که در سناریوی دوم، تقاضای برق با رفتاری نمایی در حال افزایش بوده است، ادامه‌ی میانگین رفتار ۵ ساله‌ی گذشته قادر به جبران تقاضا نیست.

در جدول ۴، مقدار ایجاد ظرفیت به تفکیک سناریوهای مختلف و پست‌های مختلف ارائه شده است.

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به‌دلیل کثرت متغیرهای تأثیرگذار در صنعت انتقال برق، برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت درخصوص مقدار احداث، زمان احداث، و مکان آن، همواره با چالش‌های متعددی مواجه بوده است. پژوهش حاضر، ضمن مرور مطالعات پیشین داخلی و خارجی، چارچوب مناسبی را جهت تحلیل سیاست‌های مربوط به مقدار سرمایه‌گذاری در صنعت انتقال ارائه داده است. نمودار زیرسیستم‌های پژوهش حاضر، متغیرهای تورم، تقاضا، و عرضه‌ی برق را به صورت برون‌زا در نظر گرفته است. در نمودار علت و معلولی، متغیرهای مهمی، مانند ظرفیت موجود انتقال برق، استهلاک تجهیزات، سن تجهیزات، هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری، و احتمال سوختن ترانسفورماتورها در نظر گرفته شده و بین ارتباط‌های مستقیم و غیرمستقیم آن‌ها مدل‌سازی صورت گرفته است. پس از آن، مدل جریان- انباشت ترسیم و پس از ورود روابط ریاضی بین متغیرها به شبیه‌سازی و اعتبارسنجی آن پرداخته شده است. نتایج آزمون بازسازی رفتار مرجع حاکی از دقت بالای ۹۰٪ مدل در شبیه‌سازی رفتار ۴۰ ساله‌ی گذشته‌ی ظرفیت‌های انتقال بوده و پس از تأیید اعتبار مدل به شبیه‌سازی ۳ سناریو در حوزه‌ی اخیر پرداخته شده است.

۱) ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق تا افق ۲۰ ساله.
۲) روند کاهشی تقاضای برق تا افق ۲۰ ساله (سناریوی خوش‌بینانه).
۳) ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق، و ادامه‌ی روند احداث ظرفیت طبق روند ۵ ساله‌ی گذشته.

نتایج عددی حاصل از اجرای ۳ سناریوی فوق در افق ۲۰ ساله برای متغیرهای بخش اصلی مدل مطابق جدول ۵ بوده است: در ستون اول، مقدار متغیر در

جدول ۵. نتایج حاصل از اجرای ۳ سناریوی پژوهش.

Variable*	2021	Scenario 1 (In 2041)		Scenario 2 (In 2041)		Scenario 3 (In 2041)	
		Value	٪Change*	Value	٪Change*	Value	٪Change*
Total transmission Capcity	295,642	674,299	128%	531,720	80%	528,881	79%
400 KV	80,203	168,037	110%	132,183	65%	150,569	88%
230 KV	94,318	222,047	135%	175,048	86%	160,064	70%
132 KV	38,360	91,368	138%	72,437	89%	74,067	93%
63-66 KV	82,761	192,847	133%	152,053	84%	144,181	74%
Average life of transmission network (year)	14.6	21.2	45%	24.7	69%	24.6	168%
required capacity and the created capacity difference	24,125	27,091	12%	12,708	-47%	176,854	633%

* The unit for variables is MVA (MegaVolt-Ampere), and the percentage change with respect to the year 2021 is calculated in the scenarios.

سال ۲۰۲۱ و ستون‌های بعدی، مقدار هر کدام از متغیرها را در سال ۲۰۴۱ و درصد تغییر آن‌ها نسبت به سال ۲۰۲۱ ارائه شده است.

نتایج حاصل از اجرای سه سناریوی پژوهش حاضر، طبق جدول ۵ نشان می‌دهد که در سناریوی اول، که براساس ادامه‌ی روند فعلی تقاضای برق تا سال ۲۰۴۱ طراحی شده است، مقدار کل ظرفیت انتقال به‌صورت نمایی افزایش یافته است؛ که براساس تقاضای برق ناشی از افزایش جمعیت کشور و توسعه‌ی اقتصادی آن بوده است. متغیرهای توسعه‌ی ظرفیت انتقال برق نیز به صورت هدفجو افزایش یافته‌اند. متوسط سن شبکه‌ی انتقال نیز به‌صورت هدفجو در حال افزایش بوده است؛ در نتیجه، نیاز به جایگزینی شبکه‌ی انتقال نیز به‌طور نمایی افزایش خواهد یافت. بنابراین، اختلاف بین ظرفیت موردنیاز و ظرفیت موجود نیز رو به فزونی خواهد بود. در سناریوی دوم، در افق ۲۰ ساله، مقدار تقاضای برق به‌دلیل صرفه‌جویی یا تغییرات مدیریتی به‌طورخوش‌بینانه با شیب کاهشی افزایش می‌یابد. اگر مقدار احداث ظرفیت انتقال سالیانه با استفاده از مدل محاسبه شود، کمترین فاصله بین ظرفیت موردنیاز و ظرفیت واقعی حاصل خواهد شد، که به‌عنوان یک سیاست مناسب برای پیش‌بینی ظرفیت انتقال در آینده به شمار می‌رود.

اما در سناریوی سوم، که در آن هم روند تقاضای برق افزایشی است و هم مقدار احداث ظرفیت سالیانه براساس میانگین پنج سال گذشته ادامه می‌یابد، در سال ۲۰۴۱ بیشترین اختلاف بین ظرفیت انتقال موردنیاز و ظرفیت انتقال واقعی به‌وجود خواهد آمد و پایداری ظرفیت انتقال برق به‌طور معناداری تنزل می‌کند. نتایج عددی سه سناریوی اجراشده بر روی مدل درخصوص میزان احداث ظرفیت انتقال به تفکیک نوع پست‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

References - منابع

1. Rajabi Mashhadi, M., 2018. Power industry strategies for supplying transformers in the power network of Iran. In 5th International Transformer Conference and Exhibition. Presidential Cultural Institution. [In Persian].
2. Strbac, G., Pollitt, M., Konstantinidis, C.V., Konstantelos, I., Moreno, R., Newbery, D., Green, R., 2014. Electricity transmission arrangements in Great Britain: time for change?. *Energy Policy*, *73*, *pp*. 298–311. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.06.014.
3. Kucuksayacigil, F., Min, K.J., 2021. A lattice method for jump-diffusion process applied to transmission expansion investments under demand and distributed generation uncertainties. *Energy Systems 12*, *pp*. 773–800. https://doi.org/10.1007/s12667-020-00385-w.
4. Tavanir, 2022. 55 Years of Iran's Power Industry (1967-2021). [In Persian].
5. Ude, N.G., Yskandar, H., Graham, R.C., 2019. A comprehensive state-of-the-art survey on the transmission network expansion planning optimization algorithms. *IEEE Access, 7*, *pp*. 123158–123181. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2936682.
6. Contreras, J., Gross, G., Arroyo, J.M., Muñoz, J.I., 2009. An incentive-based mechanism for transmission asset investment. *Decis Support Syst, 47*, *pp*. 22–31.
7. Y He, Y.X., Jiao, J., Chen, R.J., Shu, H., 2018. The optimization of Chinese power grid investment based on transmission and distribution tariff policy: A system dynamics approach. *Energy Policy, 113*, *pp*. 112–122. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.062.
8. Zambrano, C., Arango-Aramburo, S., Olaya, Y., 2019. Dynamics of power-transmission capacity expansion under regulated remuneration.

International *Journal of Electrical Power & Energy Systems,* 104, *pp*. 924–932. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.07.029.

9. Dismukes, D.E., Cope, R.F., Mesyanzhinov, D., 1998. Capacity and economies of scale in electric power transmission. *Util Policy, 7*, *pp*. 155–162. https://doi.org/10.1016/S0957-1787(98)00010-1.

10. Sha, M., Chen, S., Gao, M., Chen, Y., Wang, Z., Tian, Y., 2018a. Research on the investments allocation of comprehensive plan of power grid enterprises under the electricity transmission and distribution price reformation. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, p. 42022. https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/4/042022.

11. Ford, A., 2001. Waiting for the boom: a simulation study of power plant construction in California. *Energy Policy*, *29*, *pp*. 847–869. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(01)00035-0.

12. Dehghan, H., Amin-Naseri, M.R., Nahavandi, N., 2021. A system dynamics model to analyze future electricity supply and demand in Iran under alternative pricing policies. *Util Policy*, *69*, 101165. https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101165.

13. Li, J., Luo, Y., Wei, S., 2022. Long-term electricity consumption forecasting method based on system dynamics under the carbon-neutral target. *Energy 244*, 122572. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122572.

14. Rezaei, H., Manzour, D., 2009. Modeling electric energy demand in the Iran with a system dynamics approach. In 7th National Energy Conference (Energy Sustainability, Supply Security, Demand Management, and Consumption Pattern Reform), Tehran. [In Persian].

15. Qudrat-Ullah, H., 2013. Understanding the dynamics of electricity generation capacity in Canada: a system dynamics approach. *Energy 59*, *pp*. 285–294. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.029.

16. Mohaghar, A., Najafzadeh, K., 2017. A system dynamics model for enhancing capacity of electricity generation in Iran. *Management and Development Process 30*. [In Persian].

17. Ahmadvand, A.M., Kalantari Hermzi, M., 2019. Dynamic investment model in power distribution capacity development. In The Second National Conference of the Iranian System. Dynamics Society, Tehran. [In Persian].

18. Monjazeb, M., Rezaei Movahed, B., 2019. Forcasting electricity losses in transmission and distribution grids: system dynamics approach compared to econometric method. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, *5*. [In Persian].

19. Ahmad, S., Mat Tahar, R., Muhammad-Sukki, F., Munir, A.B., Abdul Rahim, R., 2016. Application of system dynamics approach in electricity sector modelling: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 56, *pp*. 29–37. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.034.

20. Wang, Y., Zhang, F., Zhang, Y., Wang, X., Fan, L., Song, F., Ma, Y. and Wang, S., 2019. Chinese power-grid financial capacity based on transmission and distribution tariff policy: A system dynamics approach. *Utilities Policy*, 60, p.100941. https://doi.org/10.1016/j.jup.2019.100941.

21. Mashayekhi, A., 2019. System dynamics: A Systemic Perspective. 4th ed. *Aryana Qalam Publications*. ISBN: 978-600-7677-25-4. [In Persian].

22. Nahavandi, N., Najafzadeh, K., 2012. Comparison of demand side control and supply side development of electricity energy by system dynamics approach. *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*, *22*, *pp*. 341–358. [In Persian].

23. Shahmohammadi, M. S., Yusuff, R., Keyhanian, S., Shakouri, H. G., 2015. A decision support system for evaluating effects of feed-in tariff mechanism: dynamic modeling of Malaysia's electricity generation mix. *Appl Energy*, *146*, *pp*. 217–229. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.076.

24. Dianat, F., khodakarami, vahid, Hosseini, S.H., Shakouri Ganjavi, H., 2021. Systemic modeling of renewable electricity generation expansion planning in competition with conventional electricity. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research,* 7. *pp.* 7-50. [In Persian].

25. Lin, W., Lu, J., Zhu, J., Xu, L., 2022. Research on the sustainable development and dynamic capabilities of china's aircraft leasing industry based on system dynamics theory. *Sustainability*, *14*(3), 1806. https://doi.org/doi: 10.3390/su14031806.

26. Suryani E., Hendrawan RA., Adipraja, PF., Indraswari, R., 2020. System dynamics simulation model for urban transportation planning: a case study. *International Journal of Simulation Modelling*, *19*, *pp*. 5-16. http://dx.doi.org/10.2507/IJSIMM19-1-493.

27. Sterman, J., 2002. System dynamics: systems thinking and modeling for a complex world.

28. PE, W.H.B., 2003b. Analysis of transformer failures. In 36th Annual Conference of International Association of Engineering Insurers– Stockholm.

29. Arri, E., Locci, N., Mocci, F., 1990. Measurement of transformer power losses and efficiency in real

working conditions. In Conference on Precision Electromagnetic Measurements. IEEE, *pp*. 164–165. https://doi.org/10.1109/CPEM.1990.109973.

30. Romero-Quete, A.A., Mombello, E.E., Rattá, G., 2016. Assessing the loss-of-insulation life of power transformers by estimating their historical loads and ambient temperature profiles using ANNs and Monte Carlo simulations. *Dyna (Medellin), 83*, *pp*. 104–113.

31. Salimian, Z., GoodarziRad, R., Farmad, M., Bodaghi, M., Mokarizadeh, V., Shafie Zadeh, M.A., 2021. Effects of DSM on final energy uses: implications of message energy model. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research, 7*(1), *pp*. 51-58. [In Persian].

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 79-91

Sharif University of Technology

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



Research Article

Development of a Data-Driven Quality Management Model for Creative Industries

Mohammadsaleh Soltani and Abdollah Aghaie*

Faculty of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
* corresponding author: (aaghaie@kntu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:27 October 2024

Revised:9 March 2025

Accepted:6 April 2025

Keywords:

Quality management,
data science,
data-driven quality management,
creative industries.

Abstract

One of the challenges of creative industries can be considered as "quality management". What are the constituent elements of quality in creative industries, what are the characteristics of a high-quality creative product and how can the issue of quality be managed in these industries? Among the challenges for creative industries activists is to benefit from new concepts such as Quality4, which arose from the concept "Industry 4", and can help answer these challenges. One of the key elements of Quality4 can be considered "data-driven", which can help to solve the challenges of quality management in creative industries, like a key, and by developing the concept of "data-driven quality management", provide a new perspective in quality management of creative industries. The upcoming research first forms a conceptual framework by formulating data-driven quality management in the special contingency framework of creative industries, which first describes and clarifies the dimensions of the concept of "quality" in creative industries; And then, based on that, he forms a research model in operations based on the "allocation problem" which provides a computational framework for quality management in creative industries with a computational look at the "quality" problem and in the process of achieving "quality quantification". It implements the model in the cinema industry as one of the important subcategories of creative industries. The model, presented with the design and development of two innovative indicators called "quality rating" and "interaction and cooperation rate" for the production factors of a product in creative industries, shows that it is possible to combine production factors and equipment with an a priori approach (before the start of creative product production). Optimizes the use of production factors in the production of a creative product with the aim of maximizing the quality and minimizing the production cost, based on the needs of the owner of a creative product.

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:
Soltani, M.S. and Aghaie, A. 2026. Development of a data-driven quality management model for creative industries, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.79-91. https://doi.org/10.24200/j65.2025.65333.2414

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

توسعه‌ی یک مدل مدیریت کیفیت داده‌محور برای صنایع خلاق

محمدصالح سلطانی و عبدالله آقایی *

دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (aaghaie@kntu.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

واژگان کلیدی:

مدیریت کیفیت،

علم داده،

مدیریت کیفیت داده‌محور،

صنایع خلاق.

چکیده

یکی از چالش‌های صنایع خلاق را می‌توان موضوع «مدیریت کیفیت» دانست. بهره‌مندی از مفاهیم تازه‌ای مانند Quality 4 می‌تواند در پاسخ به چالش‌های ذکرشده کمک کند. یکی از عناصر کلیدی Quality 4، «داده‌محوری» است؛ که با توسعه‌ی مفهوم «مدیریت کیفیت داده‌محور»، چشم‌انداز جدیدی در مدیریت کیفیت صنایع خلاق ارائه می‌دهد. پژوهش حاضر، نخست با صورت‌بندی مدیریت کیفیت داده‌محور در چارچوب صنایع خلاق، ابعاد مفهوم «کیفیت» در صنایع خلاق را تشریح کرده و سپس بر اساس آن یک مدل پژوهش در عملیات بر پایه‌ی «مسئله‌ی تخصیص» شکل داده است، که با کمّی‌سازی کیفیت، چارچوبی محاسباتی برای مدیریت کیفیت در صنایع خلاق ارائه داده و درنهایت، مدل مذکور را در صنعت سینما پیاده‌سازی کرده است. مدل ارائه‌شده نشان می‌دهد که می‌توان با رویکرد پیشینی، ترکیب عوامل، و تجهیزات تولید استفاده‌شده در تولید، یک محصول خلاق را با هدف بیشینه‌سازی کیفیت و کمینه‌سازی هزینه‌ی تولید، براساس مطلوبیت‌های مالک یک محصول خلاق، بهینه ساخت.

۱. مقدمه

تولد مفاهیم مرتبط با انقلاب صنعتی چهارم[1] یعنی استفاده از داده‌های بزرگ، هوش مصنوعی، و اینترنت اشیا (IOT)[2] منجر به تکامل مفهومی تازه به نام «کیفیت ۴» یا «Quality 4» شده است. Quality 4، فن‌آوری‌های مدرن مذکور را در سیستم‌های مدیریت کیفیت ادغام می‌کند، تصمیم‌گیری در زمان واقعی را تسهیل می‌سازد، و کیفیت کلی محصول را بهبود می‌بخشد. مفهوم «Quality 4» را می‌توان به معنای «دیجیتالی‌شدن مدیریت کیفیت» دانست، که البته جایگزین روش‌های سنتی نمی‌شود؛ بلکه آن‌ها را ارتقا می‌دهد و همچنین دو مزیت را در فرایند تولید برجسته می‌سازد. نخست، آنکه فرایندها و نتایج را بیشتر از قبل قابل مشاهده و مرتبط به هم می‌کند؛ و دوم، آنکه با ارزش‌آفرینی از راه مدیریت داده‌ها، فرهنگ سازمان تولیدکننده را ارتقاء می‌بخشد.[1] درواقع «کیفیت ۴»، یک پارادایم تازه بر مبنای یادگیری تجربی و نیز تولید و جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها در زمان واقعی ایجاد می‌کند، که می‌تواند به اتخاذ تصمیم‌های هوشمند کمک کند.[2] همچنین نباید فراموش کرد که با وجود توسعه‌ی دیجیتالی‌سازی فرایندها در «کیفیت ۴»، همچنان نیروی انسانی بخش مهمی از مدیریت کیفیت خواهد بود. درواقع، یکی از ارکان و اجزاء «کیفیت ۴»، ترویج فرهنگی است که در آن تمام افراد مؤثر در مراحل مختلف تولید یک محصول، نسبت به اقدام‌های مربوط به کیفیت، خود را مسئول خواهند دانست و ابزارهای موردتأکید در «کیفیت ۴» تعامل‌های میان انسان و ماشین را در مدیریت کیفیت ارتقاء خواهد داد.[3] بنابراین، مستقل از جنبه‌های فنی، «کیفیت ۴» را می‌توان یک «ذهنیت» دانست، که با بهره‌برداری از رویکردهای نوین مدیریتی، مانند علم داده، می‌کوشد نظرگاهی تازه به حوزه‌ی مدیریت کیفیت داشته باشد و با این ذهنیت، رویکردهای مدیریت کیفیت را به اقتضاء تحول‌های ناشی از انقلاب صنعتی چهارم، به طرزی معنادار ارتقاء بخشد. به‌بیان دیگر، گذشته از جنبه‌های فنی و تکنیکی مفهوم «کیفیت ۴»، مانند استفاده از اینترنت اشیاء و یا رویکرد داده‌محوری، مفهوم «کیفیت ۴»، رویکردهای حوزه‌ی مدیریت کیفیت را نیز ارتقاء می‌بخشد و به تعبیری می‌توان گفت «فرهنگ مدیریت کیفیت» را دستخوش تغییراتی قابل‌توجه می‌سازد. بر همین مبنا، توسعه‌ی مدل‌های کمّی و عددی برای مدیریت کیفیت باید بر پایه‌ی رویکردهای Quality 4 انجام شود؛ چرا که رویکردهای مذکور، عامل موفقیت و نتیجه‌بخش‌بودن چنین مدل‌هایی خواهند بود.

[1] Industry 4

[2] Internet Of Things

استناد به این مقاله:

سلطانی، محمدصالح و آقایی، عبدالله، ۱۴۰۴. توسعه‌ی یک مدل مدیریت کیفیت داده‌محور برای صنایع خلاق. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص.۷۹-۹۱.

https://doi.org/10.24200/j65.2025.65333.2414

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

«کیفیت ۴» ابعاد و اجزاء متنوعی دارد، که در میان آن‌ها، «توجه به کیفیت به‌عنوان یک رشته‌ی داده‌محور»، یکی از مهم‌ترین ارکان به‌شمار می‌رود. کاربردهای گسترده‌ی «علم داده» در جهان امروز بر کسی پوشیده نیست. استفاده از روش‌های داده‌کاوی در مدیریت کیفیت موجب تقویت تفکر انتقادی در طراحی و تولید محصولات می‌شود.[۴] با توجه به اهمیت علم داده در انقلاب صنعتی چهارم و توسعه‌ی مفهومی «کیفیت ۴» بر پایه‌ی مفاهیمی که یکی از آن‌ها استفاده از داده در کیفیت است، «مدیریت کیفیت داده‌محور» را می‌توان به‌روزرسانی و ارتقاء چارچوب‌های مدیریت کیفیت با استفاده از علم داده دانست؛ که در آن، به استفاده از داده‌ها و بهره‌مندی از روش‌های داده‌کاوی با هدف بهبود کیفیت طراحی و تولید محصولات توجه شده است. در حالی که اصول Quality 4 کاملاً در بخش‌های تولید و مهندسی بررسی و پذیرش شده‌اند، کاربرد آن‌ها در صنایع خلاق، که واجد ویژگی‌هایی خاص و منحصربه‌فرد در میان صنایع هستند، بسیار محدود بوده است. پژوهش حاضر به دنبال استفاده از ابزارهای نوین مدیریت کیفیت با رویکرد داده‌محوری برای ارتقاء کیفیت محصولات خلاق است، که هدف خود را در قالب «توسعه‌ی یک مدل مدیریت کیفیت داده‌محور برای صنایع خلاق» نمایان می‌سازد. در طراحی مدل مذکور، اصول «کیفیت ۴» به‌عنوان یک تحول مفهومی مهم در مفاهیم مرتبط با حوزه‌ی مدیریت کیفیت استفاده شده است. مدل ارائه‌شده برای صنایع خلاق، به‌صورت موردی در یکی از زیرشاخه‌های صنعت مدیریت کیفیت، یعنی صنعت سینما، کاربست خواهد یافت.

۲. مرور ادبیات

۱.۲. مرور پژوهش‌های مرتبط

صنایع خلاق، نقش مهمی در اقتصاد جهانی ایفا می‌کنند و به ایجاد شغل، نوآوری، و تنوع فرهنگی یاری می‌رسانند.[۵] با این حال، مدیریت کیفیت در صنایع خلاق به‌دلیل ماهیت نامشهود محصولات خلاق، نیاز به نوآوری مداوم و درک ذهنی از ارزش توسط مصرف‌کنندگان، یک کار پیچیده است.[۶] بهره‌برداری از مفهوم «کیفیت ۴» که با ایجاد چشم‌اندازی متفاوت در درک مفهوم «کیفیت»، مسیرهایی تازه را در حوزه‌ی «مدیریت کیفیت» پیش روی پژوهشگران قرار می‌دهد، می‌تواند فرصتی برای توسعه‌ی مدل‌هایی مناسب برای «مدیریت کیفیت در صنایع خلاق» باشد. تامبیر[1] و همکاران،[۷] در سال ۲۰۲۱، به تشریح ۱۱ محور «کیفیت ۴» پرداخته‌اند، که به این شرح هستند:

- **داده:** عنصر اصلی «کیفیت ۴»، جمع‌آوری سریع و کارآمد داده‌ها از منابع متعدد برای توانمندسازی و ارتقاء فرایند تولید است.
- **تجزیه‌وتحلیل:** فن‌آوری‌های پیشرفته‌ی حاصل از «صنعت ۴» تولیدکنندگان را قادر می‌سازد تا داده‌های انبوه را جمع‌آوری و از ابزارهای تحلیلی و روش‌هایی مانند «یادگیری ماشین» برای ارتقاء عملکرد استفاده کنند.
- **قابلیت اتصال:** «کیفیت ۴» میان فن‌آوری‌های اطلاعاتی و عملیاتی، اتصالی معنادار برقرار می‌کند.
- **همکاری:** «کیفیت ۴» برای استفاده از فن‌آوری‌های مدرن، مانند شنیدن نظرهای مشتریان برای تجزیه‌وتحلیل عواملی مانند رضایت مشتری و درک عمیق‌تر از توزیع محصول در زنجیره‌ی تأمین طراحی شده است.
- **توسعه‌ی برنامه‌های کاربردی:** «صنعت ۴» نویددهنده‌ی طراحی و توسعه‌ی برنامه های کاربردی جدید، مانند استفاده از واقعیت افزوده و واقعیت مجازی در فرایندهای تولید است.
- **مقیاس‌پذیری:** «کیفیت ۴» با استفاده از ابزارها و روش‌های نوین محاسباتی، مقیاس‌پذیری را ممکن می‌سازد.
- **سیستم‌های مدیریت:** برای بهره‌مندی از «کیفیت ۴»، سازمان‌ها باید بررسی کنند که چگونه نرم‌افزار، فرآیندها را خودکار می‌سازد. بهبود سیستم، زمانی را که کارگران و مدیران سازمان برای اجرای فرایندها صرف می‌کنند، کاهش می‌دهد و آن‌ها را تشویق می‌کند تا بر مشاغل نوآورانه تمرکز کنند.
- **انطباق:** «کیفیت ۴» به کسب‌وکارها کمک می‌کند تا برنامه‌های انطباق موجود را تجزیه‌وتحلیل کنند و فرصت‌های بهبود فرایندها را تشخیص دهند.
- **فرهنگ:** «کیفیت ۴» با اتصال داده‌ها، تجزیه‌وتحلیل‌ها، و فرآیندها و نیز رشد کار تیمی، به رشد واقعی و معنادار «فرهنگ کیفیت» در سازمان کمک می‌کند.
- **رهبری:** «کیفیت ۴» فرهنگ کیفیت مناسب را در سرتاسر سازمان ایجاد می‌کند، که با پیونددادن فرآیند، اطلاعات، تجزیه‌وتحلیل، و در نتیجه افزایش ارتباط‌ها و همکاری و بینش، به رهبری سازمان کمک می‌کند.
- **شایستگی:** «کیفیت ۴» چندین نوآوری را در بر می‌گیرد، که می‌توانند برای افزایش شایستگی استفاده شوند. برای مثال، پلتفرم‌های شبکه‌های اجتماعی را می‌توان برای به اشتراک‌گذاشتن درس‌ها و دیدگاه‌ها در بین سازمان‌ها استفاده کرد. همچنین سیستم‌های هوش مصنوعی و «یادگیری ماشین» می‌توانند مهارت‌های جدیدی در سازمان تولیدکننده ایجاد کنند.

بر مبنای ۱۱ محور اخیر، می‌توان به تعریفی جامع از «کیفیت ۴» رسید و نقش مفهوم کلیدی آن را در توسعه‌ی مدل پژوهش حاضر توضیح داد.

زونشیان و نت[2] (۲۰۲۰)،[۸] ابعاد و اجزاء مختلف مفهوم «کیفیت ۴» را با جزئیات توضیح داده‌اند. با توجه به اینکه «توجه به کیفیت به‌عنوان یک علم داده‌محور» یکی از ارکان «کیفیت ۴» است، امکان توسعه‌ی مفهومی «مدیریت کیفیت داده‌محور» براساس آنچه در نوشتار حاضر آمده است، ممکن می‌شود.

توسعه‌ی مدل‌های داده‌محور برای مدیریت کیفیت در صنایع خلاق، نمونه‌هایی هر چند محدود در میان پژوهش‌های صورت‌گرفته دارند؛ که بسیاری از آن‌ها، تمرکز خود را بر «صنعت سینما» متمرکز کرده‌اند؛ چرا که صنعت سینما به‌دلیل گستردگی مخاطبان، گردش مالی قابل‌توجه و محبوبیت بالا، یکی از مهم‌ترین زیرمجموعه‌های صنایع خلاق به‌شمار می‌رود. برای نمونه، تانگ و یو[3] (۲۰۲۱)،[۹] یک مدل مفهومی برای طراحی شاخص سنجش رضایت مشتریان فیلم سینمایی با نام CCSI[4] ارائه کرده‌اند؛ که پایه‌ی آن را می‌توان «ارزش تجربی» یا ارزش درک‌شده‌ی مخاطب از تماشای یک فیلم سینمایی دانست. مدل اخیر که با الهام از «شاخص رضایت مشتری» (CSI)[5] طراحی شده است،

[1] Tambare
[2] Zonnenshain & Kenett
[3] Tang & Yu
[4] Cinema Customer Satisfaction Index
[5] Customer Satisfaction Index

تلاش می‌کند تا با سنجش کمّی میزان رضایت مشتریان از یک فیلم سینمایی (به‌عنوان یک محصول خلاق) آن را در قالب یک شاخص عددی صورت‌بندی کند. در پژوهشی دیگر، لیم[6] و همکاران (۲۰۲۳)،[10] با توسعه‌ی مدلی به نام DRECE[7] برای تجزیه‌وتحلیل گیشه در صنعت فیلم کره‌ی جنوبی به بحث و بررسی پرداخته‌اند؛ که در آن از روش‌های کاهش ابعاد، خوشه‌بندی، و طبقه‌بندی به جهت ارائه‌ی بینش برای تصمیم‌گیری مبتنی بر داده استفاده کرده‌اند. همچنین پژوهش اخیر، بر اهمیت تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در صنعت فیلم و پتانسیل مدل‌های هوش مصنوعی برای متحول‌ساختن نگاه سنتی به صنایع خلاق تأکید کرده است. مدل DRECE از XAI (هوش مصنوعی قابل توضیح) برای تجزیه‌وتحلیل گیشه‌ی یک فیلم سینمایی با ادغام روش‌های هوش مصنوعی قابل‌توضیح برای بهبود شفافیت و درک عوامل مؤثر در فروش فیلم در گیشه استفاده می‌کند. در مطالعه‌ی دیگری، لش و ژائو[8] (۲۰۱۶)،[11] با دسته‌بندی مراحل تولید یک فیلم سینمایی در ۴ مرحله‌ی «پیش‌تولید»، «تولید»، «پس‌تولید» و «توزیع»، راه‌حل‌هایی برای پیش‌بینی موفقیت فیلم سینمایی در مرحله‌ی پیش‌تولید ارائه کرده‌اند. اقبال[9] و همکاران (۲۰۲۱)،[12] نیز در پژوهشی یک مدل پیش‌بینی ویژگی‌های ترکیبی برای فیلم سینمایی ارائه کرده‌اند؛ که از دو مدل تجربی مختلف تشکیل شده است: ۱) پیش‌بینی کیفیت فیلم‌ها با استفاده از مجموعه‌ی اصلی ویژگی‌ها، و ۲) زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها براساس روش تجزیه‌وتحلیل مؤلفه‌های اصلی برای پیش‌بینی کلاس موفقیت فیلم‌ها.

به طراحی مدل‌های ریاضی برای مدیریت کیفیت در صنایع خلاق (به‌طورخاص صنعت سینما) نیز در برخی پژوهش‌ها توجه شده است. برای نمونه، تحسیری و همکاران (۲۰۱۳)،[13] در نوشتاری یک مدل ریاضی برای انتخاب ترکیب بهینه‌ی عوامل تولید یک فیلم سینمایی ارائه کرده‌اند؛ که در قالب یک «مسئله‌ی تخصیص»، ترکیب بهینه‌ی اخیر را برای عوامل تولید فیلم سینمای انتخاب می‌کند. تابع هدف مدل ایشان، بیشینه‌سازی امتیاز ترکیب عوامل بوده و مدل با استفاده از «الگوریتم ژنتیک» حل شده است. همچنین حمیدیا و همکاران (۲۰۲۲)،[14] نیز در پژوهشی توسعه‌ی یک مدل ریاضی برای پیش‌بینی فروش بالقوه‌ی فیلم‌های سینمای ایران را انجام داده‌اند، که رویکردی داده‌محور دارد و با استفاده از داده‌های تاریخی مرتبط با فروش فیلم‌های سینمای ایران، عوامل مؤثر در فروش فیلم‌های سینمایی را بررسی کرده و با درنظرگرفتن عوامل محتوایی، شامل: کارگردان، بازیگر، ژانر، و کیفیت فنی فیلم، به چارچوبی برای پیش‌بینی موفقیت یک فیلم سینمایی رسیده است. پژوهش اخیر، رویکردی «پیشانگر»[10] دارد و پیش از شروع تولید یک فیلم سینمایی می‌تواند برای پیش‌بینی میزان فروش آن استفاده شود. در پژوهش دیگر، احمد[11] و همکاران (۲۰۲۰)،[15] یک سیستم پیش‌بینی ضریب موفقیت فیلم سینمایی در گیشه را در مراحل پیش‌تولید پیشنهاد کرده‌اند، که می‌تواند موفقیت یا شکست یک فیلم را از زمانی که پیش‌تولید فیلم آغاز می‌شود، پیش‌بینی کند.

۲.۲. بررسی شکاف‌های پژوهشی

با وجود برخی تلاش‌ها، که برای استفاده از ابزارهای مهندسی صنایع و به‌طور خاص ابزارهای مدل‌سازی در صنایع خلاق صورت گرفته است، هنوز در بسیاری از زمینه‌ها و جنبه‌های حوزه‌ی ذکرشده، نیاز به فعالیت‌های پژوهشی بیشتر احساس می‌شود. برای مثال، در حوزه‌ی کیفیت فیلم‌های سینمایی، مجموعه‌ی مطالعات انجام‌شده تا حد زیادی «پسینی» (مربوط به پس از تولید فیلم سینمایی) بوده و بر جنبه‌های پیشنهاددهی به مخاطب برای انتخاب فیلم متمرکز بوده است. اما از سوی دیگر، پژوهش‌هایی با نگاه «پیشینی» با هدف رسیدن به راه‌حل‌هایی برای ارتقاء کیفیت در مراحل تولید فیلم سینمایی محدود بوده و این امر، لزوم به‌کارگیری ابزارهایی مثل ابزارهای پژوهش در عملیات برای رسیدن به مدل‌سازی‌های این‌چنینی را به نمایش می‌گذارد. از سوی دیگر، می‌توان گفت عمده‌ی پژوهش‌های مرتبط با مدیریت کیفیت در صنایع خلاق، به ارائه‌ی چارچوب‌های نظری و کیفی پرداخته‌اند و تعداد پژوهش‌هایی که چارچوب‌های مذکور را در قالب یک مدل ریاضی، مدل‌سازی کنند، بسیار کم هستند و آن‌ها نیز عموماً مدل‌هایی ساده و حداقلی دارند، که نمی‌توانند نیازهای گسترده و پیچیده‌ی صنایع خلاق را پاسخ دهند. رویکرد پیشینی در مدل‌سازی باعث می‌شود توجه به کیفیت محصول خلاق از ابتدای مراحل تولید، مدنظر سازندگان قرار گیرد و فرایند تولید محصول خلاق با توجه بسیار به مقوله‌ی «کیفیت» پیش برود. از سوی دیگر، در عمده‌ی پژوهش‌های صورت‌گرفته با رویکرد پیشینی، استفاده از علم داده نیز مغفول مانده و عمده‌ی مدل‌های داده‌محور در حوزه‌ی صنایع خلاق، بر داده‌های مصرف و نتایج حاصل از مواجهه‌ی مخاطب با محصولات خلاق متمرکز هستند. این در حالی است که داده‌های حاصل از سوابق عوامل تولید یک محصول خلاق می‌توانند در طراحی مدل‌های پیشینی برای ارتقاء کیفیت محصولات خلاق در مراحل پیش از آغاز تولید مؤثر واقع شوند. در مجموع، پس از بررسی نوشتارها و پژوهش‌های موجود می‌توان این نکات را به‌عنوان شکاف‌های پژوهشی مرتبط با حوزه‌ی مذکور در نظر گرفت:

کم‌توجهی به مدل‌سازی و بهره‌مندی از ابزارهای حوزه‌ی صنایع خلاق برای توسعه‌ی «مدیریت کیفیت» در صنایع خلاق؛ عدم بهره‌مندی از تحولات نوین مفهومی در عرصه‌ی صنعت (مخصوصاً «صنعت ۴») در پژوهش‌های مرتبط با صنایع خلاق؛ فقدان طراحی مدل‌های ریاضی با رویکرد «پیشینی» برای مدیریت کیفیت در صنایع خلاق؛ فقدان رویکرد «داده‌محور» در طراحی مدل‌های مدیریت کیفیت؛ و استفاده‌ی اندک از علم داده برای توسعه‌ی ابزارهای مدیریت کیفیت برای صنایع خلاق؛ فقدان بهره‌مندی از رویکردهای ویژه مانند برنامه‌ریزی چندهدفه، و برنامه‌ریزی تصادفی در مدل‌سازی‌های مرتبط.

با توجه به شناسایی خلاءهای ذکرشده، در پژوهش حاضر تلاش شده است تا یک مدل‌سازی مبتنی بر برنامه‌ریزی تولید برای محصول خلاق انجام شود و «کیفیت» به‌عنوان یک پارامتر مؤثر، از همان ابتدای مراحل تولید در طراحی و برنامه‌ریزی دخیل شود. پیش‌نیاز این موضوع نیز، رسیدن به یک مدل چارچوب‌مند برای عوامل مؤثر در کیفیت یک محصول خلاق است؛ که براساس آن، چارچوب مدل‌سازی ریاضی برای بهینه‌سازی کیفیت محصول خلاق ارائه شده است و در یکی از مهم‌ترین زیرمجموعه‌های صنایع خلاق، یعنی صنعت سینما، کاربست خواهد یافت. براساس مطالعات صورت‌گرفته بر روی نوشتارها

[6] Leem
[7] Dimension Reduction, Clustering and Classification for Artificial intelligence
[8] Lash & Zhao
[9] Iqbal
[10] Ex-ante
[11] Ahmed

و بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه‌ی مذکور، پرسش‌های کلیدی پژوهش حاضر به این شرح مشخص شده‌اند:

- امکان سنجش و کمّی‌سازی مفهوم «کیفیت» برای مدل‌سازی وجود دارد؟ چگونه می‌توان این کار را انجام داد؟
- آیا امکان طراحی مدل‌های پیشینی (پیش از تولید) برای مدیریت کیفیت محصولات خلاق وجود دارد؟
- یک مدل مدیریت کیفیت داده‌محور برای صنایع خلاق واجد چه ویژگی‌هایی است و چگونه توسعه می‌یابد؟ و کاربست آن در صنایع خلاق چگونه خواهد بود؟
- آیا ابزارهای ویژه‌ی مدل‌سازی، مانند مدل‌سازی چندهدفه، می‌توانند به ایجاد و ارتقاء یک مدل مدیریت کیفیت داده‌محور برای صنایع خلاق کمک کنند؟

۳. شرح پژوهش

براساس آسیب‌شناسی صورت‌گرفته از مرور پژوهش‌های مرتبط با موضوع ذکرشده، نیاز به طراحی یک «مدل مدیریت کیفیت» با استفاده از مفاهیم مرتبط با «مدیریت کیفیت داده‌محور» برای صنایع خلاق به‌عنوان یک نیاز پژوهشی در حوزه‌ی مذکور شناسایی شده است. بر این اساس، باید مدلی طراحی شود که اولاً بر پایه‌ی اصول مدیریت کیفیت شکل بگیرد، سپس مفاهیم تازه مانند مدیریت کیفیت داده‌محور که برخاسته از اصول Quality 4 هستند، را شامل شود؛ و درنهایت، قابل کاربست در عرصه‌های مختلف صنایع خلاق باشد، و دست‌کم در یکی از عرصه‌های صنایع خلاق، قابلیت پیاده‌سازی داشته باشد.

۱.۳. ویژگی‌های مدل مدیریت کیفیت داده‌محور در صنایع خلاق

راهبردهای مدیریت کیفیت در صنایع خلاق باید با درنظرگرفتن شرایط خاص صنعت اخیر ایجاد شوند؛ که برخی از آن‌ها، شامل پذیرش نگرش چندبُعدی به کیفیت، تقویت فرهنگ بهبود مستمر، مشارکت، و تعامل بیشتر با ذینفعان، پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت کیفیت انعطاف‌پذیر، ایجاد معیارهای کیفیت واضح و مکانیسم‌های بازخورد، استفاده از اهرم فن‌آوری برای مدیریت کیفیت، و ایجاد تعادل بین یکپارچگی هنری و موفقیت تجاری هستند.

۴. مدل‌سازی کیفیت در صنایع خلاق

با درنظرگرفتن نکات مطرح‌شده و چارچوب ذکرشده و با تمرکز بر ویژگی‌های مدل مدیریت کیفیت داده‌محور برای صنایع خلاق، که در بخش پیش بیان شد، پژوهش حاضر در پی ارائه‌ی مدلی است که نگرش چندبُعدی به کیفیت را در دستور کار داشته باشد و کیفیت را فراتر از یک بُعد ببیند، برای بهبود مستمر و چرخه‌ی بازخورد با به‌روزرسانی داده‌ها برنامه داشته باشد، داده‌ها را از دل تعامل با ذی‌نفعان استخراج کند، از معیارهای کیفیت واضح بهره ببرد، و میان «موفقیت هنری» و «توفیق تجاری» تعادل برقرار کند، و به‌دنبال هر دو رکن در مسئله‌ی مدیریت کیفیت باشد. لذا، مدل پیشنهادی، در قالب یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه ارائه شده است.

۱.۴. اهداف مدل

مدل پیشنهادی، به‌صورت هم‌زمان برای تحقق سه هدف تلاش می‌کند:

۱) **کمینه‌سازی هزینه‌ی تولید:** با توجه به اینکه مدیریت هزینه‌های تولید، یکی از مسائل مهم در تولید محصولات خلاق است؛ مدل پیشنهادی، رویکردی را برای کمینه‌سازی هزینه‌های تولید محصول خلاق در دستور کار قرار می‌دهد.

۲) **بیشینه‌سازی «امتیاز کیفیت»:** مدل پیشنهادی، یک رویکرد ابتکاری به‌منظور محاسبه‌ی «امتیاز کیفیت» برای هر یک از عوامل تولید و تجهیزات تولید را پیشنهاد می‌کند؛ که براساس آن، کیفیت عملکرد هر عامل یا تجهیز تولید با استفاده از داده‌های عملکرد آن عامل یا تجهیز تولید در گذشته، قابل محاسبه و تبدیل به یک «امتیاز کیفیت» است. بر همین اساس، یکی دیگر از اهداف مدل، بیشینه‌سازی مجموع امتیاز کیفیت عوامل و تجهیزات انتخاب‌شونده برای به‌کارگیری در تولید محصول خلاق است.

۳) **بیشینه‌سازی «امتیاز تعامل و همکاری»**: علاوه‌بر امتیاز کیفیت، که به ابتکار پژوهش حاضر محاسبه شده است، یکی دیگر از عناصر مؤثر در ارتقاء کیفیت تولید یک محصول خلاق را می‌توان «میزان همگن‌بودن اعضاء تیم تولید» دانست. تقویت همکاری تیمی در مراحل تولید محصول خلاق می‌تواند منجر به افزایش کیفیت تولید محصول خلاق شود. بر همین اساس، یک پارامتر به نام «پارامتر تعامل و همکاری» (که با نماد W نمایش داده می‌شود) تعریف می‌شود. پارامتر W میزان «تعامل و همکاری» میان دو عامل تولید را براساس داده‌های تاریخی موجود محاسبه می‌کند. بنابراین، تابع هدف سوم مدل مذکور، بیشینه‌سازی مجموع پارامتر W در ترکیب عوامل انتخابی برای تولید محصول خلاق است.

۲.۴. شرح مدل

مدل حاضر به دنبال بهینه‌سازی فرایند تولید یک «محصول خلاق» (محصول برخاسته از صنایع خلاق) با سه هدف بیشینه‌سازی کیفیت، کمینه‌شدن هزینه‌ی تولید، و بیشینه‌شدن تعامل، و همکاری میان عوامل تولید است. مدل مذکور برای تولید هر محصول خلاق چند «فعالیت اصلی» را احصا می‌کند، که جزئیات آن‌ها توسط کارشناسان هر رشته مشخص می‌شود. سپس برای انجام هر یک از فعالیت‌های اصلی ذکرشده، یک «عامل تولید» و یک یا چند «تجهیز تولید» در نظر گرفته می‌شود؛ و درنهایت، به دنبال تخصیص ترکیب بهینه‌ی عوامل و تجهیزات تولید به فعالیت‌های اصلی تولید یک محصول خلاق است تا سه هدف ذکرشده محقق شوند. مدل ذکرشده از دیدگاه «تهیه‌کننده» یا به‌عبارتی «مالک» یک محصول خلاق اجرا می‌شود.

۱.۲.۴. مجموعه‌ها

H: مجموعه‌ی فعالیت‌های اصلی در تولید محصول خلاق.

J: مجموعه‌ی عوامل تولید دردسترس برای تصدی فعالیت‌های اصلی در تولید محصول خلاق.

I: همان مجموعه‌ی J است، که به جهت استفاده در محاسبات مربوط به پارامتر W با دو نماد نمایش داده می‌شود.

E: مجموعه‌ی تجهیزات دردسترس برای استفاده در فعالیت‌های اصلی در تولید محصول خلاق.

۲.۲.۴. متغیرهای تصمیم

X_{hj}: متغیر ۰ و ۱ تخصیص عامل‌تولید j برای فعالیت h.

Y_{he}: متغیر ۰ و ۱ تخصیص تجهیز e برای فعالیت h.

T_h: زمان انجام فعالیت h در روند تولید محصول خلاق.

۳.۲.۴. پارامترها

D_h: ضریب اهمیت فعالیت h در تولید محصول خلاق.

B_{hj}: امتیاز کیفیت عامل تولید j برای فعالیت h.

R_{he}: امتیاز کیفیت تجهیز e برای فعالیت h.

W_{ij}: پارامتر تعامل و همکاری میان دو عامل تولید، که برای هر دو عامل تولید، عددی بین ۰ و ۱ است، و میزان تعامل و همکاری عامل تولید i و عامل تولید j را نمایش می‌دهد. در صورتی که متغیر W_{ij}، صفر باشد، به این معناست که عامل تولید i و j هیچ‌گونه سازگاری متقابل برای همکاری در یک پروژه‌ی تولید محصول خلاق را ندارند و اگر ۱ باشد، به معنای تعامل بیشینه‌ی دو عامل تولید مذکور است. برای هر عامل تولید $W_{jj}=1$ (همکاری با خودش).

$T\min_h$: کمینه‌ی زمان موردنیاز برای انجام فعالیت h.

$T\max_h$: بیشینه‌ی زمان موردقبول برای انجام فعالیت h.

M: سقف بودجه‌ی دردسترس برای تولید محصول خلاق.

B: کمینه‌ی امتیاز کیفیت موردقبول برای عوامل تولید.

R: کمینه‌ی امتیاز کیفیت موردقبول برای تجهیزات تولید.

K_h: هزینه‌ی ثابت روزانه‌ی انجام فعالیت h.

L_{he}: هزینه‌ی بهره‌برداری از تجهیز e برای فعالیت h، که خود شامل دو بخش به این شرح است:

- G_{he}: هزینه‌ی ثابت استفاده از تجهیز e برای فعالیت h.
- هزینه‌ی متغیر وابسته به زمان اجرای فعالیت h با تجهیز e.

بنابراین، تابع محاسبه‌ی هزینه‌ی استفاده از تجهیز e برای انجام فعالیت h مطابق رابطه‌ی ۱ خواهد بود:

$$L_{he}=G_{he}+\beta_e T_h \qquad (1)$$

که در آن، β نماد ضریب وابسته‌ساز هزینه به زمان (نرخ هزینه‌ی روزانه‌ی استفاده از هر تجهیز) است، که برای هر یک از تجهیزها به‌صورت اختصاصی وجود دارد و به مدل داده می‌شود. شایان ذکر است چون مدل اخیر در مرحله‌ی پیش از آغاز تولید محصول خلاق اجرا می‌شود، تأخیرهای احتمالی در انجام فعالیت‌ها را نمی‌تواند در نظر بگیرد، چون تأخیرهای احتمالی مذکور در عمل و حین تولید ایجاد می‌شوند.

- C_{hj}: دستمزد فرد j برای فعالیت h، که شامل این سه بخش است:
- O_{hj}: هزینه‌ی ثابت انجام فعالیت h توسط فرد j.
- هزینه‌ی وابسته به زمان انجام فعالیت h توسط فرد j.
- هزینه‌ی کاهش زمان انجام فعالیت.

بنابراین، تابع محاسبه‌ی هزینه‌ی دستمزد فرد j برای انجام فعالیت h به صورت رابطه‌ی ۲ خواهد بود:

$$C_{hj}=O_{hj}+\alpha_j T_h+\delta_j\left(1/T_h\right) \qquad (2)$$

که در آن، α نماد ضریب وابسته‌ساز هزینه به زمان (نرخ هزینه‌ی روزانه‌ی استفاده از هر عامل تولید) است، که برای هر یک از عوامل تولید به‌صورت اختصاصی وجود دارد و به مدل داده می‌شود. هزینه‌ی اخیر، یک بخش سومی هم دارد، که هزینه‌های کاهش زمان انجام فعالیت را محاسبه می‌کند. چنانچه ملاحظه می‌شود، کاهش زمان انجام فعالیت‌ها برای تهیه‌کننده‌ی محصول خلاق مطلوب است؛ اما کاهش زمان ذکرشده، مستلزم افزایش هزینه‌های فعالیت است (ضریب δ)، که برای هر عامل تولید به‌صورت اختصاصی در نظر گرفته می‌شود. ضریب δ، معکوس زمان انجام فعالیت را به هزینه وابسته می‌سازد. در واقع، با کاهش زمان انجام فعالیت، این بخش از تابع هزینه افزایش می‌یابد، تا محاسبه‌ی افزایش هزینه‌ها را در صورت کاهش زمان انجام دهد. این تذکر لازم است که چون مدل مذکور در مرحله‌ی پیش از آغاز تولید محصول خلاق اجرا می‌شود، تأخیرهای احتمالی در انجام فعالیت‌ها را نمی‌تواند در نظر بگیرد؛ زیرا آن‌ها، در عمل و در حین تولید ایجاد می‌شوند.

۴.۲.۴. تابع هدف

در مدل پیشنهادی، سه تابع هدف به این شرح دارد:

۱) کمینه‌سازی هزینه‌های تولید محصول خلاق.

۲) بیشینه‌سازی کیفیت (مجموع امتیازهای کیفیت) تولید محصول خلاق.

۳) بیشینه‌سازی میزان تعامل و همکاری عوامل (W).

۵.۲.۴. محدودیت‌ها

- بودجه‌ی دردسترس برای تولید محصول خلاق.
- احتمال پذیرش توسط هر یک از عوامل تولید.
- زمان انجام هر یک از فعالیت‌ها.

۳.۴. شمای مدل

۱.۳.۴. تابع هدف‌ها (رابطه‌های ۳ الی ۵):

$$Min\begin{pmatrix}\sum_h\sum_j\left(C_{hj}*X_{hj}\right)\\+\sum_h\sum_e\left(L_{he}*Y_{he}\right)+\\\sum_j\left(T_h*K_h\right)\end{pmatrix} \qquad (3)$$

$$Max\begin{pmatrix}\sum_h D_h*\sum_j\left(B_{hj}*X_{hj}\right)\\+\sum_h\sum_e\left(R_{he}*Y_{he}\right)\end{pmatrix} \qquad (4)$$

$$Max \sum_j \sum_i \left(W_{ji} * X_{hj} * X_{ij} \right) \quad \forall h \tag{5}$$

۴.۳.۲. محدودیت‌ها (رابطه‌های ۶ الی ۱۱):

$$\sum_j \left(\sum_h \left(C_{hj} * X_{hj} \right) \right) + \sum_e \left(\sum_h \left(L_{he} * Y_{he} \right) \right) \le M \tag{6}$$

$$T\min_h \le T_h \quad \forall h \tag{7}$$

$$T_h \le T\max_h \quad \forall h \tag{8}$$

$$\sum_j X_{hj} = 1 \quad \forall h \tag{9}$$

$$\sum_h \sum_j \left(B_{hj} * D_h \right) * X_{hj} \ge B \tag{10}$$

$$\sum_h \sum_e \left(R_{he} * Y_{he} \right) \ge R \tag{11}$$

رابطه‌ی ۶، محدودیت بودجه است، که تضمین می‌کند مجموع هزینه‌ی صرف‌شده برای به‌کارگیری عوامل و تجهیزات تولید از سقف بودجه‌ی در دسترس بیشتر نشود.

رابطه‌های ۷ و ۸ تضمین می‌کنند که زمان انجام فعالیت h از کمینه‌ی زمان تعیین‌شده در پارامترها بیشتر و از بیشینه‌ی زمان تعیین‌شده در پارامترها کمتر باشد.

رابطه‌ی ۹ تضمین می‌کند که برای هر فعالیت h فقط و فقط یک عامل تولید j تخصیص داده شود و یک فعالیت به دو عامل تولید تخصیص داده نشود.

رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ نیز تضمین می‌کنند که مجموع امتیاز کیفیت عوامل تولید و تجهیزات تولید از کمینه‌ی تعیین‌شده در پارامترها بیشتر باشد.

۴.۴. زیرمدل ۱: تعیین امتیاز B_{hj} برای عوامل تولید محصول خلاق

زیرمدل ۱ به «تعیین امتیاز کیفیت» برای عوامل تولید محصول خلاق اختصاص دارد. چهار عامل مستقیماً در کیفیت فعالیت یک عامل تولید اثرگذار هستند، که در جدول ۱ ارائه شده‌اند. برای یافتن شاخص‌های مؤثر در کیفیت فعالیت یک عامل تولید محصول خلاق، نخست مرور ادبیات روی نوشتارهای مختلف صورت گرفته و سپس طی گفتگو با جمعی از متخصصان و خبرگان صنایع خلاق، عوامل مؤثر در کیفیت، احصا و دسته‌بندی شده‌اند. در ادامه، شاخص‌ها و روابط میان آن‌ها معرفی شده‌اند.

۴.۴.۱. تعداد کاندیداتوری در جشنواره‌ها و جوایز تخصصی

با توجه به اینکه در اهدای جوایز جشنواره‌های هنری، گاهی سلائق سیاسی و دیدگاه‌های غیرفنی دخیل می‌شوند، براساس مشورتی که با خبرگان صنعت صورت گرفته است، به جای تعداد جوایز، به تعداد کاندیداتوری‌های یک محصول خلاق در جشنواره‌ها و جوایز تخصصی توجه شده است. با توجه به سطح و اهمیت جشنواره‌ها و جوایز مختلف، معیار اخیر خود به دو زیرمعیار دسته‌بندی شده است:

- **جشنواره‌های درجه‌ی یک (F۱۱)**

جدول ۱. عوامل مؤثر در امتیاز کیفیت عامل تولید.

Subheading	Title	ID
First-class festivals F11	Number of nominations in festivals and specialized awards	F1
Other festivals F12 –	Sales statistics of previous products in the market	F2
	Opinions of industry experts (critics)	F3
	Opinions of the public (audience)	F4

(F۱). با توجه به گستره‌ی جغرافیایی پژوهش حاضر و با توجه به اهمیت جشنواره‌ها و جوایز، فهرستی از جشنواره‌ها و جوایز برتر و مهم براساس صنعت استفاده‌شده باید مشخص شود. با توجه به گستره‌ی جغرافیایی پژوهش حاضر (سینمای ایران) فهرست جشنواره‌های درجه‌ی یک به این شرح است: جشنواره‌ی فیلم فجر، جشنواره‌ی فیلم کوتاه تهران، جشنواره‌ی سینما حقیقت، جشنواره‌ی فیلم برلین، جشنواره‌ی فیلم ونیز، جشنواره‌ی فیلم کن، جوایز اسکار، گلدن‌گلوب، و بفتا.

- **جشنواره‌های درجه‌ی دو (F۱۲)**: سایر جشنواره‌ها.

– آمار فروش محصول‌های قبلی (F۲)

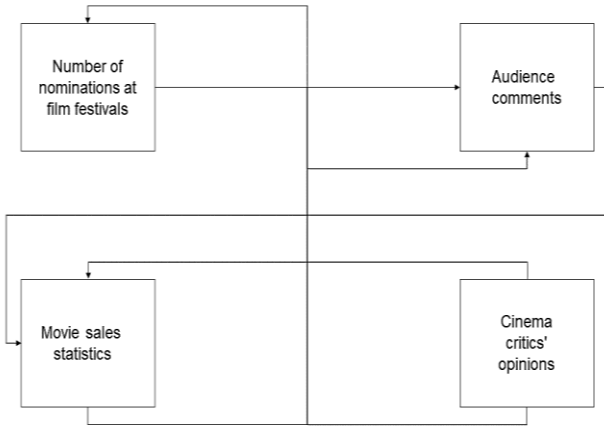
براساس شاخص کنونی، هر چه آمار و میزان فروش محصول‌های قبلی یک عامل تولید بالاتر باشد، به معنای امتیاز کیفیت بالاتر برای آن عامل تولید است. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به نوسان‌های ارزش پول، استفاده از شاخص «فروش محصول‌ها» نمی‌تواند گویا باشد. چرا که برای مثال، یک میلیارد تومان فروش یک محصول در سال ۱۳۸۸ (با قیمت واحد ۲۰۰۰ تومان)، معادل استقبال ۵۰۰ هزار مخاطب از یک محصول خلاق است و همین میزان فروش محصول در سال ۱۴۰۲ (با قیمت واحد ۵۰ هزارتومان)، معادل استقبال ۲۰ هزار مخاطب از یک محصول خلاق است. بنابراین، هدف از آمار فروش در پژوهش حاضر، «تعداد مخاطبان محصول‌های قبلی» است، که با تقسیم مجموع فروش یک محصول خلاق بر قیمت واحد در سال عرضه‌ی آن محصول حاصل می‌شود. بنابراین، در شاخص حاضر، آمار ریالی فروش محصول‌های خلاق به «تعداد مشتریان و مخاطبان» تبدیل می‌شود و به تعبیری واحد پول در محاسبه‌ی فروش یک محصول خلاق، تعداد مشتری خواهد بود.

– نظرهای خبرگان صنعت (منتقدان) (F۳)

اگر هر یک از عرصه‌های صنایع خلاق، یک صنعت در نظر گرفته شود؛ منتقدان را می‌توان خبرگان صنعت مذکور در نظر گرفت، که نظرهای آن‌ها (خبرگان صنعت)، تأثیری مستقیم در امتیاز کیفیت خواهد داشت، که باید احصا و تعیین شوند.

– نظرهای مردم (مخاطبان) (F۴)

با رشد و گسترش شبکه‌های اجتماعی، امکان رهگیری نظرها و دیدگاه‌های مخاطبان درباره‌ی محصولات خلاق راحت‌تر از گذشته است و این موضوع را هم می‌توان به‌عنوان یک عامل در تعیین امتیاز کیفیت در نظر گرفت.



شکل ۱. عوامل مؤثر در امتیاز کیفیت عامل تولید و روابط آن‌ها.

بنابر توضیحات اخیر، نمودار عوامل مؤثر در «امتیاز کیفیت» به صورت شکل ۱ خواهد بود.

۴.۴. ۲. محاسبه‌ی امتیاز «تعداد کاندیداتوری در جشنواره‌های تخصصی»

برای رسیدن به مدل محاسبه‌ی امتیاز یک عامل تولید در شاخص «تعداد کاندیداتوری در جشنواره‌های تخصصی» از یک مدل امتیازدهی قراردادی استفاده شده است. براساس مدل مذکور، هر نوبت کاندیداتوری یک عامل تولید محصول خلاق در یکی از جشنواره‌های سطح یک، ۲۰ امتیاز و هر نوبت کاندیداتوری یک عامل تولید محصول خلاق در یکی از جشنواره‌های سطح دو، ۱۰ امتیاز خواهد داشت. با جمع امتیازها، درنهایت امتیاز هر عامل تولید برای بخش کنونی به‌دست می‌آید.

۴.۴. ۳. محاسبه‌ی امتیاز «آمار فروش محصول‌ها»

در بخش حاضر نیز فرایند محاسبه، مشابه شاخص اول صورت گرفته است. پس از تبدیل «رقم فروش فیلم‌ها» به «تعداد تماشاگر» (با استفاده از تقسیم آمار فروش کل به قیمت واحد در سال عرضه‌ی محصول)؛ به ازاء هر ده هزار مخاطب محصول قبلی، یک امتیاز به عامل تولید اضافه می‌شود و با جمع کل امتیازهای ذکرشده، امتیاز عامل تولید در شاخص کنونی به‌دست می‌آید. برای مثال، اگر مجموع محصول‌های قبلی یک عامل تولید ۲ میلیون تماشاگر در سینما داشته است، ۲۰۰ امتیاز در بخش حاضر به آن تعلق می‌گیرد.

۴.۴. ۴. محاسبه‌ی امتیاز «نظرهای خبرگان صنعت»

برای محاسبه‌ی امتیاز نظرهای خبرگان صنعت، نخست باید یک «پایگاه داده» شامل اطلاعات مربوط به نظرهای خبرگان صنعت درباره‌ی فعالیت‌های فیلمسازان طراحی شود و پس از طراحی پایگاه داده‌ی مذکور، «نسبت نظرهای مثبت به فعالیت‌های یک عامل تولید محصول خلاق به کل نظرهای مطرح‌شده توسط منتقدان درباره‌ی عملکرد آن عامل تولید» شکل خواهد گرفت، که «شاخص مثبت منتقدان» نامیده می‌شود و عددی بین ۰ و ۱ خواهد بود و امتیاز آن با ضرب عدد حاصل در ۱۰۰ محاسبه می‌شود. برای مثال، اگر ۷۰٪ نظرهای خبرگان صنعت درباره‌ی فعالیت‌های یک عامل تولید در پایگاه داده، مثبت ارزیابی شود، امتیاز کل آن عامل تولید از بخش کنونی مساوی ۷۰ خواهد شد.

۴.۴. ۵. محاسبه‌ی امتیاز «نظرهای مخاطبان»

برای شاخص کنونی نیز مشابه شاخص قبل لازم است که یک پایگاه داده از نظرهای مخاطبان شکل بگیرد؛ که پس از طراحی آن، «نسبت نظرهای مثبت به فعالیت‌های یک عامل تولید محصول خلاق به کل نظرهای مطرح‌شده توسط مخاطبان درباره‌ی عملکرد آن عامل تولید» شکل خواهد گرفت، که «شاخص مثبت مخاطبان» نامیده می‌شود و عددی بین ۰ و ۱ خواهد بود و امتیاز عامل تولید از شاخص حاضر با نسبت حاصل، ضرب در ۱۰۰ به‌دست می‌آید. برای مثال، اگر ۶۰٪ مجموع نظرهای مخاطبان درباره‌ی عملکرد عامل تولید مثبت باشد، امتیاز ۶۰ از بخش حاضر برای عامل تولید حاصل می‌شود.

۴.۴. ۶. محاسبه‌ی مجموع امتیاز کیفیت (B_{hj})

پس از محاسبه‌ی امتیاز هر عامل تولید در هر یک از شاخص‌های چهارگانه، با استفاده از ضرایب حاصل از روش DANP[12] عدد نهایی شاخص B_{hj} محاسبه و وارد پایگاه داده‌ی اصلی مدل می‌شود. با انجام محاسبات به کمک روش DANP در قالب نرم‌افزار اکسل[13]، ضریب اهمیت هر یک از عوامل مؤثر در امتیاز کیفیت در محاسبه‌ی امتیاز کیفیت مشخص می‌شود.

برای مثال، اگر عامل تولید j در سابقه‌ی انجام فعالیت h برای تولید محصول خلاق موفق به کسب ۵ کاندیداتوری در جشنواره‌های درجه‌ی یک تخصصی و ۲ کاندیداتوری در جشنواره‌های درجه‌ی ۲ تخصصی شده باشد، امتیاز F۱ برای آن به این روش محاسبه می‌شود:

$$F1(h,j) = 5*20 + 2*10 = 120$$

اگر همین عامل تولید j در سابقه‌ی انجام فعالیت h موفق به کسب ۵۰۰ هزار مخاطب شده باشد، امتیاز F۲ برای آن به این روش محاسبه می‌شود:

$$F2(h,j) = 50000/10000 = 50$$

اگر بر اساس بررسی داده‌های موجود مشخص شود که برای عامل تولید j در انجام فعالیت h میزان ۷۰٪ از نظرهای منتقدان (خبرگان صنعت) مثبت است، امتیاز F۳ برای آن به این روش محاسبه می‌شود:

$$F3(h,j) = 0.7*100 = 70$$

و درنهایت، اگر براساس بررسی داده‌های موجود مشخص شود که برای عامل تولید j در انجام فعالیت h میزان ۵۰ ٪ از نظرات مخاطبان مثبت است، امتیاز F۴ برای آن به این روش محاسبه می‌شود:

$$F4(h,j) = 0.5*100 = 50$$

از سوی دیگر، با انجام محاسبات روش DANP در نرم‌افزار اکسل، اگر برای چهار عامل مؤثر اخیر در امتیاز کیفیت، ضرایب اهمیت به ترتیب: ۰/۲، ۰/۳، ۰/۲، و ۰/۲ حاصل شود، امتیاز کیفیت عامل تولید j برای فعالیت h با مجموع حاصل‌ضرب هر امتیاز کیفیت در ضریب آن محاسبه می‌شود. با همین روش و با توسعه‌ی محاسبه‌های روی پایگاه داده در اکسل، امتیاز کیفیت هر عامل تولید برای هر فعالیت در مراحل تولید محصول خلاق قابل محاسبه است.

۴.۵. زیرمدل ۲: تعیین امتیاز R_{he} برای تجهیزات استفاده‌شده

از میان چهار شاخصی که برای تعیین امتیاز کیفیت یک عامل تولید محصول خلاق در نظر گرفته شده است، سه عامل «کاندیداتوری در جشنواره‌ها و جایزه‌های تخصصی»، «آمار فروش محصول‌های قبلی» و «نظرهای مخاطبان»

[12] DEMATEL+ANP

[13] Excel

اساساً برای تجهیزات تولید فیلم سینمایی قابل احصا نیستند. بر همین اساس، برای تعیین امتیاز کیفیت تجهیزات تولید محصول خلاق فقط رجوع به «نظرهای متخصصان» ممکن به نظر می‌رسد و امتیاز کیفیت مربوط به هر یک از تجهیزات اصلی تولید محصول خلاق بر پایه‌ی نظرهای متخصصی و خبرگان صنعت به‌دست خواهد آمد. بر این اساس در زیرمدل ۲، نظرخواهی از خبرگان صنعت مبنای تعیین امتیاز کیفیت برای تجهیزات تولید محصول خلاق بوده است. در چارچوب ذکرشده، برای هر یک از تجهیزات اصلی تولید محصول خلاق از سه نفر از خبرگان و متخصصان آن صنعت نظرخواهی صورت گرفته و از آن‌ها خواسته شده است به هر یک از تجهیزات از منظر کیفیت و کارآیی، نمره‌ای از ۱ تا ۱۰ بدهند. سپس با میانگین‌گیری از سه نمره‌ی اخیر، امتیاز کیفیت آن تجهیز به‌دست آمده و وارد جدول امتیازات شده است. بر این اساس، اگر برای عامل تولید e در انجام فعالیت h سه خبره‌ی صنعت به ترتیب امتیازهای ۴، ۶، و ۵ ارائه دهند، امتیاز کیفیت عامل تولید e برای انجام فعالیت h به این شرح محاسبه می‌شود:

$$R(h,e)=Average(4,6,5)=5$$

۶.۴. زیرمدل ۳: تعیین مقدار W_{ij} برای عوامل تولید

پارامتر w ، مشخص‌کننده‌ی میزان تعامل و همکاری میان دو عامل تولید است و مقداری بین ۰ و ۱ را می‌گیرد. هر چه مقدار w بیشتر باشد، به معنی میزان تعامل و همکاری بیشتر میان دو عامل تولید است. با توجه به اینکه مدل حاضر در پی مدیریت کیفیت و ارتقاء کیفیت محصول‌های خلاق است، عوامل مؤثر در w با الهام از همان عوامل مؤثر در امتیاز کیفیت یک محصول خلاق به این شرح شکل می‌گیرند:

- تعداد پروژه‌های مشترک عامل‌های تولید i و j در گذشته.
- تعداد کاندیداتوری‌های پروژه‌های مشترک عامل‌های تولید i و j در جشنواره‌ها و جوایز تخصصی.
- مقدار فروش (میزان مخاطب) پروژه‌های مشترک عامل‌های تولید i و j در گذشته.
- زمان آخرین همکاری مشترک عامل‌های تولید i و j.

فرض شده است که در کل m عامل تولید دردسترس برای تولید محصول خلاق وجود دارد. بر این اساس و برای به‌دست‌آوردن داده‌های مربوط به هر یک از عوامل ذکرشده، جدول $m\times m$ تشکیل می‌شود، که خانه‌های آن، اعداد مربوط به داده‌های متناظر با عامل‌های تولید i و j را در خود جای می‌دهد. شیوه‌ی محاسبه‌ی اعداد هر یک از ۴ جدول مذکور به‌صورت جداگانه فرمول‌بندی می‌شود. در انتها، نیز براساس یک فرمول مشخص، مقدار W_{ij} برای تک‌تک عوامل تولید مشخص می‌شود، که چارچوب محاسباتی آن در ادامه تشریح شده است. بنابراین، در گام نخست از زیرمدل ۳، باید ۴ جدول ذکرشده با الهام از روش محاسبه‌ی مرتبط در زیرمدل ۱ مشخص شوند.

با فرض وجود m عامل تولید در دسترس برای تولید یک محصول خلاق، ماتریس M۱ جدول $m\times m$ خواهد بود، که هر یک از خانه‌های آن، تعداد پروژه‌های مشترک دو عامل تولید i و j تاکنون را نشان می‌دهد. بنابراین، $M1_{ij}$ تعداد پروژه‌های مشترک عامل‌های تولید i و j تاکنون است.

با فرض وجود m عامل تولید دردسترس برای تولید یک محصول خلاق، ماتریس M۲ یک جدول $m\times m$ خواهد بود، که که هر یک از خانه‌های آن، تعداد کاندیداتوری پروژه‌های مشترک دو عامل تولید i و j در جشنواره‌های تخصصی تاکنون را نشان می‌دهند. در واقع، $M2_{ij}$ تعداد کاندیداتوری پروژه‌های مشترک عامل‌های تولید i و j در جشنواره‌های تخصصی تاکنون است.

با فرض وجود m عامل تولید دردسترس برای تولید یک محصول خلاق، ماتریس M۳ یک جدول $m\times m$ خواهد بود، که هر یک از خانه‌های آن، مجموع میزان فروش (بر حسب تعداد مخاطب) پروژه‌های مشترک دو عامل تولید i و j تاکنون را نشان می‌دهد. در واقع، $M3_{ij}$ مجموع میزان فروش (تعداد مخاطب) پروژه‌های مشترک عامل‌های تولید i و عام j تاکنون است.

یکی از نکات مهم در طراحی پارامتر w، درنظرگرفتن عنصر «زمان» است. با توجه به اینکه در تعیین میزان موفقیت یک همکاری مشترک جدید میان دو عامل تولید، «زمان» نیز حائز اهمیت است؛ باید با درنظرگرفتن نکته‌ی ذکرشده، محاسبه‌ی پارامتر w را انجام داد. با فرض وجود m عامل تولید در دسترس برای تولید یک محصول خلاق، ماتریس M۴ یک جدول $m\times m$ خواهد بود، که که هریک از خانه‌های آن، زمان آخرین همکاری مشترک دو عامل تولید را نمایش می‌دهد. در واقع، $M4_{ij}$ سال آخرین همکاری مشترک عامل‌های تولید i و j تاکنون است.

۱.۶.۴. روش محاسبه‌ی W_{ij}

– نرمال‌سازی ماتریس‌های ۲ و ۳

با توجه به تفاوت مقیاس اعدادی که در دو ماتریس ۲ و ۳ ثبت شده‌اند، لازم است به‌منظور هم‌مقیاس‌شدن آن‌ها، دو ماتریس اخیر نرمال شوند، که به‌صورت روابط ۱۲ و ۱۳ انجام می‌شود:

$$M2n_{ij}=M2_{ij}/Max\left(M2_{ij}\right) \qquad (12)$$

$$M3n_{ij}=M3_{ij}/Max\left(M3_{ij}\right) \qquad (13)$$

در واقع، با تقسیم هر درایه از ماتریس‌های ۲ و ۳ به مقدار بیشینه‌ی موجود در هر ماتریس، درایه‌های آن ماتریس نرمال و به عددی بین ۰ و ۱ تبدیل می‌شود.

– فرمول محاسبه: که به صورت رابطه‌ی ۱۴ است:

$$W_{ij}=\begin{pmatrix} x2*\left(M2n_{ij}/M1_{ij}\right) \\ +x3*\left(M3n_{ij}/M1_{ij}\right)\end{pmatrix}*K \qquad (14)$$

که در آن، x۲ و x۳ ضرایب اهمیت هر یک از دو عامل «تعداد کاندیداتوری محصول‌های مشترک در جشنواره‌های تخصصی» و «میزان مخاطب محصول‌های مشترک» هستند، که در «میانگین» امتیاز ماتریس‌های ۲ و ۳ ضرب می‌شوند. در واقع، امتیازهای حاصل از ماتریس‌های ۲ و ۳ بر تعداد پروژه‌های مشترک تقسیم می‌شود، تا میانگین امتیازی براساس تعداد پروژه‌های مشترک تعیین شود. درنهایت، هم کل فرمول در ضریب مرتبط با زمان آخرین پروژه مشترک ضرب می‌شود، تا اثر همکاری‌های جدیدتر در فرمول بیشتر شود.

– محاسبه‌ی ضریب‌های X۲ و X۳

جمع ضریب‌های x۲ و x۳ باید برابر با ۱ شود؛ که برای محاسبه‌ی آن‌ها از روش DANP استفاده می‌شود و عدد آن‌ها به‌دست می‌آید.

جدول ۲. محاسبه‌ی ضریب K.

K	Time elapsed since last collaboration
1	0 to 3
0.8	4 to 6
0.6	7 to 11
0.5	11 and up

- محاسبه‌ی ضریب K

ضریب K، عددی است که اثر «مدت زمان گذشته از آخرین همکاری مشترک دو عامل تولید i و j» را به فرمول محاسبه‌ی w وارد می‌کند و براساس جدول ۲ به‌صورت ابتکاری محاسبه و اعمال می‌شود.

در برخی از موارد ممکن است دو عامل تولید i و j، سابقه‌ی همکاری مشترک با یکدیگر را نداشته باشند. در چنین مواردی با استفاده از «عدد تصادفی»، مقدار W_{ij} مشخص می‌شود. عدد تصادفی با استفاده از تابع rand و بین ۰ و ۱ انتخاب می‌شود.

۷.۴. کاربست مدل در صنعت سینما

مدل طراحی‌شده برای مدیریت کیفیت داده‌محور در صنایع خلاق، برای اعتبارسنجی باید به صورت عینی و عملی در یکی از زیرمجموعه‌های صنایع خلاق پیاده‌سازی شود. بر همین اساس، مدل پیشنهادی برای کاربست در صنعت سینما بازنویسی و با استفاده از نرم‌افزار متلب[۱۴] کدنویسی شده است، تا نتایج آن بررسی شود. مدل ارائه‌شده در پژوهش حاضر، در قالب یک مدل برای «انتخاب ترکیب بهینه‌ی عوامل تولید یک فیلم سینمایی» پیاده‌سازی شده و برای پیاده‌سازی آن در نرم‌افزار متلب، ابتدا داده‌های ورودی که شامل پارامترهای مدل هستند، در یک فایل اکسل ذخیره شده‌اند، تا مدل مذکور، داده‌های ورودی خود را از فایل اکسل دریافت کند. شایان ذکر است امتیازهای B_{hj}، R_{he}، و W_{ij} که محاسبات مربوط به آن‌ها در نرم‌افزار اکسل انجام‌پذیر است؛ از طریق فایل اکسل به مدل وارد شده‌اند. پس از ورود داده‌ها از طریق فایل اکسل، نرم‌افزار متلب (نسخه‌ی R2016b) با استفاده از «الگوریتم ژنتیک» اقدام به حل مسئله و رسیدن به پاسخ می‌کند. مدل طراحی‌شده برای پژوهش حاضر با ۱۰۰۰ نوبت اجرای الگوریتم ژنتیک، یک پاسخ بهینه برای مسئله‌ی بهینه‌سازی ارائه می‌کند. همچنین با توجه به سه هدفه‌بودن مدل پیشنهادی، کد متلب یک تابع هدف شامل حاصل جمع دو تابعی که باید بیشینه شوند منهای تابعی که باید کمینه شود، ایجاد می‌کند تا با بیشینه‌سازی تابع هدف مذکور، عملاً هر سه هدف مدنظر مدل محقق شود.

با توجه به تعداد بالای داده‌های ورودی موردنیاز برای پیاده‌سازی مدل، مراحل اجرای کد در نرم‌افزار متلب با این گام‌ها طراحی و اجرا شده‌اند:

۱. کدنویسی «تولید یک فایل اکسل با داده‌های تصادفی»

در بخش حاضر، پس از اجرای کد در نرم‌افزار متلب، تعداد اعضاء هر یک از سه مجموعه‌ی H، J، و E از کاربر پرسیده شده است. سپس، براساس داده‌های ورودی، یک فایل اکسل شامل تمام داده‌های مورد نیاز برای ورود به مدل با استفاده از اعداد تصادفی تولید می‌شود و کاربر می‌تواند با تغییر داده‌های موجود در فایل مذکور با استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی و افزودن

Enter the number of production factors (J): 15 Enter the number of equipment types (E): 15 Excel file with random data has been created. Best solution found:

Optimal factor selection (Xhj):

```
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0
1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Optimal equipment selection (Xhe):

```
1 1 1 0 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 0
1 0 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0
0 1 1 1 1 0 0 0 1 1 0 1 1 0 0
0 1 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 1
1 0 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0
0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 0 0 1 1 0
0 1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 0 1 0
0 0 0 1 0 1 0 0 0 1 1 0 0 0 0
1 0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 1 0 0 1
0 1 1 1 0 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1
```

شکل ۲. نمونه‌ی خروجی مدل پیشنهادی، شامل: جدول تخصیص عوامل و تجهیزات تولید به فعالیت‌ها.

```
Optimal activity times (Th)
    53
   109
    90
    48
    58
    71
    80
    32
    74
    77

Total Cost: 114917
Quality Score: 148.9071
Interaction Score: 5.0618
```

شکل ۳. نمونه‌ی خروجی مدل پیشنهادی، شامل مقادیر بهینه‌ی سه تابع هدف.

فرمول‌های محاسباتی مربوط به تولید پارامترهای مدل پیشنهادی، مطابق آنچه در زیرمدل‌ها ارائه شده است، داده‌های موردنظر خود را به مدل وارد کند.

۲. کدنویسی اجرای مدل با داده‌های ورودی از فایل اکسل

مدل طراحی‌شده در پژوهش حاضر به‌صورت کامل و با استفاده از الگوریتم ژنتیک با ۱۰۰۰ مرتبه تکرار، در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شده است. داده‌های ورودی به مدل پیشنهادی از فایل اکسل تولیدشده توسط کد به مدل وارد می‌شوند و خروجی نهایی آن، یک مقدار بهینه (براساس الگوریتم ژنتیک) برای متغیرها خواهد بود، که در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود.

مدل پیشنهادی، ابتدا اعضاء سه مجموعه‌ی H، J ، و E را از کاربر دریافت می‌کند و براساس ورودی‌های اخیر، یک فایل اکسل شامل داده‌های ورودی موردنیاز مدل را (با استفاده از اعداد تصادفی) می‌سازد. داده‌های فایل اکسل ذکرشده توسط کاربر مدل تغییرپذیر هستند و با افزودن فرمول‌های محاسباتی مربوط به سه زیرمدل مدل کنونی، محاسبات مربوط به پارامترها انجام و اعداد مرتبط با آن‌ها تولید می‌شوند. سپس فایل اکسل اخیر به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته می‌شود و مقادیر بهینه برای متغیرها را براساس مدل محاسبه و نیز مقادیر بهینه‌ی تابع هدف را ارائه می‌کند. در مثال حل‌شده، ابتدا تعداد اعضاء مجموعه‌ی H مساوی ۱۰، تعداد اعضاء مجموعه‌ی J مساوی ۱۵، و تعداد

[14] MATLAB

اعضاء مجموعه‌ی E نیز مساوی ۱۵ به‌عنوان مقادیر ورودی به مدل داده شده است. سپس مدل فایل اکسل مربوط به پارامترها براساس سه مقدار ذکرشده‌ی ورودی و با استفاده از روش‌های تولید، عدد تصادفی را تولید کرده است. در ادامه، با انجام محاسبات برپایه‌ی روش‌های محاسباتی ارائه‌شده در زیرمدل‌ها، مقادیر نهایی پارامترها حاصل شده است. در مرحله‌ی بعد، همان فایل اکسل به‌عنوان ورودی به مدل ارائه شده و محاسبات براساس مقادیر تابع هدف و محدودیت‌های مدل صورت پذیرفته است، و درنهایت، خروجی‌های مدل به‌دست آمده است.

چنانکه در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مدل در قالب حل یک مسئله‌ی تخصیص، ترکیب بهینه‌ی عوامل تولید، و همچنین تجهیزات تولید را برای تولید فیلم سینمایی براساس داده‌های ارائه‌شده تنظیم می‌کند و خروجی می‌دهد. در شکل ۲، دو جدول به‌عنوان خروجی ارائه شده است، که در جدول بالا، هر سطر نشانگر یک فعالیت اصلی در تولید فیلم سینمایی (اعضاء مجموعه‌ی H) است و هر ستون، نشان‌دهنده‌ی یکی از عوامل دردسترس (اعضاء مجموعه‌ی J) برای تولید و عدد ۱ به‌معنای تخصیص عامل تولید j به فعالیت h یا درواقع، همان متغیر X_{hj} است. به همین ترتیب، در جدول پایین شکل ۲ نیز هر سطر نشان‌دهنده‌ی یک فعالیت اصلی در تولید فیلم سینمایی (اعضاء مجموعه‌ی H) است و هر ستون، نشانگر یکی از تجهیزات دردسترس (اعضاء مجموعه‌ی E) برای تولید و عدد ۱ به‌معنای تخصیص عامل تولید j به فعالیت h یا درواقع همان متغیر Y_{he} است. در شکل ۳، نیز مقادیر بهینه‌ی متغیر T_h (زمان بهینه‌ی انجام هر فعالیت h) مشخص شده است؛ همچنین، در انتهای شکل ۳ مقادیر بهینه‌ی سه تابع هدف براساس محاسبات انجام‌شده توسط مدل ارائه شده است.

۱.۷.۴. نتایج حاصل از پیاده‌سازی مدل

با پیاده‌سازی مدل در نرم‌افزار متلب، یک مقدار موجه برای متغیرها براساس الگوریتم ژنتیک به‌دست آمده و براساس داده‌های ارائه‌شده به مدل، یک ترکیب بهینه برای عوامل و تجهیزات تولید فیلم سینمایی ارائه شده است. نکته‌ی مهم درباره‌ی این پیاده‌سازی این است که نشان می‌دهد منطق و چارچوب مدل طراحی‌شده صحیح است و با افزایش داده‌ها (رشد تعداد اعضاء هر یک از سه مجموعه‌ی اصلی) و نیز تغییر داده‌ها (استفاده از پایگاه داده‌ی مرتبط با صنایع خلاق) می‌توان به ترکیب بهینه برای عوامل و تجهیزات تولید یک محصول خلاق با سه هدف افزایش کیفیت، کاهش هزینه، و افزایش تعامل و همکاری میان اعضاء تیم تولید دست یافت.

۵. نتایج پژوهش

پژوهش حاضر در پی «توسعه‌ی مفهومی» مدیریت کیفیت در عرصه‌ی صنایع خلاق است. بر همین اساس با بهره‌مندی از مفهوم «کیفیت ۴» و ذهنیت برخاسته از آن و نیز «داده‌محوری» که یکی از عناصر کلیدی به‌روزرسانی مدیریت کیفیت براساس پارادایم «کیفیت ۴» است، یک چارچوب مفهومی برای «مدیریت کیفیت داده‌محور» در صنایع خلاق ارائه شده است؛ که مبتنی بر «کمّی‌سازی کیفیت» شکل گرفته و در پی ارائه‌ی مدلی برای سنجش و محاسبه‌ی «امتیاز کیفیت» برای عوامل و تجهیزات مؤثر در تولید صنایع خلاق بوده است. امتیاز کیفیت اخیر به‌صورت ابتکاری و در قالب دو پارامتر B (امتیاز کیفیت) و W (پارامتر تعامل و همکاری) متبلور می‌شود. درواقع، دو پارامتر B و W از دو جنبه‌ی مختلف، مسئله‌ی «کیفیت» در تولید محصول خلاق را مدنظر قرار می‌دهند. پارامتر B با مدل مفهومی خاص خود (که در شکل ۱ ارائه شده است)، چهار عامل موثر در کیفیت یک محصول خلاق را مدنظر قرار می‌دهد و پارامتر W نیز با یک روش ابتکاری، میزان تعامل و همکاری دو عامل تولید را می‌سنجد. کنار هم قرارگرفتن دو پارامتر B و W در قالب دو هدف، منجر به «کمّی‌سازی کیفیت» می‌شود و امکان محاسبه و اندازه‌گیری مفهوم «کیفیت» در فرایند تولید یک محصول خلاق را به نمایش می‌گذارد. درواقع، پژوهش حاضر با آغاز از طراحی یک مدل مفهومی برای کیفیت محصول‌های خلاق، با طراحی پارامترهایی برای تعیّن‌بخشیدن به مفاهیم مذکور، آن‌ها را به شکلی قابل‌محاسبه وارد مدل می‌کند. همچنین با افزوده‌شدن تابع مربوط به هزینه، مدل پیشنهادی به یک مدل سه‌هدفه تبدیل می‌شود، که علاوه‌بر مسئله‌ی کیفیت، می‌تواند به کمینه‌سازی هزینه‌های تولید محصول خلاق نیز کمک کند. چارچوب مفهومی و سپس عناصر محاسباتی طراحی‌شده در مدل پیشنهادی به دنبال این است که با ارائه‌ی یک روش ابتکاری برای محاسبه‌ی «امتیاز کیفیت» و نیز یک امتیاز دیگر در قالب «پارامتر میزان تعامل و همکاری میان عوامل تولید»، یک نظرگاه تازه را در امر «مدیریت کیفیت» به فعالان حوزه‌ی صنایع خلاق ارائه دهد. در گام بعد، مدل مفهومی اخیر در قالب یک مسئله‌ی تخصیص و در چارچوب مفاهیم حوزه‌ی «پژوهش در عملیات» با سه تابع هدف پیاده‌سازی و در انتها نیز کاربست آن در یکی از زیرمجموعه‌های صنایع خلاق (صنعت سینما) ارائه شده است.

بر این اساس می‌توان گفت پژوهش حاضر با الهام‌گرفتن از مفاهیم تازه‌ای که در چارچوب مفهومی Quality 4 ارائه شده است، ابتدا به نقش «داده» در مدیریت کیفیت توجه نشان داده و با استفاده از الگوهای داده‌محوری، یک مدل مفهومی برای «مدیریت کیفیت داده‌محور» طرح کرده است. در ادامه، نیز با پیاده‌سازی عملیاتی مدل مفهومی پیشنهادی در قالب یک مدل ریاضی سه‌هدفه، آن را با استفاده از داده‌های قابل‌حصول در صنعت سینما، به صورت عملی پیاده‌سازی کرده است، تا «کمّی‌سازی کیفیت» و خلق یک نگاه عینی و غیرانتزاعی به مفهوم مدیریت کیفیت را محقق سازد.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

صنایع خلاق، یکی از عرصه‌های صنعتی مهم و آینده‌دار است، که به‌دلیل ویژگی‌های ذاتی خود از جمله ارتباط وثیق با حوزه‌ی فرهنگ و هنر، تفاوت‌هایی بنیادین با سایر عرصه‌های صنعتی دارد، که اقتضاهایی خاص به عرصه‌ی صنعتی صنایع خلاص می‌دهد. بر همین اساس، لزوم انجام پژوهش‌هایی که با استفاده از دانش مهندسی صنایع به ارتقاء صنایع خلاق کمک کنند، احساس می‌شود. پژوهش حاضر با استفاده از ابزارهای مدیریت کیفیت، در پی خلق یک مدل مفهومی و سپس یک مدل ریاضی برای «مدیریت کیفیت در صنایع خلاق» بوده و هدفش را از مسیر استفاده از علم داده با استفاده از نتایج برخاسته از مفهوم «کیفیت ۴» دنبال کرده است. سپس با بهره‌برداری از رویکردهای حاصل از «کیفیت ۴» که نگاه‌های سنتی به حوزه‌ی کیفیت را به‌روزرسانی کرده و امکان دیجیتالی‌سازی، مدل‌سازی، و در نهایت کمّی‌سازی مفهوم کیفیت را فراهم ساخته است، به توسعه‌ی مدل پرداخته است. چنانچه در بخش مرور ادبیات تشریح شد، مفهوم «کیفیت ۴» ، یازده محور دارد،[۷] که به بخش قابل‌توجهی از آن‌ها در طراحی مدل پژوهش حاضر توجه شده است. مشخصاً «داده‌محوری» که رکن طراحی مدل ذکرشده‌ی مدیریت کیفیت است، برخاسته از مفاهیم کلیدی «کیفیت ۴» است. علاوه‌بر این، «تجزیه‌و تحلیل» داده‌ها نیز یکی از عناصر مهم در طراحی مدل پژوهش حاضر به شمار می‌رود.

مدل پیشنهادی با استفاده از فن‌آوری‌های نوین، مانند شبکه‌های اجتماعی به شنیدن نظرهای مشتریان (مخاطبان) و توسعه‌محور «همکاری» در میان محورهای «کیفیت ۴» نیز پرداخته است. همچنین نتیجه‌ی پژوهش حاضر را می‌توان به مثابه‌ی «توسعه‌ی یک برنامه‌ی کاربردی» برای مدیریت کیفیت در صنایع خلاق دانست و افزون بر این نکته، رشد و ارتقاء «سیستم‌های مدیریت» نیز از نتایج طراحی مدل پیشنهادی محسوب می‌شود. علاوه‌بر نکات ذکرشده، توسعه‌ی مدل ذکرشده‌ی مدیریت کیفیت برای صنایع خلاق می‌تواند به توسعه‌ی «فرهنگ» مدیریت کیفیت در عرصه‌ی صنعتی مذکور منجر شود؛ و درنهایت، «رهبری» سازمان‌های فعال در این عرصه را ارتقاء دهد. بنابراین، می‌توان گفت مدل پیشنهادی، دست‌کم از ۷ محور از محورهای یازده‌گانه‌ی «کیفیت ۴» بهره می‌برد و می‌تواند نمونه‌ای از به‌کارگیری مفاهیم « Quality 4» در مدیریت کیفیت صنایع خلاق به شمار رود.

یکی از مهم‌ترین چالش‌های صاحبان صنایع خلاق، که تاکنون در میان متخصصان رشته مهندسی صنایع کمتر به آن توجه شده است، چالش «مدیریت کیفیت» است؛ که پیش از هر چیز مستلزم تعریف مفهوم «کیفیت» و سپس مدل‌سازی آن برای صنایع خلاق است. درواقع، باید در گام نخست مشخص می‌شد که منظور دقیق از مفهوم «کیفیت» در صنایع خلاق با ویژگی‌های خاص و منحصربه‌فرد صنایع خلاق چیست و در گام بعد باید این مفهوم با بهره‌گیری از دانش مدیریت کیفیت، به صورت عینی و کاربردی صورت‌بندی می‌شد. پژوهش حاضر با شناسایی چالش مدیریت کیفیت در عرصه‌ی صنایع خلاق کوشید تا با ساختاربخشی به مفاهیم مرتبط با کیفیت در صنایع مذکور، یک مدل مفهومی و سپس یک مدل ریاضی برای «مدیریت کیفیت در صنایع» خلاق ارائه کند. مدل ارائه‌شده با طراحی دو پارامتر «امتیاز کیفیت» و «امتیاز تعامل و همکاری» که به ترتیب با نمادهای B_{hj} و W_{ij} مشخص شده‌اند، امکانی تازه برای کمّی‌سازی مفهوم کیفیت ایجاد کرده است، که مبنای طراحی یک مدل مدیریت کیفیت داده‌محور شده است. درواقع، طراحی دو پارامتر مذکور و نیز شکل‌دهی چارچوب محاسباتی مناسب برای آن‌ها را می‌توان یکی از دستاوردهای کلیدی پژوهش حاضر در بُعد ریاضیاتی ارزیابی کرد. در بُعد مفهومی نیز شناسایی و مدل‌سازی عوامل مؤثر در دو پارامتر امتیاز کیفیت و امتیاز تعامل و همکاری یک دستاورد کلیدی به‌شمار می‌رود، که می‌تواند مبنایی برای نگاه کمّی به مفهوم «کیفیت» در سایر پژوهش‌ها نیز باشد.

براساس نکات پیش‌گفته، پژوهش حاضر با ارائه‌ی یک مدل ریاضی برای مدیریت کیفیت داده‌محور در صنایع خلاق، امکان مدل‌سازی ریاضی برای مفهوم کیفیت را در صنایع خلاق محقق ساخته است، تا با استفاده از ابزارهای کمّی و روش‌های محاسباتی، چشم‌اندازی تازه برای مدیریت کیفیت در صنایع خلاق با استفاده از علم داده ایجاد شود.

مدل کنونی در پژوهش‌های آتی امکان ارتقاء و به‌روزرسانی در این بخش‌ها را دارد:

- طراحی توابع هدف و تغییرات مختلف در محدودیت‌های مدل ریاضی و به‌روزرسانی روش‌های ابتکاری استفاده‌شده برای انجام محاسبات مرتبط با داده‌ها.
- تغییر در مدل‌های مفهومی و به‌روزرسانی «عوامل مؤثر در کیفیت یک محصول خلاق».
- مدل ارائه‌شده در پژوهش حاضر، برای استفاده‌ی پیش از آغاز تولید محصول خلاق مناسب‌سازی شده است. پژوهش‌های آتی می‌توانند امکان به‌روزرسانی مدل در حین مراحل تولید و تغییر نتایج در حین تولید با رویکرد برنامه‌ریزی پویا را در دستور کار قرار دهند.
- استفاده از روش‌های «برنامه‌ریزی آرمانی» به‌منظور دخیل‌کردن اهداف کمّی و محاسباتی سرمایه‌گذار محصول خلاق در محاسبه‌ی تابع هدف نیز می‌تواند یکی از زمینه‌های مناسب برای توسعه‌ی پژوهش حاضر در مطالعات آتی باشد.

References – منابع

1. Jacob, D., Quality 4.0 impact and strategy *handbook: getting digitally connected to transform quality management. LNS* Research: Cambridge, MA, USA, 2017.
2. Escobar, C.A., M.E. McGovern, and R. Morales-Menendez, Quality 4.0: a review of big data challenges in manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021. *32*(8): p. 2319-2334 https://doi.org/10.1007/s10845-021-01765-4
3. Broday, E.E., The evolution of quality: from inspection to quality 4.0. International *Journal of Quality and Service Sciences,* 2022. *14*(3): p. 368-382. https://doi.org/10.1108/IJQSS-09-2021-0121
4. Carvalho, A.V., Enrique, D.V., Chouchene, A., and Charrua-Santos, F.,2021. Quality 4: an overview. *Procedia Computer Science.* 181: p. 341-346. https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.176.
5. UNCTAD, U.,2018. Creative Economy Outlook: Trends in international trade in creative industries. in United Nations *Conference on Trade and Development*. https://unctad.org/publication/creative-economy-outlook-2018
6. Hotho, S. and K. Champion.,2011. Small businesses in the new creative industries: innovation as a people management challenge. *Management Decision*, *49*(1): p. 29-54. https://doi.org/10.1108/00251741111094428

7. Tambare, P., et al., Performance measurement system and quality management in data-driven Industry 4.0: A review. *Sensors*, 2021. *22*(1): p. 224. https://doi.org/10.3390/s22010224

8. Zonnenshain, A. and R.S. Kenett., 2020. Quality 4—the challenging future of quality engineering. *Quality Engineering*,. *32*(4): p. 614-626.

https://doi.org/10.1080/08982112.2019.1706744

9. Tang, Z. and Yu, L.,2021. The configurational influence mechanism of film consumption experience on customer satisfaction. *Journal of Consumer Behaviour*. *20*(1): p. 132-147. https://doi.org/10/1002./cb.1862.

10. Leem, S. Jisong, O. Dayeong, S. and Jihoon, M., 2023. Towards Data-Driven Decision-Making in the Korean Film Industry :An XAI Model for Box Office Analysis Using Dimension Reduction, Clustering, and Classification. *Entropy*, *25*(4): p. 571. https://doi.org/10.3390/e25040571

11. Lash, M.T. and K. Zhao., 2016. Early predictions of movie success: The who, what, and when of profitability. *Journal of Management Information Systems*,. *33*(3): p. 874-903. https://doi.org/10.1080/07421222..2016.1263969

12. Iqbal, N. Ahmad, R. Jamil, F. Kim, D., 2021. Hybrid features prediction model of movie quality using Multi-machine learning techniques for effective business resource planning. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, *40*:(5) p. 9361-9382. https://doi.org/10..3233/JIFS-201844

13. Ahmadreza, T. and Najmeh, Kh.,2013. Designing a problem solving algorithm for organizing production factors in the independent filmmaking method under uncertain conditions. *International Journal of Industrial Engineering and Production Management* .[In Persian]. http://ijiepm.iust.ac.ir/article-1--423-fa.html

14. Hamidia, B. Masteri, M. Sohrabi, M. Rahimi, R., 2022. Designing a model for predicting the sales potential of Iranian movies (data-driven approach) in order to determine the market entry strategy. *Strategic Management Research Quarterly*, *28*(85): p. 43-71 .[In Persian]. https://www.magiran.com/p2510999

15. Ahmed, U. Waqas, H. and Afzal, MT., 2020. Pre-production box-office success quotient forecasting. *Soft Computing, 24:*(9) p. 6635-6653. https://doi.org/10.1007/s00500-019-04303-w

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 93-110

Sharif University of Technology

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



Research Article

Modeling and Solving Dynamic Maximal Covering Location Problem Considering Backup Services; Case Study of a Crisis Event in District 3 of Tehran

Hanieh Sabiza[1], Jafar Bagherinejad[1*] and Roghayyeh Alizadeh[2]

[1]Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering Alzahra University, Tehran, Iran.
[2]Department of Industrial Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.
* corresponding author: (jbagheri@alzahra.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:18 February 2025

Revised:12 May 2025

Accepted:30 June 2025

Keywords:

Backup service,
benders decomposition algorithm,
capacitated modules,
dynamic maximal covering location problem,
MCLP,
modular facilities.

Abstract

In this research, we look at a dynamic maximal covering location problem, where the structure of the service-providing facilities consists of independent units that have the ability to move, and these units are called modules. The main goal of the problem is to provide maximum service to people who are in crisis and need basic help. The model of this problem first determines the location of the facilities, and with the occurrence of each crisis, according to the needs that are created in each demand area, the modules responding to the same needs are sent to the facilities of those areas and are deployed in the location, from which they are moved away after the task of delivering service ends. The innovation in this paper is that the modules may become unavailable for any reason and cannot cover the demand assigned to them. For this reason, modules, in addition to providing main services to demand points, in case of failure of some of these modules and their unavailability, the surrounding modules can cover the demand of points that have been neglected by providing backup service and compensate for this deficiency, where the amount of main and backup demand that each module responds to is determined by the model. The main goal of this research is to assign the maximum amount of main and backup service to people who are in crisis, which is of utmost importance to the livelihood of these people. In this research, we first created a mathematical model of mixed integer linear programming. Afterwards, we conducted a case study on Tehran's third district, where all the factors and parameters related to the model were considered with special attention to the real conditions of the studied area. After introducing the model and parameters related to district three, we solved the model using GAMS software. Furthermore, we implemented Bender's decomposition algorithm as an ultimate solution to the model. Finally, we performed a sensitivity analysis on some parameters of the model. We observed that the changes in the parameters affect the backup service more than the base service.

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:
Sabiza, H., Bagherinejad, J. and Alizadeh, R. 2026. Modeling and solving dynamic maximal covering location problem considering backup services; case study of a crisis event in district 3 of tehran , Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.93-110. https://doi.org/10.24200/j65.2025.65842.2423

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

مدل سازی و حل مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی پویا با درنظرگرفتن خدمت پشتیبان: مطالعه‌ی موردی رخداد بحران در منطقه‌ی سه تهران

هانیه سابی‌زا[۱]، جعفر باقری‌نژاد*[۱] و رقیه عالی‌زاده[۲]

[۱] گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

[۲] گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (jbagheri@alzahra.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۱۱/۳۰

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۰۲/۲۲

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۴/۰۹

واژگان کلیدی:

مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی پویا،

تسهیلات ماژول‌دار،

خدمات پشتیبان،

ماژول‌های ظرفیت‌دار،

الگوریتم تجزیه‌ی بندرز.

چکیده

در پژوهش حاضر به مدل‌سازی و حل مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی پویا پرداخته شده است، که در آن تسهیلات از واحدهای مستقل با قابلیت جابجایی تشکیل شده است، که ماژول نامیده می‌شوند. ماژول‌ها ممکن است به هر دلیلی از دسترس خارج شوند و نتوانند تقاضای انتصاب‌شده به خود را پوشش دهند. لذا هدف اصلی مسئله، تخصیص بیشینه‌ی خدمت به افراد بحران‌زده توسط تسهیلات ماژول‌دار به گونه‌ای است که علاوه‌بر پوشش خدمت پایه، ماژول‌های مستقر در تسهیلات اطراف با ارائه‌ی خدمت پشتیبان بتوانند تقاضای نقاطی که مورد غفلت قرار گرفته‌اند، را پوشش بدهند و این کمبود را جبران کنند. مدل ریاضی از نوع عدد صحیح مختلط بوده و یک مطالعه‌ی موردی بر روی منطقه‌ی سه تهران انجام شده است، که تمامی عوامل و پارامترهای مربوط به آن با توجه ویژه به شرایط واقعی در نظر گرفته شده‌اند. مدل مذکور، ابتدا توسط نرم‌افزار گمز حل و سپس راه‌حلی در غالب الگوریتم تجزیه‌ی بندرز ارائه شده است. درنهایت، نیز بر روی برخی پارامترهای مدل، تحلیل حساسیت صورت گرفته و مشاهده شده است که تغییرات در پارامترها در خدمت پشتیبان تأثیر بیشتری می‌گذارند، تا خدمت پایه و درنظرگرفتن مقدار مناسب برای پارامترها بتوانند در پوشش بیشتر خدمت پشتیبان ماژول‌ها مؤثرتر واقع شوند. بازه‌ی مقادیر خاص مذکور برای پارامترها تحت آزمایش قرار گرفته است.

۱. مقدمه

مکان‌یابی تسهیلات، بیش از یک قرن، موضوعی اساسی در دسته‌ای از پژوهش‌ها بوده است، که نقش تعیین‌کننده‌ای در موفقیت زنجیره‌های تأمین با هدف یافتن مکان مناسب جهت ارائه‌ی محصول‌ها و خدمات داشته و یک مؤلفه‌ی مهم برنامه‌ریزی راهبردی برای طیف گسترده‌ای از شرکت‌های دولتی و خصوصی بوده است. یک مسئله‌ی مشهور مکان‌یابی که از همان ابتدا مطالعه شده است، مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش بوده است. در یک مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش کلاسیک، فرد به دنبال مکان تعدادی از تسهیلات در یک شبکه به گونه‌ای است که جمعیت تحت پوشش، به‌میزان بیشینه برسد؛ یعنی تقاضای پاسخ داده‌شده را با نوع و تعداد چیدمان تسهیلات به میزان بیشینه رساند.[۱] در این نوع مسائل تعدادی مکان کاندید برای تسهیلات در نظر گرفته می‌شود و از بین مکان‌های مذکور، آنجاهایی انتخاب می‌شوند که با توجه به محل بتوانند به بیشترین تقاضا پاسخ دهند و آنجا را پوشش‌دهی کنند. پوشش هر نقطه‌ی تقاضا توسط تسهیلات به واسطه‌ی فاصله‌ی آن دو از یکدیگر تعیین می‌شود؛ یعنی یک تسهیل هر گره، تقاضایی را می‌تواند پوشش دهد که در فاصله‌ای مشخص از محدوده‌ی آن تسهیل ایجاد شود. این آستانه‌ی از پیش تعریف‌شده اغلب شعاع پوشش نامیده می‌شود.[۱]

در گذر زمان و بسته به نوع استفاده در شرایط خاص یا افزودن شرایط واقعی مختلف که بدان پرداخته نشده است، مدل‌های مختلفی از مدل اصلی مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش ایجاد شده است. در برخی فرمولاسیون‌های مکان‌یابی، برای تسهیلات، هیچ‌گونه ظرفیتی در نظر گرفته نمی‌شود؛ با این حال، این فرض از بسیاری جهات مشکل‌ساز است. بیشتر تسهیلات به دلایل فیزیکی، سیاسی، ساختاری، منطقه‌ای، و غیره با محدودیت‌هایی در قابلیت‌های خدماتی، که توانایی ارائه‌شان را دارند، مواجه هستند. رویکرد برجسته برای برخورد با فرض قابلیت‌های خدمات نامحدود، محدودکردن کل خدمات ارائه‌شده توسط هر یک از تسهیلات است، یعنی محدودیت‌های ظرفیت باید به مدل اضافه شوند.[۲]

استناد به این مقاله:

سابی‌زا، هانیه، باقری‌نژاد، جعفر و عالی‌زاده ، رقیه، ۱۴۰۴. مدل سازی و حل مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی پویا با درنظرگرفتن خدمت پشتیبان: مطالعه‌ی موردی رخداد بحران در منطقه‌ی سه تهران. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص.۹۳-۱۱۰. https://doi.org/10.24200/j65.2025.65842.2423

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

گاهی اوقات نیاز است برای اینکه مدل به شرایط واقعی نزدیک‌تر شود، به جای یک دوره در چند دوره، برنامه‌ریزی شود. در کل، موارد و موقعیت هایی وجود دارند که باعث ایجاد نوسان‌هایی در در بازار تقاضا می‌شوند. یکی از مؤثرترین راه‌های ایجاد آمادگی در برابر نوسان‌های تقاضای ایجادشده در بازار این است که افق برنامه‌ریزی به چند دوره تقسیم‌بندی شود. این ساختار چنددوره‌ای مدل کلاسیک، مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی را به یک مدل چنددوره‌ای یا پویا[1] تبدیل می‌کند، که یک شاخه‌ی مهم از این مسائل به حساب می‌آید. برای مسائل پویا باید تعیین کرد که چه زمانی هر یک از تأسیسات باز، بسته یا جابجا شوند.[۳]

تقریباً همه‌ی تسهیلات، که نوع خاصی از خدمات یا محصولات را ارائه می‌دهند، از واحدها و بخش‌های مختلفی تشکیل شده‌اند؛ که آن‌ها را ماژول می‌نامند. ماژول‌ها مجزا از یکدیگرند و مستقل از هم کار می‌کنند. آن‌ها می‌توانند واحدهایی سیار باشند، که در بین تسهیلات مختلف در طول افق برنامه‌ریزی در حرکت و جابجایی هستند. نوع و تعداد ماژول‌هایی که کنار یکدیگر قرار می‌گیرند، پیکربندی هر تسهیل مشغول به کار درون شبکه را تشکیل می‌دهد.[۴] در امکانات و تسهیلات ماژولی، سازه‌های سیار می‌توانند پس از اتمام مأموریت خود به مناطق دیگر منتقل شوند. همان‌طور که گفته شد، در طول افق برنامه‌ریزی در یک شبکه، تقاضای نقاط مختلف به دلایل متعددی می‌تواند تغییر پیدا کند. در این‌گونه مسائل، تسهیلات اصلی در کل شبکه در مکان‌های متعدد بنا شده‌اند و با توجه با تغییراتی که در تقاضا ایجاد می‌شود، ماژول‌ها می‌توانند در بین تأسیسات بناشده‌ی مذکور در طول دوره‌های مختلف جابجا شوند تا بتوانند به تقاضایی که در هر دوره ایجاد شده‌اند، پاسخ دهند. جابجایی اخیر ماژول‌ها در میان تأسیسات، پیکربندی تسهیل را عوض می‌کند و باعث تغییر در ظرفیت و نحوه‌ی پاسخ‌دهی به تقاضا می‌شود.

ماژولاربودن خصوصاً در تسهیلاتی که در شرایط بحرانی پس از حوادث و بلایای طبیعی خدمات ارائه می‌دهند، می‌تواند مفید باشد؛ زیرا با اختصاص‌دادن ماژول‌های مختلف با اندازه‌های متفاوت در محل‌های کاندید، که برای بازگشایی تسهیلات انتخاب شده‌اند، متناسب با نوع و مقدار تقاضاهایی که در آن محل‌ها وجود دارد، می‌توان تسهیلات را با چیدمان‌های متفاوت ماژول‌های مذکور فراهم ساخت. همچنین، در دوره‌های مختلف افق برنامه‌ریزی، زمانی که حوادث متفاوت در مکان‌های نقاط تقاضا رخ می‌دهد، می‌توان ماژول‌های اخیر را در میان مکان‌های از پیش تعیین‌شده‌ی تسهیلات جابجا کرد و متناسب با نیازها خدمات ارائه داد. به همین ترتیب، تسهیلات ماژول‌دار یک مبحث پرطرفدار در مسائل مکان‌یابی تسهیلات به حساب می‌آیند و یک شاخه‌ی مهم به نام مسائل مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی تسهیلات ماژولار[2] را ایجاد کرده است.

پژوهش حاضر توسعه‌ای بر مدل نوشتار عالی‌زاده و همکاران (۲۰۲۱) است، که در مورد مکان‌یابی تسهیلاتی که از ماژول‌هایی تشکیل شده‌اند که نوع خاصی از خدمات یا محصولات را ارائه می‌دهند، انجام شده است.[3] هدف اصلی مدل اخیر، خدمت‌رسانی به افرادی است که پس از رخداد یک بحران یا فاجعه‌ی طبیعی، متقاضی یک سری کمک‌های اولیه هستند. تسهیلات در مدل ریاضی پیشنهادی در نوشتار حاضر، ظرفیتی معین دارند و با توجه به ظرفیت ذکرشده، ماژول‌ها در تسهیلات مستقر می‌شوند و نقاط تقاضا را نیز بر همین اساس پوشش می‌دهند.

به‌طورخلاصه در مدل پیشنهادی، این موارد به‌دست آمده‌اند:[۲]

- مکان تسهیلاتی که تعدادشان از قبل تعیین شده است؛
- تعداد و نوع ماژول‌های اختصاص داده‌شده در هر دوره‌ی زمانی در طول افق برنامه‌ریزی؛
- درصد تخصیص تقاضای نقاط به ماژول‌های اختصاصی در هر دوره‌ی زمانی.

زمانی که بحرانی رخ می‌دهد و افرادی به یک‌سری خدمات به گونه‌ای نیاز دارند که مسئله‌ی مرگ و زندگی‌شان در میان است، اطمینان حاصل‌کردن از اینکه نیازهای آن‌ها به بیشینه‌ی میزان ممکن پاسخ داده شود، اهمیت بسزایی دارد. و اما سؤالی که پیش می‌آید این است: در صورتی که شرایطی ایجاد شود که به دلایلی، ماژول‌هایی در میان تأسیسات ارائه‌دهنده‌ی خدمت از دسترس‌مان خارج شوند، چه می‌شود؟ و تکلیف بخشی از تقاضا که سابقاً تحت پوشش آن‌ها بوده است، به‌دلیل از دسترس خارج‌شدن‌شان، حالا بی پاسخ مانده‌اند، چه می‌شود؟

نوآوری پژوهش حاضر، توسعه‌ی مدل نوشتار پایه به‌صورت ارائه‌ی خدمت پشتیبان توسط ماژول‌هاست، که حتی‌الامکان از طریق خدمت مذکور، نقاط تقاضایی که توسط ماژول‌های ارائه‌دهنده‌ی خدمت نادیده گرفته شده‌اند، نیز تحت پوشش قرار گیرند و خدمت دریافت کنند. به این ترتیب، در پژوهش حاضر، دو نوع خدمت توسط ماژول‌ها ارائه شده است: پایه و پشتیبان. بنابراین، مدل ریاضی پژوهش حاضر مشخص می‌کند چه مقدار از ظرفیت هر ماژول به ارائه‌ی خدمات پایه و پشتیبان تخصیص یابد. با توجه به موضوع ارائه‌ی خدمت پشتیبان، تغییراتی در ساختار کل مدل نوشتار پایه و اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی آن ایجاد شده است، که مدل اخیر را به مسئله‌ی موردنظر ما با توجه به اهداف و نیازهایی که وجود دارد، تبدیل می‌کند.

به همین ترتیب در مدل مکان‌یابی پژوهش حاضر خدمت هر ماژول به دو نوع خدمت تقسیم می‌شود: خدمت پایه[4] و خدمت پشتیبان[5]. مدل توسعه داده‌شده با توجه به پارامترهای تعریف‌شده، اولویت پوشش را به خدمات پایه توسط ماژول می‌دهد. اما اگر شرایطی صورت دهد که ماژول بتواند بخشی از ظرفیت باقی‌مانده‌ی خود را در اختیار نقاط تقاضاهای تحت پوشش تسهیلات اطراف قرار دهد، که از دریافت خدمت بی‌بهره مانده‌اند، می‌تواند پژوهشگران حاضر را به هدف پوشش بیشینه‌ی نقاط نزدیک‌تر کند. بنابراین، در مدل پیشنهادی یک شعاع جدید معرفی شده است، که شعاع خدمت پشتیبان نام دارد و نواحی گسترده‌تری را نسبت به شعاع خدمت پایه در بر می‌گیرد. به طوری که نقاط تقاضایی که در اصل به تسهیلات مجاور تخصیص یافته‌اند، را نیز می‌تواند پوشش دهد. بنابراین، بخشی از ظرفیت ماژول‌ها به ارائه‌ی خدمت پشتیبان تعلق گرفته است، که البته این مقدار توسط مدل تعیین شده است.

مدل پیشنهادی نیز همانند نوشتار پایه برای خدمت‌رسانی به افرادی طراحی

[1] Dynamic Maximal Covering Location Problem
[2] Maximal Covering Location Problem of Modular Facilities
[3] Multi-Period Maximal Covering Location Problem with Capacitated Facilities and Modules for Natural Disaster Relief Services
[4] Main Service
[5] Backup Service

شده است، که به‌دلیل رویداد یک فاجعه در وضعیت بحرانی قرار گرفته‌اند و به کمک نیاز دارند. این کمک‌ها و خدمت‌رسانی‌ها توسط ماژول‌ها و کاراوان‌های متحرکی که قابلیت جابجایی و استفاده‌ی مجدد دارند، انجام می‌شود. در نوشتار حاضر، چهار نوع خدمت در شرایط بحرانی توسط ماژول‌ها ارائه شده‌اند، که شامل: کمک‌های اولیه، ارائه‌ی آب و غذا، استحمام، و خواب و استراحت هستند.

اجرای مدل پژوهش حاضر به کمک یک مطالعه‌ی موردی با داده‌های واقعی مرتبط در منطقه‌ی سه تهران انجام شده است. شهرداری تهران در سطح شهر، مناطقی را به‌عنوان محل‌های تخلیه‌ی اضطراری تعیین کرده است، که عمدتاً شامل بوستان‌ها، پارک‌ها، فضای سبز، و فضای باز هستند و به‌منزله‌ی مکان‌های بالقوه‌ی تسهیلات در نظر گرفته شده‌اند. نقاط تقاضا نیز محله‌های منطقه‌ی سه تهران هستند. مطالعه‌ی موردی در دو دوره‌ی زمانی با فرض رخداد بحران در دو نقطه‌ی متفاوت منطقه اجرا شده است. مطالعه‌ی حاضر، ساز و کار مدل طراحی‌شده را به خوبی نشان می‌دهد و ارائه‌ی خدمت پشتیبان به نقاط تقاضای مجاور را نمایان می‌سازد.

جهت حل مدل ارائه‌شده در نوشتار حاضر در مقیاس بزرگ از الگوریتم تجزیه‌ی بندرز[۶] استفاده شده است؛ که یک نوع روش حل دقیق به حساب می‌آید و به افتخار ژاک اف. بندرز[۷] نام‌گذاری شده است. در تجزیه‌ی بندرز، متغیرهای مسئله به دو زیرمجموعه تقسیم می‌شوند، به طوری که یک مسئله‌ی اصلی ایجاد می‌شود؛ که در مرحله‌ی اول بر روی اولین مجموعه از متغیرها حل می‌شود و جواب‌های به‌دست‌آمده برای پیداشدن مقادیر مجموعه‌ی دوم متغیرها در یک زیرمسئله‌ی فرعی استفاده می‌شود. مسئله‌ی اصلی، تسهیل و آزادشدن مسئله‌ی پایه است، که زیرمجموعه‌ای از متغیرها را در آن به‌دست می‌آورد و سپس به کمک آن تخمینی از مقدار تابع هدف بهینه‌ی مسئله‌ی فرعی را پیدا می‌کند. حل مسئله‌ی اصلی، یک کران دوگانه بر روی مقدار تابع هدف بهینه‌ی مسئله‌ی اصلی و مقادیر متغیری، که برای فرمول‌بندی زیرمسئله، که مقادیر متغیرهای باقی‌مانده را تعیین می‌کند، به‌دست می‌آورد. هنگامی که زیرمسئله شدنی باشد، می‌توان یک راه‌حل عملی برای مسئله‌ی اصلی ایجاد کرد؛ که یک کران اولیه در مقدار تابع هدف بهینه‌ی مسئله‌ی اصلی به‌وجود می‌آورد.

زمانی که مقدار تابع هدف زیرمسئله با برآورد در مسئله‌ی اصلی مطابقت نداشته باشد و الگوریتم به انتهای خود نرسیده باشد، یک برش بندرز، که به‌عنوان برش بهینگی[۸] شناخته می‌شود، ایجاد می‌شود؛ که معمولاً از یک نقطه در محدوده‌ی جواب‌های شدنی از چندوجهی دوگان مرتبط با زیرمسئله ایجاد می‌شود. هنگامی که زیرمسئله شدنی نباشد، یک برش بندرز که به‌عنوان برش شدنی[۹] شناخته می‌شود، ایجاد می‌شود؛ که معمولاً از یک جهت راسی[۱۰] از دوگان زیرمسئله ایجاد می‌شود. برش‌های ایجادشده به مسئله‌ی اصلی اضافه می‌شوند و سپس دوباره حل می‌شوند. این فرآیند تا زمانی تکرار می‌شود که کران‌های اولیه و دوگان در محدوده‌ی تحمل بهینه‌ی از پیش تعریف‌شده قرار گیرند، یا هیچ برش بندرزی ایجاد نشود.

در ادامه‌ی نوشتار حاضر، ابتدا به مرور ادبیات نوشتارهای مرتبط به موضوعات پژوهش حاضر پرداخته شده و موارد مختلف استفاده‌شده در مدل پیشنهادی بررسی شده است. در بخش ۳، مدل ریاضی نوشتار حاضر، معرفی شده است. همچنین، در بخش ۴ مدل مذکور روی یک مثال واقعی شامل مطالعه‌ی موردی روی منطقه‌ی سه تهران آزمایش شده است. در بخش ۵، مدل ریاضی با استفاده از روش الگوریتم تجزیه‌ی بندرز حل شده و در بخش ۶، روش مذکور برای حل مسائل بزرگ‌تر با داده‌های عدد تصادفی به‌کار رفته است. در بخش ۷، نیز به تحلیل حساسیت برخی پارامترهای مدل در مثال‌های موجود پرداخته شده و در بخش ۸ به نتیجه‌گیری‌های مرتبط و پایان پژوهش پرداخته شده است.

۲. مرور ادبیات

۲. ۱. مسائل مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی

مدل اولیه‌ی مسئله‌ی حاضر، توسط چرچ و رول[۱۱] (۱۹۷۴) معرفی شده است. با قراردادن تعداد مشخصی از تسهیلات، میزان پوشش (جمعیت قرارگرفته تحت پوشش) در فاصله‌ی خدمات بیشینه‌ی موردنظر و مسئله‌ی حاضر را به‌عنوان مسئله‌ی مدل‌سازی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی (MCLP)[۱۲] تعریف کرده‌اند.[۱]

عطا و همکاران (۲۰۱۸)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای حل مدل MCLP، الگوریتم پیشنهادی را در چند نمونه‌ی MCLP از ادبیات اعمال کرده و نشان داده‌اند که الگوریتم ژنتیک پیشنهادی با پالایش محلی از نظر درصد پوشش و زمان محاسبه، نتایج بهتری می‌دهد؛ تا تقریباً در همه‌ی موارد، راه‌حل‌ها را پیدا کند. استفاده از راهبرد مذکور، پالایش محلی از سایر روش‌های موجود برای بیشتر مثال‌های کوچک و بزرگ MCLP بهتر عمل می‌کند و میزان کلی همگرایی مدل را بهبود می‌بخشد.[۵]

پوراس[۱۳] و همکاران (۲۰۲۱)، در نوشتار خود مدل MCLP را برای مکان‌یابی خدمات اورژانسی با استفاده از توابع جانشین، که یک نوع روش فرابتکاری است، حل کرده‌اند. دو رویکرد برای به‌دست‌آوردن نسخه‌های معادل (تقریبی) از توابع هدف عبارت‌اند از: ارزیابی جزئی[۱۴] و دورانداختن کارآمد[۱۵]. ارزیابی جزئی، تأثیر اپراتورها در کیفیت راه‌حل‌ها را در نظر می‌گیرد. این فقط بخشی از عملکرد هدف را که با عمل اپراتورها اصلاح شده است، ارزیابی می‌کند. از طرف دیگر، دورانداختن کارآمد، شامل متوقف‌کردن ارزیابی است، که مشخص شود قسمت باقی‌مانده از راه‌حل در مقدار نهایی تابع هدف تأثیر نمی‌گذارد. روش‌های ابتکاری (مانند الگوریتم حریص[۱۶] و آزادسازی لاگرانژ) و فرابتکاری (مانند الگوریتم‌های ژنتیک، GRASP، الگوریتم انجماد تدریجی[۱۷]، و جستجوی تابو[۱۸]) و رویکردهای ترکیبی برای حل MCLP به روشی تقریبی استفاده شده‌اند.[۶]

در نوشتار اخیر، اصول دورانداختن کارآمد و ارزیابی جزئی برای به‌دست‌آوردن نسخه‌های کارآمدتر از تابع هدف مسئله‌ی مذکور، یعنی تابع هدف جانبی جانشین، اعمال شده است. سه تابع جانشین پیشنهاد شده است، و در نتیجه‌ی

[6] Benders' Decomposition
[7] Jacques F. Benders
[8] Optimality Cut
[9] Feasibility Cut
[10] Extreme Ray
[11] Church & Velle
[12] Maximal Covering Location Problem
[13] Porras
[14] Partial evaluation
[15] Efficient discarding
[16] Greedy-add
[17] Simulated annealing
[18] Tabu search

آزمایش‌های انجام شده، این موارد تأیید شده است: سه تابع جانشین، تعداد مقایسه‌ی فاصله را با توجه به عملکرد هدف اصلی کاهش داده است، توابع با ارزیابی جزئی باعث شده‌اند بیش از ۸۰٪ از زمان اصلی ذخیره شود؛ آزمایش‌های آماری ثابت کرده‌اند که بین توابع، تفاوت معنی‌داری وجود دارد.[۶]

زرندی و همکاران (۲۰۱۱)، در نوشتار خود با استفاده از روش‌های ابتکاری و فرابتکاری به‌منظور حل MCLP در اندازه‌های بزرگ‌تر، مسائل با بیشینه‌ی ۲۵۰۰ گره را حل کرده و عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی را بر روی مجموعه‌ای از مسائل آزمایشی نشان داده‌اند. در آزمایش‌های انجام‌شده مشخص شده است که الگوریتم ژنتیک قادر به حل مسائل در مقیاس بزرگ با خطاهای ناچیز در مدت زمان معقول است.[۷]

در نوشتار جیا و همکاران (۲۰۰۷)، بحران‌های با مقیاس بزرگ به‌عنوان رویدادهای نادری تعریف شده‌اند، که پاسخ‌دهندگان اورژانس محلی را تحت تأثیر قرار داده و به کمک منطقه‌ای و یا ملی نیاز داشته‌اند، مانند بلایای طبیعی (مثل زلزله و طوفان) و حملات تروریستی مانند ۱۱ سپتامبر. هدف ایشان، تعیین مکان‌های بهینه‌ی خدمات پزشکی اورژانس برای رفع نیازهای ایجادشده توسط بحران‌های بزرگ بوده است. اگرچه مدل‌های مکان‌یابی تأسیسات برای قراردادن هر نوع خدمات در یک شبکه، از بیمارستان‌ها گرفته تا ایستگاه‌های آتش‌نشانی و مناطق تریاژ استفاده می‌شوند، ولی در پژوهش مذکور فقط بر روی مسائل مکان‌یابی تجهیزات پزشکی برای موارد اضطراری در مقیاس بزرگ بحث و بررسی صورت گرفته است.[۸]

۲. ۲. مدل‌های ظرفیت‌دار

یک فرض اساسی مهم در MCLP این است که تأسیسات مستقرشده، ظرفیت‌های نامحدودی دارند. با این حال، این فرض از بسیاری جهات مشکل‌ساز است. بیشتر امکانات به دلایل فیزیکی، سیاسی، ساختاری، منطقه‌ای، و غیره، محدودیت‌هایی در قابلیت‌های خدماتی دارند. رویکرد برجسته برای برخورد با فرض قابلیت‌های خدمات نامحدود، محدودکردن کل خدمات ارائه‌شده توسط هر یک از تسهیلات است. یعنی محدودیت‌های ظرفیت باید به مدل اضافه شوند.[۹] به همین ترتیب، مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی ظرفیت دار (CMCLP)[۱۹] با استفاده از محدودیت‌هایی برای ردیابی و جلوگیری از بار کاری (کل خدمات) برای هر تسهیل از بیش از حد تعیین‌شده معرفی شده است.[۱۰]

شو و همکاران (۲۰۲۰)، در بررسی مسائل و چالش‌های مرتبط با کاربرد مدل‌های پوشش ظرفیتی به مطالعات موردی شامل ارائه‌ی خدمات در دو شهر سن‌خوزه و سانتا باربارا پرداخته‌اند، که در مجموع شامل ۱۸۰ نمونه‌ی کاربردی برای برجسته‌کردن مسائل و موارد مرتبط با تسهیلات ظرفیت‌دار در عمل بوده است. مدل مذکور در نرم‌افزار GIS تجاری ساختار یافته و حل شده است، که امکان ساختاردهی و حل یک مسئله‌ی پوشش‌دهی با تسهیلات ظرفیت‌دار را برای کاربران عمومی فراهم ساخته است. سیستم اخیر یک محیط یکپارچه برای کسب، مدیریت، دستکاری، تجزیه‌وتحلیل، و نمایش داده‌ها فراهم کرده است، که عموماً برای رویکردهای دقیق حل امکان‌پذیر نبوده است. یافته‌ها نشان داده‌اند که اعمال محدودیت‌های ظرفیت، پیچیدگی محاسباتی برای حل مسئله‌ی بیشینه‌ی پوشش‌دهی با تسهیلات ظرفیت‌دار را افزایش داده است؛ و بنابراین، باید ارتباط نتایج به‌دست‌آمده به صورت ابتکاری بهبود یابد. از لحاظ تئوری، محدودیت‌های ظرفیت، حد بالای محدودتری را برای محدوده‌ی حجم کار تسهیلات اعمال می‌کنند. از لحاظ تجربی، بدون محدودیت ظرفیت، محدوده‌ی حجم کار تسهیلات ممکن است به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد. به این ترتیب ممکن است مقداری از تقاضا برای ارائه‌ی خدمات اختصاص داده نشود، اما در استاندارد خدمت‌دهی باقی بماند. و همچنین، مقداری تقاضا ممکن است به یک تسهیل دورتر اختصاص داده شود، که منجر به تلاش‌های بیشتر ارائه‌دهندگان خدمات در سفر به نقاط تقاضا بشود.[۱۱]

حاتمی و همکاران (۲۰۲۱)، در بررسی ناوگان ناهمگونی از وسائط نقلیه با ظرفیت‌های حمل متفاوت، هدفشان تعیین تعداد و انواع وسائط نقلیه‌ی موردنیاز علاوه‌بر مکان‌یابی تسهیلات جدید بوده است، تا تقاضای تحت پوشش به میزان بیشینه برسد. بنابراین، یک روش ابتکاری و یک الگوریتم فرابتکاری مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله به صورت ابتکاری پیشنهاد شده است. برای یافتن مؤثرترین روش راه‌حل، مجموعه‌ای از مسائل با اندازه‌های مختلف به‌طورتصادفی تولید و با روش‌های پیشنهادی حل شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده از دو رویه‌ی راه‌حل، عملکرد بهتر رویکرد ابتکاری را بر الگوریتم ژنتیک از نظر کیفیت راه‌حل‌ها و زمان اجرا تأیید کرده است.[۱۲]

واستا و جایاسوال[۲۰] (۲۰۲۱)، در نوشتار خود با درنظرگرفتن مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش چند دوره‌ای ظرفیت‌دار با عدم قطعیت سرور، بار دیگر توجه خود را روی حوزه‌ی بهداشت و سلامت گذاشته و به مسئله‌ی انتصاب پزشکان به مراکز بهداشتی اولیه‌ی موجود و غیرفعال پرداخته‌اند. ایشان پروژه‌ی اخیر را با وجود دستورالعمل‌های روشن در مورد بیشینه‌ی جمعیت قابل‌ارائه توسط هر مرکز بهداشت و درمان و عدم قطعیت در دسترس‌بودن پزشکان در افق برنامه‌ریزی انجام داده‌اند. در زمینه‌ی مراکز بهداشتی اولیه، جمعیت (تقاضای کاربر) که نیاز به خدمات‌رسانی تسهیلات را داشته‌اند، در طول زمان تغییر کرده است، و همچنین تعداد پزشکانی که از دوره‌ای به دوره‌ی دیگر در دسترس بوده‌اند، تغییر کرده است. در چنین سناریویی، تصمیم بهینه‌ی مکان تسهیلات در یک دوره ممکن است در دوره‌های آتی کمتر از حد مطلوب باشد و بنابراین ممکن است نیاز به بازبینی مجدد داشته باشد؛ که منجر به یک مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات چنددوره‌ای (MFLP)[۲۱] می‌شود، که در آن پارامترهای مسئله (مانند تقاضا، تعداد تسهیلات برای بازشدن) با زمان تغییر می‌کنند. لذا، ایشان یک روش حل دقیق مبتنی بر تجزیه‌ی بندرز همراه با چندین اصلاح، که از ساختار اساسی مسئله برای حل بسیار کارآمد نمونه‌هایی با اندازه‌های عملی بهره‌برداری می‌کند، ارائه کرده‌اند.[۱۳]

۳.۲. مدل‌های پویا

در نسخه‌ی پویا یا چند دوره‌ای مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات، فرض بر این است که تقاضای گره‌ها با زمان تغییر می‌کند و در نتیجه، تسهیلات می‌توانند در بین دوره‌ها باز یا بسته شوند.[۱۴]

واستا و جایاسوال[۲۲] (۲۰۱۶)، در نوشتار خود به مسئله‌ی مکانی‌یابی تسهیلات (FLP)[۲۳]، که مسئله‌ی یافتن زیرمجموعه‌ی بهینه در مجموعه‌ی مشخصی از

[19] Capacitated Maximal Covering Location Problem
[20] Vatsa & Jayaswal
[21] Multi-period Facility Location Problem
[22] Vatsa & Jayaswal
[23] Facility Location Problem

مکان‌های نامزد تسهیلات در چندین دوره‌ی برنامه‌ریزی است، پرداخته‌اند. مدل اخیر برای مکان‌یابی مراکز بهداشت اولیه ایجاد شده است، که با توجه به اینکه مکان‌های مذکور در دوره‌های مختلف به تعداد متفاوتی از پزشکان دسترسی دارند، به صورت چند دوره‌ای یا پویا طراحی شده است. ایشان با استفاده از روش راه‌حل دقیق مبتنی بر تجزیه‌ی بندرز[۲۴]، اصلاحاتی برای حل نمونه‌های واقعی مسئله ارائه کرده‌اند، که شامل روش‌های ابتکاری برای زیرمسئله‌ها و روش‌های تقویت بوده است، که باعث کاهش چشمگیر زمان محاسباتی لازم برای حل نمونه‌های مسئله با بیشینه‌ی ۲۰ تسهیلات، ۵۰۰ گره‌ی تقاضا، و ۵ دوره شده است.[۳]

در میان روش‌های فراابتکاری ترکیبی که تا کنون پیشنهاد شده‌اند، کالدرین[۲۵] و همکاران (۲۰۱۷)، در نوشتارشان در یک مدل‌سازی مکان‌یابی تسهیلات پویا بر روی مجموعه یا پورتفولیو الگوریتم‌ها تمرکز کرده‌اند، که به‌عنوان مجموعه‌ای از الگوریتم‌های مختلف (یا همان الگوریتم با تنظیمات مختلف) تعریف می‌شوند؛ که به‌طور موازی اجرا می‌شوند و اطلاعات مربوط به فرآیند جستجوی خود را به اشتراک می‌گذارند. همچنین مجموعه‌ی اخیر الگوریتم، شامل: سازگاری، همکاری، و یادگیری است. این نمونه کارها از یک راهبرد تکاملی و سه روش مختلف شبیه‌سازی تبریدشده تشکیل شده است. مجموعه‌ی الگوریتم، همه‌ی الگوریتم‌های فردی را به‌طور قابل‌توجهی بهبود بخشیده و نتایج در تمام موارد در نظر گرفته شده است.[۱۵]

همچنین، حاجی پور و همکاران (۲۰۲۲)، یک فرمول ریاضی برای مکان‌یابی ایستگاه‌های آتش‌نشانی و تسهیلات اختصاص‌یافته به ایستگاه‌ها در دوره‌های مختلف و شرایط اضطراری (جنگ‌ها و بلایای طبیعی) ارائه کرده‌اند، که هدف اصلی آن، تعیین موقعیت جایگاه ایستگاه و تعداد خودروهای خدماتی در هر ایستگاه در دوره‌های مختلف برای داشتن بیشینه‌ی پوشش و بهترین استفاده از ماشین‌آلات خدماتی بوده است. برای حل مدل اخیر، دو الگوریتم فراابتکاری شامل بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)[۲۶] و الگوریتم کلونی مصنوعی زنبورها (ABC)[۲۷] با تلفیقی کروموزوم کارآمد اجرا شده‌اند.[۱۶]

زرندی و همکاران (۲۰۱۳)، نیز یک نسخه‌ی پویای چنددوره‌ای از MCLP را برای زنجیره‌ی تأمین در محدوده‌ی بزرگ پیشنهاد کرده‌اند. به‌منظور ارائه‌ی خدمات به مردم در صورت وقوع حوادث احتمالی در جاده و براساس ترافیک روزانه، تعطیلات، شرایط آب‌وهوایی، و بسیاری عوامل دیگر، ممکن است تعداد تسهیلاتی که قرار است در آن قرار گیرد در بازه‌های زمانی مختلف در نوسان باشد. نوشتار اخیر با پیشنهاد یک الگوریتم انجماد تدریجی کارآمد به مطالعاتی کمک می‌کند که قادر به حل MCLP های پویا با بیشینه‌ی ۲۵۰۰ گره و ۲۰۰ مکان بالقوه است. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که رویکرد پیشنهادی، راه‌حل‌هایی با خطای کمتر از ۱٪ پیدا می‌کند.[۱۷]

مارین و همکاران (۲۰۱۸)، یک مدل مکان‌یابی پوشش گسسته‌ی بسیار کلی را معرفی کرده‌اند، که جنبه‌های عدم قطعیت وابسته به زمان را در مقدار لازم پوشش خدمت و مقدار خدمت قابل‌ارائه توسط تسهیلات را نشان می‌دهد. مدل مذکور در چندین دوره با هدف جامعیت‌بخشی مدل‌های بهینه‌سازی استفاده‌شده در مسائل مکان‌یابی پوشش‌دهی گسسته، دو ویژگی (به تنهایی یا ترکیبی) مرتبط عملی را به تصویر کشیده است: وابستگی زمانی جنبه‌هایی مانند تقاضا و هزینه‌ها، به اضافه‌ی عدم قطعیتی که اغلب زیربنای پارامترهای مسئله است. مدل مذکور با یک روش ابتکاری مبتنی بر آزادسازی لاگرانژ حل شده است.[۱۸]

۴.۲. مدل‌های ماژول‌دار

تقریباً همه‌ی تسهیلات از واحدها و بخش‌های مختلف تشکیل شده‌اند، که با نام ماژول شناخته می‌شوند. در نمونه‌های واقعی، مثل بیمارستان، محل بیمارستان جزء تسهیلات است و ماژول‌ها شامل آمبولانس‌ها، اتاق‌های عمل، و کارمندان در طول افق زمانی هستند. در مراکز امدادرسانی در برابر فاجعه، محل مراکز، تسهیلات و ماژول‌ها شامل چادرها، واحدهای ارائه‌ی آب و غذا، و غیره هستند. در سوپرمارکت‌ها، تسهیلات محل سوپرمارکت‌ها و ماژول‌ها شامل قفسه‌هایی مواد غذایی گرم، نوشیدنی، محصولات سرد، و غیره هستند.[۲]

در تسهیلات ماژولی، سازه‌های سیار می‌توانند پس از اتمام مأموریت خود به مناطق دیگر منتقل شوند و به دلیل قابلیت استفاده‌ی مجدد ماژول‌ها در سایر شرایط، می‌توانند منجر به کاهش کل هزینه شوند. ماژولاربودن می‌تواند برای ارتقاء قابلیت بازیافت و استفاده‌ی مجدد از قطعات محصول به جای افزایش طول عمر محصول مفید باشد. علاوه‌بر این، زمانی که کاربر می‌تواند ماژول‌هایی را برای ارتقا یا افزایش طول عمر محصولی که مالک آن است، خریداری کند، مفید است. همچنین می‌تواند آثار مخرب زیست‌محیطی برخی محصولات را به دلیل منسوخ‌شدن سریع کاهش دهد. چنین راهبردهایی، ارتقاء در معرفی و جایگزینی ماژول‌ها می‌تواند توسط شرکت‌ها برای افزایش سود اتخاذ شود.[۱۹]

آلمن و ژانگ[۲۸] (۲۰۲۰)، در مقاله خود به بازارهای نوسانی امروزی و چالش‌های تولیدکنندگان که تقاضای محصول توزیع‌شده و نوسانی را برآورده می‌کنند، پرداخته‌اند. یک نوع جدید از مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات پویا معرفی شده است، که از آن به‌عنوان مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات پویا و سیار (DMMFLP)[۲۹] یاد می‌شود. در پژوهش اخیر، تأسیسات از ماژول‌ها تشکیل شده‌اند و ظرفیت تولید آن‌ها بستگی به این دارد که کدام ماژول و چند واحد از هر ماژول در محل تأسیسات باشد. هدف DMMFLP این است که بشود تصمیم گرفت کجا و در چه زمانی ماژول‌ها را در بازه‌های زمانی متعدد با کمترین هزینه قرار داد و جابجا و در عین حال تقاضای معین را برآورده ساخت. در نوشتار مذکور از الگوریتم شاخه و قیمت برای حل مدل استفاده شده است.[۴]

سیلوا[۳۰] و همکاران (۲۰۲۱) مسئله‌ی مکان‌یابی پویا با ظرفیت‌های ماژولی (DFLPM)[۳۱] را بررسی کرده‌اند. DFLPM با استفاده از روش‌های ابتکاری متناسب با سناریوهای مختلف و ساختارهای هزینه حل می‌شود. نویسندگان سه روش ابتکاری مبتنی بر آزادسازی خطی (LRH) و یک روش ابتکاری تکاملی را پیشنهاد کرده‌اند، که یک الگوریتم ژنتیک را با یک نزول همسایگی متغیر (GA + VND)[۳۲] ترکیب می‌کند. آزمایش‌هایی گزارش شده‌اند که روش‌های ابتکاری را با فرمول‌بندی پیشرفته‌ی برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط (MIP) برای مسئله مقایسه می‌کنند. همچنین نشان داده شده است که

[24] Benders decomposition
[25] Calderín
[26] Particle Swarm Optimization
[27] Artificial Bee Colony
[28] Allman & Zhang
[29] Dynamic Modular and Mobile Facility Location Problem
[30] Silva
[31] Dynamic Facility Location Problem with Modular Capacities
[32] Variable Neighborhood Descent

عملکرد روش‌ها به ویژگی‌های نمونه‌ی حل‌شده بستگی دارد. برای نمونه‌های معیار، الگوریتم LRH بهبودیافته توسط VND، در کمتر از نصف زمان MIP، راه‌حل‌هایی با اختلاف ٪۰/۰۲ از راه‌حل‌های بهینه پیدا می‌کند. برای سناریوهایی که هزینه‌های ساخت‌وساز بالاتر و اندازه‌ی ماژول‌ها کمتر است، GA+VND برای حل مسئله مؤثر بوده و از LRH و MIP عملکرد بهتری داشته است.[۲۰]

۳. مدل‌سازی ریاضی مسئله‌ی پژوهش

مسئله‌ی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش در نوشتار پایه با این فرضیات، که فرضیات پایه‌ی نوشتار حاضر هستند، مدل‌سازی شده است:[۲]

- محل‌های هر یک از تسهیلات در ابتدای اولین دوره، تعیین و سپس در ابتدای دوره‌های بعد با توجه به اینکه فرض شده است یک حادثه رخ داده است، ماژول‌ها به محل‌های بالقوه‌ی ذکرشده، اختصاص داده می‌شوند.
- ماژول‌ها، اندازه‌های متنوع و ظرفیت معینی دارند.
- تعداد و اندازه‌ی ماژول‌ها با مدل مشخص می‌شود.
- ماژول‌ها می‌توانند جابجا شوند و در ساختار تسهیلات و کل سیستم تغییر ایجاد کنند، که به تقاضا بستگی دارد.
- به‌دلیل وجود نوسان‌ها در تقاضای مسئله، مدل‌سازی در چند دوره صورت می‌گیرد.

مفروضات اخیر، همان مفروضات اساسی هستند و در ادامه، به مفروضات مربوط به عدم در دسترس‌بودن کل ظرفیت برخی ماژول‌ها و ارائه‌ی سرویس پشتیبان پرداخته شده است:

در مسائل مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش کلاسیک، تسهیلات یک شعاع خدمت دارند، که فقط به تقاضای داخل آن شعاع می‌توانند پاسخ دهند. در مدل ذکرشده، هر ماژول دو نوع شعاع خدمت دارد، شعاع خدمت پایه و پشتیبان. شعاع خدمت پایه، شعاعی است که ماژول‌ها در حالت اصلی و پایه به تقاضای آن پاسخ می‌دهند. در صورتی که یک ماژول نتواند با تمام ظرفیت خدمت ارائه کند، ماژول‌های اطراف می‌توانند تقاضای بی‌پاسخی که در شعاع پشتیبان‌شان قرار دارد، را پوشش دهند. متقابلاً دو نوع تقاضا وجود دارد، که به ماژول‌ها اختصاص می‌یابند، تقاضای موردانتظار خدمات پایه و پشتیبان، که هرکدام به ماژول خاص اختصاص داده می‌شود.

تابع هدف مدلی که ساخته می‌شود به دنبال این مقصود است: بیشینه‌سازی پوشش و پاسخ‌دهی به تقاضای پایه و پشتیبان، در حالی که هزینه‌ی اختصاص‌دادن ماژول‌ها به تسهیلات، کمینه شود.

متغیرهای تصمیم نیز نشانگر این موارد هستند:

- انتخاب محل موردنظر برای بازگشایی تسهیل.
- استقرار ماژول خاص با اندازه‌ی خاص در دوره‌ی خاص در تسهیل خاص.
- تخصیص تقاضای پایه‌ی نقطه در دوره‌ی خاص تحت پوشش ماژولی که به آن اختصاص داده شده است.
- تخصیص تقاضای پشتیبان نقطه در دوره‌ی خاص تحت پوشش ماژولی که به آن اختصاص داده شده است.

در ادامه، به معرفی نمادهای اندیس‌ها و پارامترهای مرتبط به مدل پرداخته شده است.

"مجموعه‌ها"

مکان تسهیلات	$i \in I$
نقاط تقاضا	$j \in J$
ماژول	$l \in L$
اندازه‌ی ماژول(تعداد)	$k \in K$
دوره‌ی زمانی	$t \in T$
روز	$t' \in T'$

"پارامترها"

فاصله‌ی بیشینه‌ی پوشش کامل پایه	S^m
فاصله‌ی بیشینه‌ی پوشش جزئی پایه	S'^m
فاصله‌ی بیشینه‌ی پوشش کامل پشتیبان	S^b
فاصله‌ی بیشینه‌ی پوشش جزئی پشتیبان	S'^b
فاصله‌ی بین مکان بالقوه‌ی تسهیل i و نقطه‌ی تقاضا	d_{ij}
مقدار پوشش پایه، که تسهیل i برای نقطه‌ی تقاضا j ارائه می‌کند	g_{ij}^m
$g_{ij}^m = \begin{cases} 1 & if \quad d_{ij} \le S^m \\ f(d_{ij}) & if \quad S^m < d_{ij} \le S'^m \\ 0 & if \quad S'^m < d_{ij} \end{cases}$	
مقدار پوشش پشتیبان که تسهیل i برای نقطه‌ی تقاضا j ارائه می‌کند	g_{ij}^b
$g_{ij}^b = \begin{cases} 1 & if \quad d_{ij} \le S^b \\ f'(d_{ij}) & if \quad S^b < d_{ij} \le S'^b \\ 0 & if \quad S'^b < d_{ij} \end{cases}$	
تقاضای موردانتظار از نقطه‌ی j برای ارائه‌ی خدمت پایه توسط ماژول l در دوره‌ی t در روز t′	$a_{jltt'}^m$
تقاضای موردانتظار از نقطه‌ی j برای ارائه‌ی خدمت پشتیبان توسط ماژول l در دوره‌ی t در روز t′	$a_{jltt'}^b$
بیشترین مقدار ظرفیت برای ماژول l با سایز k	b_{lk}
کمترین مقدار ظرفیت برای ماژول l با سایز k	b'
درآمد به‌دست‌آمده از پوشش پایه‌ی نقطه‌ی تقاضای j	c_j^m
درآمد به‌دست‌آمده از پوشش پشتیبان نقطه‌ی تقاضای j	c_j^b
مساحت کل تسهیل i (یا فضای قابل‌استفاده در تسهیل i)	β_i
فضای موردنیاز ماژول l با سایز k	R_{lk}
هزینه‌ی استقرار ماژول l با سایز k در تسهیل i از دوره‌ی t در روز t′	$h_{ilktt'}$
تعداد تسهیلاتی که قرار است مکان‌یابی شوند	p
هزینه‌ی ثابت احداث هر تسهیل در دوره‌ی اول	e

"متغیرهای تصمیم"

$v_i = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ اگر تسهیل در نقطه‌ی i بنا شود
در غیراین صورت

$Y_{ilktt'} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$ اگر ماژول l با سایز k در تسهیل i در ی‌دوره t و روز t' قرار بگیرد
در غیراین صورت

$x^m_{ijltt'}$ مقدار پوشش تقاضای پایه‌ی j توسط ماژول l در تسهیل i در دوره‌ی t و روز t'

$x^b_{ijltt'}$ مقدار پوشش تقاضای پشتیبان j توسط ماژول l در تسهیل i در دوره‌ی t و روز t'

"مدل"

$$Max \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t\in T}(c^m_j g^m_{ij} a^m_{jltt'} x^m_{ijltt'} + c^b_j g^b_{ij} a^b_{jltt'} x^b_{ijltt'}) - \sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{k\in k}\sum_{t\in T}\sum_{t\in T}h_{ilktt'} Y_{ilktt'} - \sum_{i\in I} ev_i \quad (1)$$

"محدودیت‌ها"

$$\sum_{k\in K} Y_{ilktt'} \le V_i \qquad \forall i,l,t,t' \quad (2)$$

$$\sum_{i\in I}(x^m_{ijltt'} + x^b_{ijltt'}) \le 1 \qquad \forall j,l,t,t' \quad (3)$$

$$\sum_{j\in J}(a^m_{jltt'} x^m_{ijltt'} + a^b_{jltt'} x^b_{ijltt'}) \le \sum_{k\in k} b_{lk} Y_{ilktt'} \qquad \forall i,l,t,t' \quad (4)$$

$$\sum_{j\in J}(a^m_{jltt'} x^m_{ijltt'} + a^b_{jltt'} x^b_{ijltt'}) \ge \sum_{k\in k} b'_{lk} Y_{ilktt'} \qquad \forall i,l,t,t' \quad (5)$$

$$\sum_{l}\sum_{k} R_{lk} Y_{ilktt'} \le \beta_i V_i \qquad \forall i,t,t' \quad (6)$$

$$\sum_{i\in I} V_i \le P \quad (7)$$

$$Y_{ilktt'} \in \{0,1\}, V_i \in \{0,1\}, x^m_{ijltt'} \ge 0, x^b_{ijltt'} \ge 0, \qquad \forall i,j,l,k,t,t' \quad (8)$$

تابع هدف شامل سه جمله است، که به ترتیب این موارد را نشان می‌دهد: درآمد حاصل از پوشش خدمت پایه و پشتیبان، هزینه‌ی استقرار هر ماژول در هر دوره، هزینه‌ی احداث هر تسهیل در دوره‌ی اول. که در کل، بیشینه‌ساختن سود حاصل از پوشش تقاضای تخصیص داده‌شده‌ی پایه و پشتیبان را نشان می‌دهد، که به واسطه‌ی آن، مکان‌یابی پوشش تقاضای مذکور، به میزان بیشینه می‌رسد.

۱) یک ماژول وقتی به تسهیل i اختصاص پیدا می‌کند، که تسهیل i بنا شده باشد. همچنین در هر تسهیل از هر نوع ماژول در هر دوره و روزی فقط یک سایز می‌تواند وجود داشته باشد.

۲) مقدار پوشش پایه و پشتیبان کل هر نقطه‌ی تقاضا (از یک نوع ماژول در هر دوره‌ی زمانی) توسط تمامی تسهیلات، بیشینه‌ی یک است.

۴ و ۵) اگر ماژول با سایز k در تسهیل i مستقر شد، بیشینه و کمینه‌ی ظرفیت ماژول باید رعایت شوند. همچنین تا زمانی که ماژولی مستقر شود، این حق وجود دارد که به آن تقاضای پایه و پشتیبان اختصاص داده شود.

۶) در هر دوره و روز، فضایی که ماژول‌ها با سایزهای مختلف در تسهیل i اشغال می‌کنند، نباید از فضای کل دردسترس در آن تسهیل بیشتر باشد.

۷) تعداد کل تسهیلات مکان‌یابی‌شده از p نباید بیشتر شود.

۸) دامنه‌ی متغیرهای تصمیم احداث تسهیلات و استقرار ماژول‌ها صفر و یک هستند. همچنین، متغیرهای مقدار پوشش تقاضای پایه و پشتیبان، همواره مثبت هستند.

۴. مطالعه‌ی موردی منطقه‌ی سه تهران

مدل نوشتار حاضر، بر روی داده‌های واقعی مربوط به منطقه‌ی ۳ تهران اجرا شده است. شهرداری تهران در هر ناحیه و منطقه، محل‌هایی را برای زمان‌هایی که بحران رخ می‌دهد، تعیین کرده است، که با عنوان "محل‌های تخلیه‌ی اضطراری" شناخته می‌شوند؛ که غالباً شامل پارک‌ها، بوستان‌ها، زمین‌های خالی، حیاط برخی مدارس، و غیره هستند. در پژوهش کنونی، از مکان‌های اخیر به‌عنوان محل‌های بالقوه تأسیس تسهیلات جهت ارائه‌ی خدمات استفاده شده است. همان‌طور که در مقدمه ذکر شده است، به‌طورکلی در زمانی که

جدول ۱. اطلاعات مربوط به ماژول‌های ارائه‌ی خدمات موردنظر.

Module type	Type	Capacity	Size (m)	Price for each individual (Tooman)
Bathing units	1 Toilet + 3 Shower	125	5.5*1.8	36,500
	8 Toilets + 8 showers	750	9.8*2.5	
Sleeping Caravans	One	48	9.5*2.6	15,000
	Two	54	10.4*2.6	
	Three	135	17.2*2.6	
Food & Drinks Supply Units	$15.8m^2$	300	7.6*2.7	200,000
	$25.3m^2$	1000	11.6*2.7	
First Aid Units	2 Examination rooms + Reception	240	9.5*2.6	100,000
	3 Examination rooms + Reception	340	12.2*2.6	

بحرانی رخ می‌دهد، مردم تأثیردیده به ۴ نوع خدمت نیاز پیدا می‌کنند: کمک‌های اولیه، ارائه‌ی آب و غذا، استحمام، و خواب. به همین ترتیب ۴ نوع ماژول برای ارائه‌ی خدمات اخیر در نظر گرفته شده است.

با توجه به هزینه‌های حساب‌شده و انواع ماژول در دسترس، هر نوع ماژول به ۴ اندازه، دسته‌بندی و هزینه‌ی استقرارشان با توجه به ظرفیت‌شان اندازه گرفته می‌شود. اطلاعات مربوط به هر ماژول در جدول ۱ ارائه شده است. هر دوره در سه روز (t') مطالعه شده است. هزینه‌های روز دوم ۱۰٪ از روز اول کمتر، و هزینه‌های روز سوم ۱۰٪ از روز دوم کمتر هستند.

همچنین فواصل مکان‌های بالقوه با نقاط تقاضا (i و j ها در مدل) و نیز مساحت‌های هر محل تخلیه‌ی اضطراری به کمک گوگل‌مپ به‌دست آمده‌اند. داده‌های مربوط به جمعیت محل‌هایی، که نقاط تقاضای ما هستند، نیز در دسترس شهرداری تهران است.

توابع g_{ij}^{m} و g_{ij}^{b} که مقادیر متنوع برای مقدار پوشش شعاع خدمت‌های متفاوت را معین می‌کنند، مطابق رابطه‌های ۹ و ۱۰ تعریف می‌شوند:

$$g_{ij}^{m}=\begin{cases}1 & if \quad d_{ij}\le 1200\\ 0.7 & if \quad 1200<d_{ij}\le 1300\\ 0.5 & if \quad 1300<d_{ij}\le 1400\\ 0.3 & if \quad 1400<d_{ij}\le 1500\\ 0 & if \quad 1500<d_{ij}\end{cases} \qquad (9)$$

$$g_{ij}^{b}=\begin{cases}0.8 & if \quad d_{ij}\le 1700\\ 0.5 & if \quad 1700<d_{ij}\le 1800\\ 0.3 & if \quad 1800<d_{ij}\le 1900\\ 0.1 & if \quad 1900<d_{ij}\le 2000\\ 0 & if \quad 2000<d_{ij}\end{cases} \qquad (10)$$

در مثال اخیر فرض شده است که در طول ۲ دوره در ۲ نقطه‌ی متفاوت منطقه، بحرانی رخ داده است و محله‌های اطراف به خدمات اولیه نیاز دارند. در دوره‌ی اول، بحران در محله‌ی دروس و در دوره‌ی دوم، در محله کاووسیه رخ داده است. تسهیلات اطراف نقاط مذکور به ارائه‌ی خدمت می‌پردازند. تقاضاهای پایه و پشتیبان به کمک جمعیت تخمین زده‌شده در هر نقطه‌ی تقاضا با تابع یکنواخت به‌دست آمده‌اند. برای ایجاد تقاضای پشتیبان، مقدار ۲۰٪ جمعیت آن نقطه در حد بالای تابع توزیع یکنواخت قرار داده شده‌اند، زیرا در حالت واقعی نیز تقاضای پشتیبان از تقاضای پایه کمتر است. همچنین برای ایجاد تقاضا با افزایش فاصله از محل حادثه نیز حد بالای جمعیت در تابع توزیع یکنواخت کاهش داده شده است. از آنجا که هر دوره در سه روز مطالعه شده است، در روزهای دوم و سوم، مقداری از تقاضای جمعیت اولیه کم شده است.

با توجه به جدول ۱، هزینه‌ی پوشش هر چهار خدمت برای یک نفر مساوی ۳۵۰۰۰۰ تومان است. با حساب ۳۰٪ سود برای پوشش هر نقطه‌ی تقاضا، درآمد حاصل از پوشش تقاضای پایه‌ی هر کدام از نقاط به‌دست می‌آید. همچنین درآمد پوشش تقاضای پشتیبان دو برابر تقاضای پایه درنظر گرفته شده است.

وقتی در دو نقطه‌ی ذکرشده در دو دوره، بحران رخ می‌دهد؛ این نقاط تقاضا، که در شکل ۱ مشاهده می‌شوند، نیازمند خدمت‌دهی می‌شوند:

- در دوره‌ی اول، نقاط تقاضا به کدهای ۳۸، ۳۷، ۴۰، ۲۵، ۴۲، ۳۶، ۳۹،۲۶، ۱۹، ۴۱، ۲۰، ۲۱، ۴۴، ۲۹، ۴۳، ۱۸، ۲۲ هستند.

- در دوره‌ی دوم، نقاط تقاضا به کدهای ۴۷، ۴۶، ۲۷، ۴۹، ۴۸، ۵۱، ۲۸، ۱۵، ۱۴، ۴۵، ۱۷، ۱۸، ۳۰، ۲۹، ۵۰، ۱۶ هستند.

با توجه به اطلاعات به‌دست‌آمده‌ی اخیر، کد مدل در برنامه‌ی گمز نسخه‌ی ۲۷.۴ وارد شده و با Cplex Solver حل شده است. لپ‌تاپ استفاده‌شده با سیستم عامل ۶۴ بیتی ویندوز ۱۰ و حافظه‌ی ۱۶ گیگابایتی و پردازنده‌ی Core i7-1165G7 و 2.80 GHz بوده است.

تعداد تسهیلاتی که هدف، ایجاد آن‌ها بوده است (عدد p)، مساوی ۱۳ بوده است. برنامه در ۱۶ دقیقه و ۴۵ ثانیه به جواب نهایی رسیده است. مقدار تابع هدف برابر ۲۲۵۸۳۲۸/۰۲۹ و مکان‌های ۵۴، ۴۹، ۴۶، ۴۳، ۳۶، ۳۵، ۲۹، ۲۷، ۲۴، ۲۲، ۲۰، ۱۹، ۱۵، برای بنای تسهیلات انتخاب شده‌اند.



شکل ۱. منطقه‌ی ۳ و مکان بنای تسهیلات در آن.

جدول ۲. درصد پوشش پایه‌ی نقاط تقاضا.

Main coverage percentage	Deamnd node	Main coverage percentage	Deamnd node
66.6	36	52.2	14
83.3	37	75	15
91.6	38	93.3	16
66.6	39	100	17
83.3	40	100	18.1
83.3	41	75	18.2
91.6	42	83.3	19
50.3	43	75	20
83.3	44	83.3	21
91.3	45	66.6	22
83.3	46	100	25
100	47	33.3	26
91.3	48	70.8	27
35	49	83.3	28
100	50	100	29.1
58.3	51	83.3	29.2
		83.3	30

جدول ۳. درصد پوشش پشتیبان نقاط تقاضایی که پوشش داده شده‌اند.

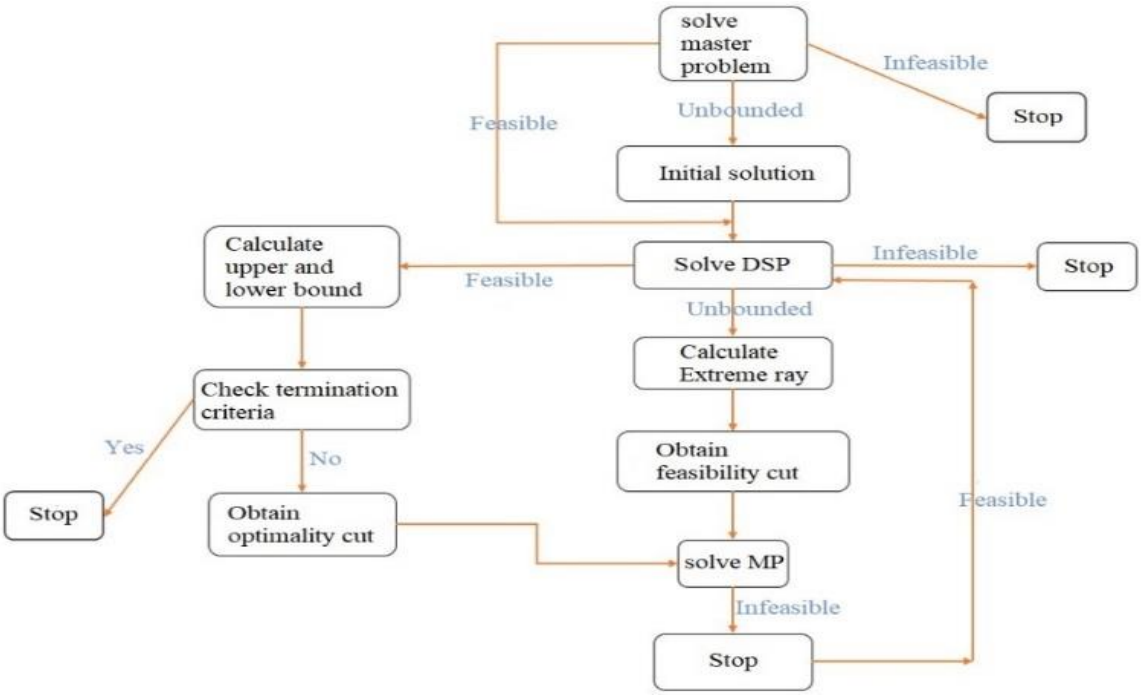
Backup coverage percentage	Deamnd node	Backup coverage percentage	Deamnd node
27	37	18	14
8	38	38	15
47	39	33	18
19	40	42	19
24	41	52	20
10	42	21	21
54	43	34	22
33	44	61	26
17	45	47	27
20	46	40	28
17	48	47	29
78	49	25	30
46	51	40	36

مقدار پوشش پایه و پشتیبان نقاط تقاضای ایجادشده در هر دوره، در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.

۵. حل مدل با الگوریتم تجزیه‌ی بندرز

در روش مذکور، اولین کاری که انجام می‌شود، شناسایی متغیرهای سخت مدل است. متغیرهای سخت، متغیرهایی هستند که از تجزیه‌ی مسئله به مسائل کوچک‌تر جلوگیری می‌کنند. معمولاً، آن‌ها در چندین محدودیت وجود دارند و با ثابت‌کردن آن‌ها می‌توان مسئله را به دو زیرمسئله تجزیه کرد. مسئله‌ی اصلی[۳۳]، شامل متغیرهای سخت است و آن‌ها معمولاً از جنس عدد صحیح هستند، که ماهیت پیچیدگی خود را در تجزیه از دست می‌دهند. زیرمسئله،

[33] Master Problem



شکل ۲. روش کلی الگوریتم تجزیه‌ی بندرز.

که از جنس برنامه‌ریزی خطی است، با ثابت‌کردن متغیرهای سخت ایجاد و دوگان آن به‌دست می‌آید. دوگان زیرمسئله از حل مسئله پیروی می‌کند.

اول، مسئله‌ی اصلی حل می‌شود و نتایج آن به دوگان زیرمسئله منتقل می‌شود. زیرمسئله‌ی دوگان، یک سری صفحات برشی تولید می‌کند و باعث همگرایی متغیرهای سخت به سمت مقدار بهینه می‌شود. مکانیزم عملکرد روش حل مبتنی بر تکرار حل مسائل اخیر، ساده‌تر است. بیشینه‌ی تعداد تکرار صورت‌گرفته، به تعداد نقاط گوشه‌ای دوگان زیرمسئله و تعداد جهت‌های رأسی دوگان زیرمسئله در بدبینانه‌ترین حالت بستگی دارد.[۲۱-۲۴] روش اجرای الگوریتم در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

در مدل پیشنهادی، متغیرهای سخت به‌صورت $y_{ilktt'}$ و v_i در نظر گرفته شده و به شکل زیرمسئله، تجزیه و فرمول‌بندی شده‌اند.

-Master Problem

$$Max\ Z_{upper} \tag{11}$$

$$Z_{upper} \le -\sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t}\sum_{\in T} h_{ilktt'}\, y_{ilktt'} - \sum_{i\in I} e v_i \tag{12}$$

$$\sum_{k\in K} y_{ilktt'} \le v_i \qquad \forall i,l,t,t' \tag{13}$$

$$\sum_{l\in L}\sum_{k\in K} R_{lk}\, y_{ilktt'} \le \beta_i v_i \qquad \forall i,t,t' \tag{14}$$

$$\sum_{i\in I} v_i \le p \tag{15}$$

$$Y_{ilktt'} \in \{0,1\}\ ,V_i \in \{0,1\} \qquad \forall i,l,k,t,t' \tag{16}$$

- Sub Problem

$$Max \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}(c_j^m g_{ij}^m a_{jlt}^m x_{ijltt'}^m + c_j^b g_{ij}^b a_{jlt}^b x_{ijltt'}^b) \tag{17}$$

S.T.

$$\sum_{i\in I}(x_{ijltt'}^m + x_{ijltt'}^b) \le 1 \qquad \forall j,l,t,t' \tag{18}$$

$$\sum_{j\in J}(a_{jltt'}^m x_{ijltt'}^m + a_{jltt'}^b x_{ijltt'}^b) \le \sum_{k\in k} b_{lk} Y_{ilktt'} \qquad \forall i,l,t,t' \tag{19}$$

$$\sum_{j\in J}(a_{jltt'}^m x_{ijltt'}^m + a_{jltt'}^b x_{ijltt'}^b) \ge \sum_{k\in k} b'_{lk} Y_{ilktt'} \qquad \forall i,l,t,t' \tag{20}$$

$$x_{ijltt'}^m \ge 0\ \ ,x_{ijltt'}^b \ge 0 \qquad \forall i,j,l,t,t' \tag{21}$$

-Dual Sub Problem

$$Min \sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}\gamma_{jltt} + \sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}\lambda_{iltt}\left(\sum_{k\in k} b_{lk}\bar{y}_{ilktt'}\right) + \sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}\delta_{iltt}\left(\sum_{k\in k} b_{lk}\bar{y}_{ilktt'}\right) \tag{22}$$

S.T.

$$\gamma_{jltt'} + a_{jltt'}^m \lambda_{iltt'} + a_{jltt'}^m \delta_{iltt'} \ge c_j^m g_{ij}^m a_{jltt'}^m \qquad \forall i,j,l,t,t' \tag{23}$$

$$\gamma_{jltt'} + a_{jltt'}^b \lambda_{iltt'} + a_{jltt'}^b \delta_{iltt'} \ge c_j^b g_{ij}^b a_{jltt'}^b \qquad \forall i,j,l,t,t' \tag{24}$$

$$\gamma_{jltt'}\ ,\lambda_{iltt'} \ge 0\ ,\ \delta_{iltt'} \le 0 \qquad \forall i,j,l,t,t' \tag{25}$$

جدول ۴ . گروه‌بندی مثال‌ها و مقادیر مربوط به هر کدام.

	Number of demand points	Number of potential facilities	Number of facilities	t′ - t
Small Samples	100	10	3	**3-2**
	300	30	10	**3-2**
Medium Samples	500	50	13	**3-2**
	700	70	18	**3-2**
Big Samples	1000	100	20	**3-3**
	1200	120	24	**3-3**

جدول ۵. خروجی نرم‌افزار و تجزیه‌ی بندرز به همراه مدت زمان اجرای آن در نرم‌افزار گمز.

Benders Timing (s)	Model Timing (s)	Margin %	Benders OF	Software output	Potential facilities	Demand point number
1	3	0.048	445064.05	445280.08	10	100
6	19	0	1498448.975	1498448.975	30	300
17	84	0.024	1952477.173	1952007.449	50	500
32	469	0.0053	2700344.844	2700202.405	70	700
93	—	—	4389487.04	—	100	1000
134	—	—	5317720.436	—	120	1200

از آنجا که زیرمسئله سه محدودیت دارد، باید سه متغیر جدید برای مسئله‌ی دوگان معرفی کرد که متغیرهای $\gamma_{jltt'}$ ، $\lambda_{iltt'}$ ، و $\delta_{iltt'}$ هستند. برش‌های بهینگی و شدنی‌سازی به صورت روابط ۲۶ و ۲۷ نوشته می‌شوند:

- Optimality Cut

$$Z_{upper} \le \sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}\gamma_{jltt'} + \sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}\lambda_{iltt'}\left(\sum_{k\in k} b_{lk}\, y_{ilktt'}\right) + \sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}\delta_{iltt'}\left(\sum_{k\in k} b_{lk}\, y_{ilktt'}\right) - \sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T} h_{iltt'}\, y_{ilktt'} - \sum_{i\in I} ev_i \quad (26)$$

- Feasibility Cut

$$\sum_{j\in J}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}\gamma_{jltt'} + \sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}\lambda_{iltt'}\left(\sum_{k\in k} b_{lk}\, y_{ilktt'}\right) + \sum_{i\in I}\sum_{l\in L}\sum_{t\in T}\sum_{t'\in T}\delta_{iltt'}\left(\sum_{k\in k} b_{lk}\, y_{ilktt'}\right) \le 0 \quad (27)$$

در هر مرحله‌ی الگوریتم با به‌دست‌آمدن $y_{ilktt'}$ و v_i بهینه‌ی جدید، صفحات برشی مذکور به مسئله‌ی اصلی اضافه می‌شوند. برش بهینگی باعث بهبود مقدار حد بالا در هر تکرار می‌شود و برش شدنی‌سازی از نامتناهی‌شدن جواب زیرمسئله‌ی دوگان جلوگیری می‌کند. حد بالا در هر تکرار، مقدار جواب بهینه‌ی تابع مسئله‌ی اصلی و حد پایین، جواب تابع هدف زیرمسئله‌ی دوگان است (رابطه‌ی ۲۸).[۲۵ و ۲۶]

$$\left|z_{upper} - z_{lower}\right| \le \varepsilon \quad (28)$$

بدین صورت کد الگوریتم بندرز در برنامه‌ی گمز نوشته و با داده‌های مربوط به فصل قبل اجرا می‌شود. در این حالت، مقدار تابع هدف برابر ۲۲۵۸۳۸۷/۹۸۳ شده است، که به مقدار ۹۹/۹۹٪ به مقدار تابع هدفی که در فصل پیش به‌دست آمده بود، شباهت دارد. این کد در ۲۳ ثانیه و ۹ تکرار اجرا شده است.

۶. تولید داده برای الگوریتم تجزیه‌ی بندرز

برای شروع کار، ابتدا مقدار نقاط تقاضا و تسهیل را که قرار است هر کدام نمایانگر یک مثال ذکرشده باشد، تعیین می‌شود. این مقادیر به سه گروه مثال‌های کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم می‌شوند. تعداد تسهیلاتی که قرار است مکان‌یابی شوند، نیز باید تعیین شوند (مقدار p). همچنین باید تعیین شود که هر مثال در چند دوره (t) و در چند روز (t') اجرا می‌شود. در جدول ۴، هر یک از مقادیر گروه‌بندی اخیر ارائه شده است.

در مرحله‌ی بعد، باید اعداد تصادفی تولید شوند. برای تولید اعداد تصادفی، با استفاده از توزیع یکنواخت برای هر پارامتر موجود در بازه‌ی مناسب به خودش، عدد تولید می‌شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی مقادیر بازه‌های مذکور برای تک‌تک مثال‌ها یکسان هستند، به جز بازه‌ی مربوط به فاصله‌ی میان هر مکان بالقوه‌ی تسهیل با هر نقطه‌ی تقاضا. زیرا با رشد تعداد نقاط تقاضا، فاصله‌ی میان هر نقطه با دورترین نقطه‌ی ممکن در همان محدوده افزایش می‌یابد و افزایش فاصله‌ی اخیر باید به درستی در بازه‌ی اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت مربوط به پارامتر d_{ij} منعکس شود. بنابراین، با افزایش تعداد نقاط تقاضا، بازه‌ی اخیر نیز بزرگ‌تر می‌شود. همچنین، در مثال‌های مذکور، مقدار هر کدام از درآمدهای مربوط به پوشش تقاضای پشتیبان با افزودن ۰/۵٪ به درآمد مربوط به پوشش تقاضای پایه به‌دست می‌آید.

همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، به‌طورکلی در زمانی که بحرانی رخ می‌دهد، مردم تأثیردیده به ۴ نوع خدمت نیاز پیدا می‌کنند: کمک‌های اولیه، ارائه‌ی آب و غذا، استحمام، و خواب. به همین ترتیب ۴ نوع ماژول برای ارائه‌ی خدمات مذکور در نظر گرفته شده است. هزینه‌ی مربوط به هر ماژول براساس هزینه‌های واقعی مربوط به هر کدام از چهار خدمت محاسبه شده است. هزینه‌ی استقرار هر ماژول نیز با توجه به ظرفیت هر کدام تولید شده است. در جدول ۵، توابع

هدف مربوط به مدل و الگوریتم تجزیه‌ی بندرز برای هرکدام از مثال‌ها ارائه شده است.

همان‌طور که قبلاً گفته شده است، مدل به همراه الگوریتم تجزیه‌ی بندرز در برنامه‌ی گمز نسخه‌ی ۲۷.۴ وارد و با Cplex Solver حل شده است. لپ‌تاپ استفاده‌شده با سیستم عامل ۶۴ بیتی ویندوز ۱۰ و حافظه‌ی ۱۶ گیگابایتی عمل کرده و پردازنده‌ی آن Core i7-1165G7 و 2.80 GHz بوده است. با توجه با ویژگی‌های دستگاه ذکرشده‌ی در دسترس، مقادیر توابع هدف مربوط به مدل و الگوریتم تجزیه‌ی بندرز برای هر کدام از مثال‌ها در مدت زمان مشخص خود به‌دست آمده‌اند.

همچنین مشاهده شده است که برای مثال‌ها با مقادیر بزرگ (مثال‌های با ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ نقطه‌ی تقاضا و ۳ دوره در ۳ روز)، مدل اصلی مسئله قادر به حل مسئله نبوده و مقدار تابع هدف فقط از طریق الگوریتم تجزیه‌ی بندرز به‌دست آمده است. در جدول‌های ۶ و ۷، میانگین مقدار پوشش‌های پایه و پشتیبان نقاط تقاضا در هر چهار مثال ارائه شده است. در مسائلی از این‌گونه، با افزایش ابعاد مسئله، مدت زمان رسیدن مدل به جواب آخر به صورت تصاعدی رشد می‌کند. در جدول‌های مذکور به وضوح مشخص است که مدت زمان رسیدن الگوریتم تجزیه‌ی بندرز به جواب پایانی کران بالای خود و تحویل تابع هدف، به مراتب کمتر از مدل اصلی مسئله است.

۷. تحلیل حساسیت برخی پارامترها

هدف در بخش حاضر این است که با مشاهده‌ی افزایش و کاهش برخی پارامترها، به بررسی تغییرات در جواب‌های به‌دست‌آمده پرداخته شود. برای تحلیل و بررسی جواب‌ها به یک سری شاخص نیاز است؛ که نشان می‌دهند تغییرات اخیر، چگونه و به چه مقدار در نحوه‌ی پاسخ‌دهی و پوشش تقاضای پایه و پشتیبان ماژول‌ها تأثیر می‌گذارند.

- **شاخص اول (PTM)**: مربوط به میانگین مجموع کل درصد تقاضای پایه‌ای است که در هر کدام از نقاط تقاضای موجود، به ازاء هر دوره‌ای که مدل در آن اجرا می‌شود، توسط ماژول‌هایی که در تسهیلات مجاور مستقر شده‌اند، پوشش داده می‌شود. به‌عبارت دیگر، شاخص PTM از میانگین جمع مقدار پوششی که تمام نقاط تقاضا در همه‌ی دوره‌ها از تمامی ماژول‌های مستقر در تسهیلات گوناگون اطراف دریافت می‌کنند، به‌دست می‌آید.
- **شاخص دوم (PTB)**: مشابه شاخص اول است، منتهی برای تقاضای پشتیبان تمام نقاط تقاضا در همه‌ی دوره‌هایی است که مدل در آن اجرا می‌شود. به همان ترتیب، شعاع پوشش مربوط به هر کدام از ماژول‌هایی که به هر نقطه‌ی تقاضا خدمت ارائه می‌دهند، شعاع خدمت بزرگ‌تر، پوشش تقاضای پشتیبان محسوب می‌شود.
- **شاخص سوم (MC):** مربوط به میانگین مجموع مقدار پوششی است که هر ماژول در هر تسهیل به تمامی نقاط تقاضای اختصاص‌یافته به خود ارائه می‌دهد. این مقدار از مجموع درصد پوشش هر دو خدمت پایه و پشتیبان از سوی ماژول‌های مستقر در هر کدام از تسهیلات تأسیس‌شده به‌دست می‌آید؛ که هدف آن به‌دست‌آوردن مقدار خدمت‌دهی هر کدام از ماژول‌های استقراریافته است، تا به نوعی بتوان ماژول‌ها را از نظر مقدار مشغولیت در خدمت‌دهی با یکدیگر مقایسه کرد.

۷.۱. افزایش و کاهش درآمد

ابتدا بر روی هر کدام از مثال‌های ذکرشده، درآمد حاصل از استقرار هر ماژول کم و زیاد شده و مقایسه‌ی نتایج با درآمد اصلی صورت گرفته است (مطابق جدول‌های ۸ و ۹).

در جدول ۸ مشاهده می‌شود که تابع هدف مدل‌ها به طبع تغییر درآمد حاصل از استقرار ماژول‌ها در هر تسهیل افزایش یا کاهش یافته‌اند. همچنین مطابق جدول ۹، نتیجه گرفته می‌شود که افزایش یا کاهش درآمد، تغییری در تعداد نقاط تقاضای پوشش داده‌شده توسط ماژول‌های مستقر در تسهیلات ندارد.

همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های ۱ الی ۸ مشاهده می‌شود، با افزایش درآمد حاصل از استقرار ماژول‌ها در هر تسهیل، میانگین پوشش هر نقطه‌ی

جدول ۶ . میانگین مقدار پوشش پایه‌ی نقاط تقاضا در هر چهار مثال.

Second period	First period	Demand point
0.6	0.58	**100**
0.8	0.83	**300**
0.663	0.677	**500**
0.74	0.75	**700**

جدو ل ۷. میانگین مقدار پوشش پشتیبان نقاط تقاضا در هر چهار مثال.

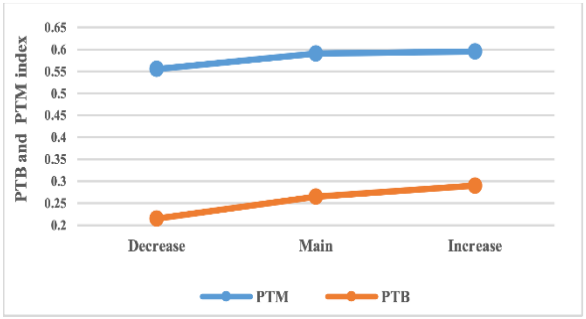
First period	First period	Demand poin
0.27	0.26	100
0.15	0.3	300
0.335	0.315	500
0.36	0.37	700

جدول ۸. تفاوت ایجادشده در توابع هدف مدل اصلی و مدل بندرز با تغییر در درآمد.

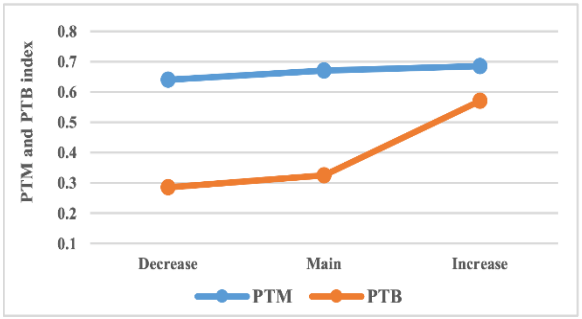
Income Increase	Primary Income	Income Reduction	Deamnd Points
10	10	10	100
24	24	25	300
40	37	37	500
45	46	46	700

جدول ۹ . تعداد نقاط تقاضای پوشش داده‌شده در هر حالت درآمد.

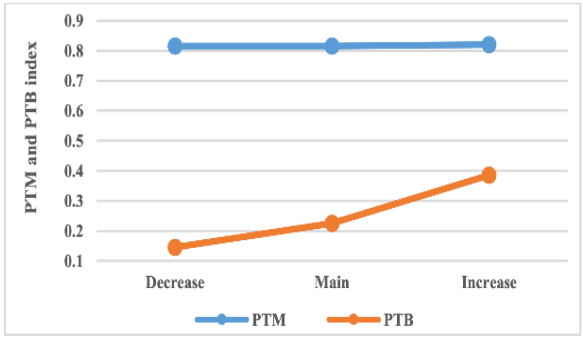
Income Increase		Primary Income		Income Reduction		
Benders	**Main Model**	**Benders**	**Main Model**	**Benders**	**Main Model**	
903794.05	903793.74	445064.05	445063.74	131590.49	131590.37	100
3027856.45	3027856.45	1498448.97	1498448.97	444575.66	444575.66	300
3931507.98	3931507.98	1952477.17	1952477.17	580682.21	580682.21	500
5453830.56	5453528.96	2700344.84	2700202.40	801458.82	801410.63	700



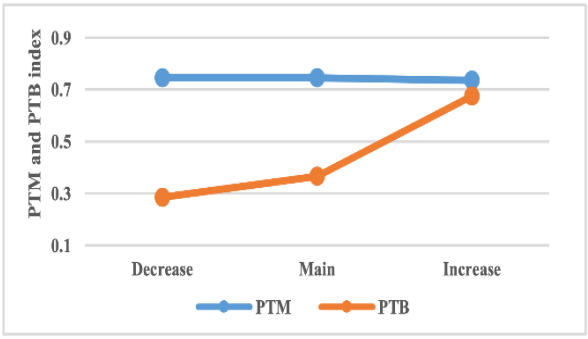
شکل ۱ . نمودار شاخص‌های پوشش تقاضا در هر وضعیت درآمد در ۱۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



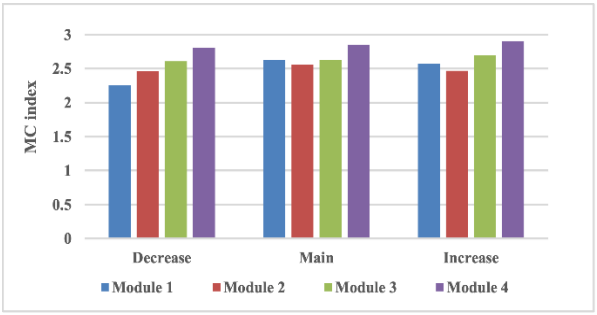
شکل ۲. نمودار شاخص‌های پوشش تقاضا در هر وضعیت درآمد در ۳۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



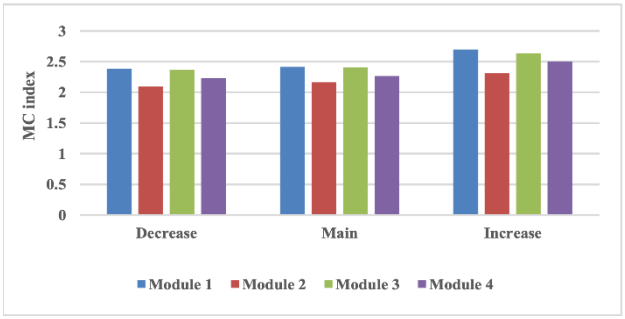
شکل ۳. نمودار شاخص‌های پوشش تقاضا در هر وضعیت درآمد در ۵۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



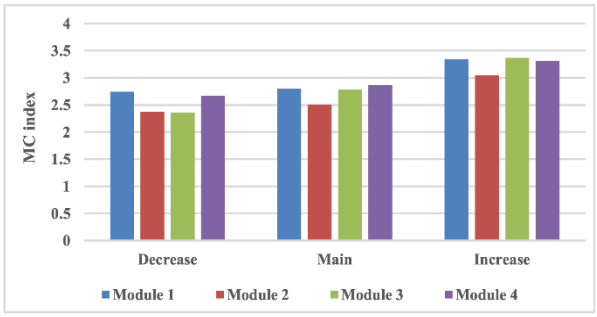
شکل ۴. نمودار شاخص‌های پوشش تقاضا در هر وضعیت درآمد در ۷۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



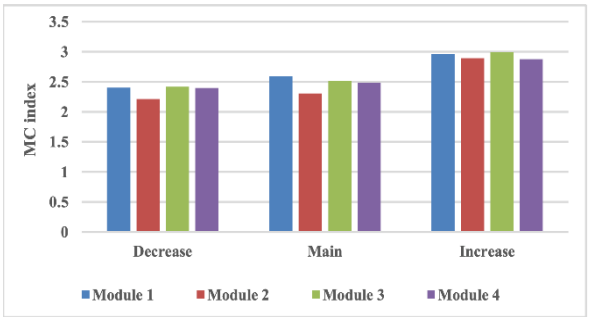
شکل ۵. نمودارهای شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول در هر وضعیت درآمد در ۱۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



شکل ۶. نمودارهای شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول در هر وضعیت درآمد در ۳۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



شکل ۷. نمودارهای شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول در هر وضعیت درآمد در ۵۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



شکل ۸. نمودارهای شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول در هر وضعیت درآمد در ۷۰۰ نقطه‌ی تقاضا.

تقاضا نیز مطابق نمودارهای مذکور افزایش یافته است. این افزایش در تقاضای پشتیبان بیشتر از تقاضای پایه دیده شده است. در هنگام کاهش درآمد، میانگین پوشش تقاضای پشتیبان نیز کاهش یافته است، ولی میانگین پوشش تقاضای پایه تغییر چندانی نکرده است. شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول مستقر در تسهیلات نیز با کاهش و افزایش درآمد تغییر اندکی کرده است، گرچه تغییر اخیر در مثال‌های گروه متوسط بیشتر از مثال‌های گروه کوچک بوده و با افزایش درآمد، مقدارش اندکی زیاد شده است. دلیل تغییر اندک مذکور، ثابت‌ماندن تعداد نقاط تقاضای پوشیده‌شده است؛ به بیانی، ایجاد تغییر در درآمد، تفاوتی در تعداد نقاط پوشیده‌شده به‌وجود نمی‌آورد و فقط همان نقاط تقاضای سابق را بهتر پوشش می‌دهد.

۲.۷. افزایش و کاهش شعاع پوشش

در ادامه، شعاع خدمت در هر کدام از مثال‌ها افزایش و کاهش یافته و میزان تغییرات در شاخص‌های مذکور بررسی شده است.

همان‌طور که در جدول ۱۰ دیده می‌شود، افزایش یا کاهش شعاع پوشش، تغییر اندکی را در توابع هدف به همراه داشته است؛ اما با کاهش شعاع پوشش، مطابق جدول ۱۱ مشاهده می‌شود که در تعداد نقاط تقاضای پوشش داده‌شده، افزایش چشمگیری رخ داده است.

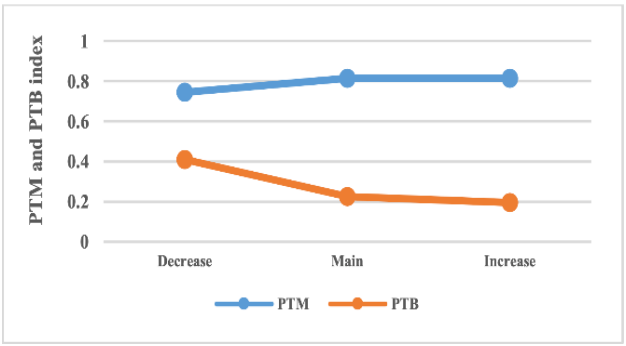
همچنین مطابق شکل‌های ۹ الی ۱۶، کاهش شعاع پوشش ماژول‌های مستقر در تسهیلات، با افزایش قابل‌توجه تعداد نقاط تقاضای پوشش داده‌شده همراه بوده است. همچنین در این حالت، میانگین پوشش تقاضای پشتیبان نقاط پوشش داده‌شده نیز افزایش یافته است. از آنجا که هم تعداد نقاط تقاضای پوشش داده‌شده و هم میانگین پوشش تقاضای پشتیبان نقاط پوشش داده‌شده افزایش قابل‌توجهی داشته‌اند، طبیعی است که شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول مستقر در تسهیلات نیز افزایش یابد. در حالت کاهش شعاع پوشش، ماژول‌های ارائه‌دهنده‌ی خدمت به صورت متمرکزتر عمل کرده و با

جدول ۱۰. تفاوت ایجادشده در توابع هدف مدل اصلی و مدل بندرز با تغییر در شعاع خدمت.

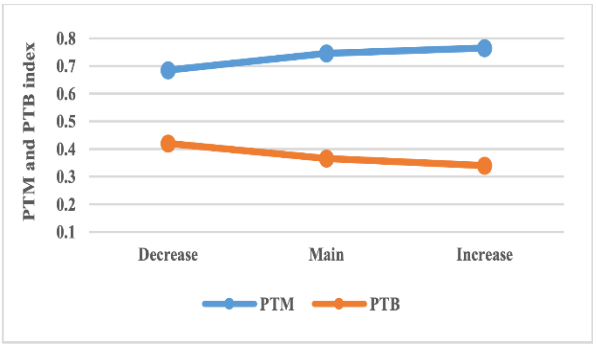
	Coverage Radius Reduction		Primary Coverage Radius		Coverage Radius Increase	
	Main Model	Benders	Main Model	Benders	Main Model	Benders
100	440709.54	440709.54	445063.74	445064.05	448172.87	448172.87
300	1486524.36	1486524.36	1498448.97	1498448.97	1498461.79	1498461.79
500	1929030.23	1929030.23	1952477.17	1952477.17	1954352.16	1954352.16
700	2677350.69	2686835.00	2700202.40	2700344.84	2701095.19	2701095.19

جدول ۱۱ .تعداد نقاط تقاضای پوشش داده شده در هر حالت شعاع پوشش.

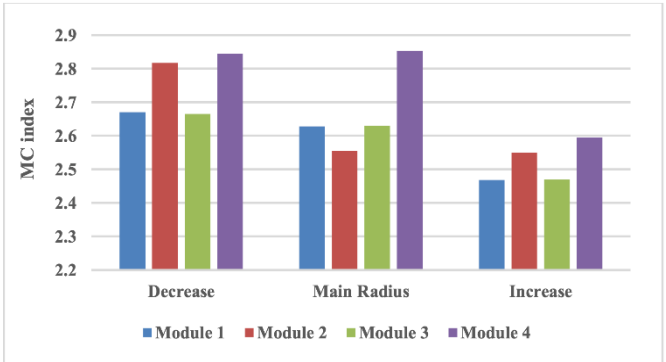
Demand Points	Coverage Radius Reduction	Primary Coverage Radius	Coverage Radius Increase
100	12	10	10
300	46	24	24
500	75	37	30
700	72	46	45



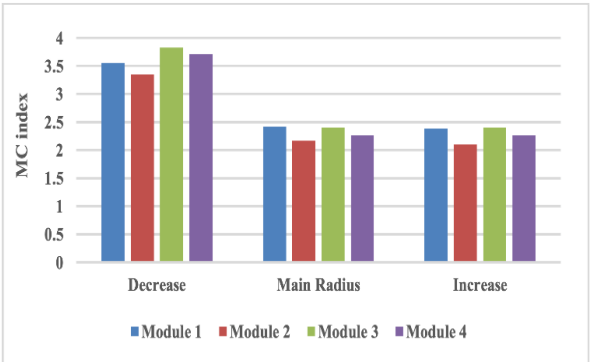
شکل ۱۱ . نمودار شاخص‌های پوشش تقاضا برای هر شعاع پوشش در ۵۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



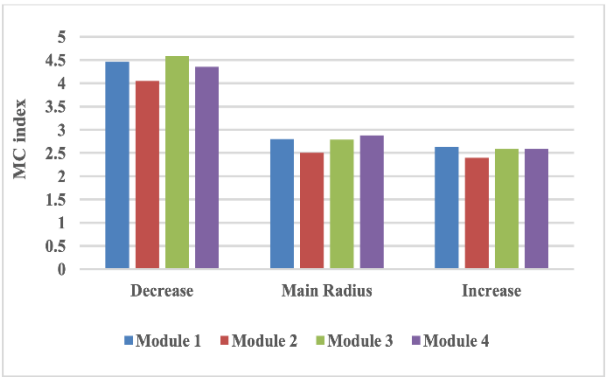
شکل ۱۲. نمودار شاخص‌های پوشش تقاضا برای هر شعاع پوشش در ۷۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



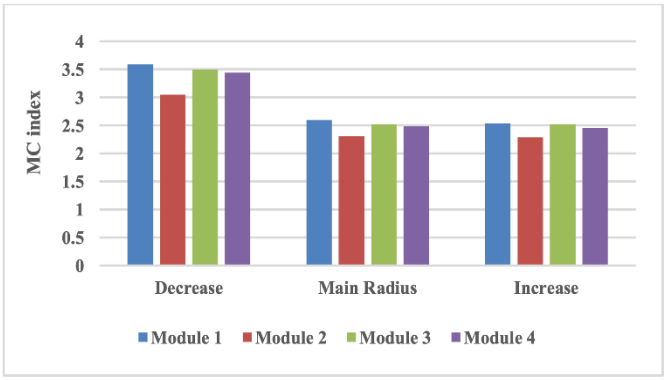
شکل ۱۳. نمودار شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول در هر شعاع پوشش در ۱۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



شکل ۱۴. نمودار شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول در هر شعاع پوشش در۳۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



شکل ۱۵. نمودار شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول در هر شعاع پوشش در ۵۰۰ نقطه‌ی تقاضا.



شکل ۱۶. نمودار شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول در هر شعاع پوشش در ۷۰۰ نقطه‌ی تقاضا.

داشتن نواحی پوشش محدودتر توانسته‌اند نقاط تقاضا داخل شعاع پوشش خود را بهتر پوشش دهند. از طرفی دیگر، با افزایش شعاع پوشش ماژول‌های مستقر در تسهیلات، افزایش اندک میانگین پوشش تقاضای پایه مشاهده می‌شود؛ اما میانگین پوشش تقاضای پشتیبان کاهش قابل‌توجهی داشته است. از آنجا که تعداد نقاط تقاضای پوشش داده‌شده در این حالت تغییری نکرده است، طبیعی است که شاخص جمع پوشش‌های تقاضا برای هر ماژول مستقر در تسهیلات نیز تغییر چندانی نداشته باشد.

به‌صورت کلی مشاهده می‌شود تغییراتی که در مقادیر پارامترها به وجود آورده شده است، بر روی پوشش خدمت پشتیبان تأثیر بیشتری گذاشته است؛ به‌عبارتی دیگر، پوشش کل خدمت پشتیبان در مقابل تغییرات پارامترها، حساسیت بالاتری نسبت به پوشش کل خدمت پایه از خود نشان داده است. وجود این حساسیت‌ها و درک‌شان برای تصمیم‌گیرانی که قصد پیاده‌سازی مدل مذکور را برای سازمان و تسهیلات خود دارند، حائز اهمیت بسیار هستند و مقادیر پارامترهای مدل باید با دقت فراوان و بررسی‌های دقیق انتخاب شوند تا بیشترین مقدار پوشش پایه و پشتیبان به نقاط تقاضا، عرضه و به بهترین نحو ممکن از مدل بهره‌برداری شود.

۸. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به یک مسئله‌ی مدل‌سازی مکان‌یابی بیشینه‌ی پوشش‌دهی پویا پرداخته شده است، که در ضمن خدمت‌رسانی اصلی و پایه‌ی ماژول‌ها به نقاط تقاضا، در مواقع عدم دردسترس‌بودن کل ظرفیت برخی از ماژول‌های مذکور، ماژول‌های اطراف با ارائه‌ی خدمت پشتیبان بتوانند تقاضای نقاطی که مورد غفلت قرار گرفته‌اند، را پوشش دهند و این کمبود را جبران کنند. هدف پژوهش کنونی، ارائه‌ی بیشینه‌ی خدمت به افرادی است که طی حادثه‌ای، بحران‌زده شوند و به خدمات اولیه نیازمند باشند. مدل ریاضی مسئله‌ی مذکور، ایجاد و برای نشان‌دادن کارایی آن، روی یک مطالعه‌ی موردی پیاده‌سازی و اجرا شده است. مطالعه‌ی حاضر، در منطقه‌ی سه تهران انجام شده و تمامی عوامل و پارامترهای مربوط به مدل با توجه ویژه به شرایط واقعی ناحیه‌ی مطالعه‌شده در نظر گرفته شده‌اند. برای حل مدل مذکور، یک بار آن را با نرم‌فزار گمز اجرا کرده و بار دیگر از الگوریتم تجزیه‌ی بندرز استفاده شده است، که جواب هر دو بسیار نزدیک به یکدیگر بوده است.

در مرحله‌ی بعد، برای تعمیم و گسترش مدل، مثال‌های دیگری زده شده است، که با اعداد تصادفی تولید شده‌اند. مثال‌های اخیر نیز با کمک مدل اصلی و مدل الگوریتم تجزیه‌ی بندرز حل و مشاهده شده است که الگوریتم تجزیه‌ی بندرز نه فقط جواب‌هایی بسیار نزدیک به جواب اصلی می‌دهند، بلکه مدل را در مدت زمان کوتاه‌تری حل می‌کند. همچنین الگوریتم تجزیه‌ی بندرز، مثال‌های بزرگ را که مدل اصلی قادر به یافتن پاسخی برایشان نیست، را نیز می‌تواند حل کند.

در ادامه، با ایجاد تغییراتی در پارامترهای مسئله و بررسی جواب‌هایی که از هر حالت به‌دست آمده‌اند، این نتیجه به‌دست آمده است که با افزایش درآمد حاصل از استقرار ماژول‌ها در محل تسهیلات و همچنین کاهش شعاع پوشش ماژول‌های ذکرشده، بیشترین افزایش در مقدار تابع هدف مدل وجود خواهد داشت. همچنین پوشش خدمت پشتیبان نسبت به تغییرات پارامترها در مقایسه با خدمت پایه، حساسیت بیشتری دارد. هنگام طراحی یک مسئله باید به مقادیر مذکور و تعادلی که در مدل ایجاد می‌کنند، توجه بسیاری شود و آن‌ها را به‌گونه‌ای در مدل قرار داد، که علاوه‌بر رفع نیازها و رعایت محدودیت‌های موجود، بتوانند بهترین جواب‌های ممکن را ارائه دهند.

همان‌طور که ذکرشده است، مدل پیشنهادی جهت ارائه‌ی خدمت به افراد بحران‌زده در زمان رویداد حوادث ایجاد شده است. ماهیت و ساختار آن به دلیل اینکه تسهیلات از ماژول‌هایی با قابلیت جابجایی تشکیل شده‌اند، انعطاف‌پذیر است؛ یعنی هنگام وقوع هر حادثه با توجه به نیازهایی که در هر ناحیه‌ی تقاضا ایجاد می‌شود، ماژول‌های پاسخ‌دهنده به همان نیازهای تسهیلات مرتبط به آن نواحی اعزام می‌شوند و بعد از پایان کار خدمت‌رسانی از آن ناحیه خارج می‌شوند. بنابراین، سازمان‌های دولتی و ارگان‌های خصوصی (همانند سازمان‌های مدیریت بحران شهری و سازمان‌های برنامه‌ریزی سیاست‌گذار) که

در زمینه‌ی امدادرسانی هنگام رخداد سیل، زلزله، و یا حتی جنگ فعالیت دارند، می‌توانند از مدل پیشنهادی استفاده کنند و برای این کار نیازمند دسترسی به ماژول‌های با قابلیت جابجایی هستند.

در پژوهش حاضر، احتمال خرابی برای ماژول‌ها در نظر گرفته نشده است و جا دارد در مطالعات آینده، مدل ریاضی حاضر با لحاظ توابع احتمالی و سناریوبندی برای خرابی ماژول‌ها توسعه یابد. همچنین در مدل پیشنهادی جای دارد بررسی‌های بیشتری بر روی مقادیر پارامترها و تحلیل حساسیت بهتری بر روی آن‌ها انجام شود. و در آخر می‌توان در روش حل مدل تغییراتی ایجاد کرد؛ برای مثال مدل را در برنامه‌ی گمز با یک Solver دیگر اجرا کرد و یا به جای روش حل دقیق به کار برده‌شده در پژوهش حاضر (الگوریتم تجزیه‌ی بندرز)، از یک روش فراابتکاری برای حل مدل استفاده و پاسخ ها را با هم مقایسه کرد.

References – منابع

1. Church, R. and Velle, C.R., 1974. The maximal covering location problem. *Papers In Regional science*, *32*(1), pp.101-118. https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1974.tb00902.x

2. Alizadeh, R., Nishi, T., Bagherinejad, J. and Bashiri, M., 2021. Multi-period maximal covering location problem with capacitated facilities and modules for natural disaster relief services. *Applied Sciences, 11*(1), p.397. https://doi.org/10.3390/app11010397

3. Vatsa, A.K. and Jayaswal, S., 2016. A new formulation and Benders decomposition for the multi-period maximal covering facility location problem with server uncertainty. *European Journal of Operational Research, 251*(2), pp.404-418. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.11.025

4. Allman, A. and Zhang, Q., 2020. Dynamic location of modular manufacturing facilities with relocation of individual modules. *European Journal of Operational Research*, *286*(2), pp.494-507. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.045

5. Atta, S., Sinha Mahapatra, P.R. and Mukhopadhyay, A., 2018. Solving maximal covering location problem using genetic algorithm with local refinement. *Soft Computing*, *22*, pp.3891-3906. https:// doi.org/ 10.1007/s00500-017-2598-3

6. Porras, C., Fajardo, J., Rosete, A. and Masegosa, A.D., 2021. Partial evaluation and efficient discarding for the maximal covering location problem. *IEEE Access*, *9*, pp.20542-20556. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055295

7. Zarandi, M.H.F., Davari, S. and Sisakht, S.A.H., 2013. The large-scale dynamic maximal covering location problem. *Mathematical and Computer Modelling*, *57*(3-4), pp.710-719. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.07.028

8. Jia, H., Ordóñez, F. and Dessouky, M., 2007. A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies. *IIE Transactions, 39*(1), pp.41-55. https://doi.org/10.1080/07408170500539113

9. Ala, A., Deveci, M., Bani, E.A. and Sadeghi, A.H., 2024. Dynamic capacitated facility location problem in mobile renewable energy charging stations under sustainability consideration. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, *41*, p.100954. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100954

10. ElKady, S.K. and Abdelsalam, H.M., 2016. A modified particle swarm optimization algorithm for solving capacitated maximal covering location problem in healthcare systems. *Applications of Intelligent Optimization in Biology and Medicine: Current Trends and Open Problems*, pp.117-133. https://doi.org /10.1007/978-3-319-21212-8_5

11. Xu, J., Murray, A., Wang, Z. and Church, R., 2020. Challenges in applying capacitated covering models. *Transactions in GIS, 24*(2), pp.268-290. https://doi.org/10.1111/tgis.12608

12. Gazani, M. and Niaki, S., 2021. The capacitated maximal covering location problem with heterogeneous facilities and vehicles and different setup costs: An effective heuristic approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, *12*(1), pp.79-90. https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2020.9.002

13. Vatsa, A.K. and Jayaswal, S., 2021. Capacitated multi-period maximal covering location problem with server uncertainty. *European Journal of Operational Research*, *289*(3), pp.1107-1126. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.07.061

14. Zhang, G., Ma, R., Kong, Y., Lian, C., Guo, H. and Zhai, S., 2024. A multi-period capacitated facility location problem with maximum travel time and backup service for locating and sizing EMS stations. *Computational Urban Science*, *4*(1), pp.1-14. https://doi.org /10.1007/s43762-024-00143-z

15. Calderín, J.F., Masegosa, A.D. and Pelta, D.A., 2017. An algorithm portfolio for the dynamic maximal covering location problem. *Memetic Computing*, *9*(2), pp.141-151. https://doi.org /10.1007/s12293-016-0210-5

16. Hajipour, V., Fattahi, P., Bagheri, H. and Babaei Morad, S., 2022. Dynamic maximal covering location problem for fire stations under uncertainty: soft-computing approaches. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, *13*(1), pp.90-112. https://doi.org /10.1007/s13198-021-01109-8

17. Zarandi, M.H.F., Davari, S. and Sisakht, S.A.H., 2013. The large-scale dynamic maximal covering location problem. *Mathematical and Computer Modelling*, *57*(3-4), pp.710-719. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.07.028

18. Marín, A., Martínez-Merino, L.I., Rodríguez-Chía, A.M. and Saldanha-da-Gama, F., 2018. Multi-period stochastic covering location problems: Modeling framework and solution approach. *European Journal of Operational Research, 268*(2), pp.432-449. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.040

19. Sonego, M., Echeveste, M.E.S. and Debarba, H.G., 2018. The role of modularity in sustainable design: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, *176*, pp.196-209. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.106

20. Silva, A., Aloise, D., Coelho, L.C. and Rocha, C., 2021. Heuristics for the dynamic facility location problem with modular capacities. *European Journal of Operational Research*, *290*(2), pp.435-452. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.018

21. Belieres, S., Hewitt, M., Jozefowiez, N., Semet, F. and Van Woensel, T., 2020. A Benders decomposition-based approach for logistics service network design. *European Journal of Operational Research*, *286*(2), pp.523-537. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.056

22. Bucarey, V., Fortz, B., González-Blanco, N., Labbé, M. and Mesa, J.A., 2022. Benders decomposition for network

design covering problems. *Computers & Operations Research*, *137*, p.105417. https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105417

23. Liu, B., Bissuel, C., Courtot, F., Gicquel, C. and Quadri, D., 2024. A generalized Benders decomposition approach for the optimal design of a local multi-energy system. *European Journal of Operational Research*. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.05.013

24. Weng, W., Chu, C. and Wu, P., 2024. A Benders decomposition algorithm for resource allocation with multi-resource operations. *International Journal of Production Research*, pp.1-17. https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2334419

25. Cordeau, J.F., Furini, F. and Ljubić, I., 2019. Benders decomposition for very large scale partial set covering and maximal covering location problems. *European Journal of Operational Research*, *275*(3), pp.882-896 https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.021.

26. Azad, N. and Hassini, E., 2019. A benders decomposition method for designing reliable supply chain networks accounting for multimitigation strategies and demand losses. *Transportation Science*, *53*(5), pp.1287-1312. https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0875

27. Sabiza, H., 2024. Modeling of dynamic maximal covering location problem considering module breakdown. Unpublished master's thesis. Faculty of Engineering Alzahra University. Tehran, Iran. [In Persian].

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 111-125

Sharif University of Technology

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



Research Article

Developing Machine Learning Algorithm for Energy Supply Optimization in Virtual Power Plants

Bentolhoda Dehghani[1], Mohammad Mehdi Lotfi[1*] and Alireza Sedighi [2]

[1]Department of Industrial Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
[2] Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.
* corresponding author: (lotfi@yazd.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:1 July 2025

Revised:5 October 2025

Accepted:19 October 2025

Keywords:

Virtual power plant,
demand side management,
unit commitment,
MILP,
machine learning.

Abstract

This research addresses the challenge of optimizing energy dispatch in restructured power markets by evaluating a Virtual Power Plant (VPP) model that integrates demand-side storage. The study aims to close the gap between energy supply and demand by employing two optimization methodologies: a precise Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model and a hybrid algorithm based on an Extreme Learning Machine and a Genetic Algorithm (ELM-GA), which is computationally efficient. The VPP model incorporates a diverse portfolio of generation units (diesel, hydroelectric, solar, wind), supply-side storage, and a prosumer, with demand-side management actualized through a water storage system. The objectives are to maximize VPP profitability while minimizing hydroelectric energy losses and pump operational costs. Tested on a standard IEEE 24-bus system with real-world data, the results show that a VPP with demand-side storage is 1.5 times less costly than a traditional grid without storage. Furthermore, the VPP framework is 1.7 times more cost-effective than a traditional grid structure. For large-scale problems, the ELM-GA algorithm delivers near-optimal solutions (4.4% optimality gap) 16 times faster than MILP, highlighting its potential for rapid, reliable energy management and policy-making.

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:
Dehghani, B., Lotfi, M.M. and Sedighi, A. 2026. Developing machine learning algorithm for energy supply optimization in virtual power plants, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.111-125.
https://doi.org/10.24200/j65.2025.66704.2433

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

به‌کارگیری الگوریتم یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی تأمین انرژی در نیروگاه‌های مجازی

بنت‌الهدی دهقانی[۱]، محمدمهدی لطفی*[۱] و علیرضا صدیقی[۲]

[۱] گروه مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

[۲] دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

*نویسنده مسئول (lotfi@yazd.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۰۷/۱۳

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۷/۲۷

واژگان کلیدی:

نیروگاه مجازی،

مدیریت سمت تقاضا،

مسئله‌ی مشارکت واحدها،

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح،

یادگیری ماشین.

چکیده

در پژوهش حاضر، مسئله‌ی مشارکت بهینه‌ی واحدها در یک نیروگاه مجازی با ذخیره‌ساز سمت تقاضا، جهت کاهش شکاف بین عرضه و تقاضای انرژی با رویکردهای MILP و یادگیری ماشین مطالعه شده است. نتایج برای سیستم ۲۴ - باسه استاندارد IEEE نشان داده‌اند که گرچه استفاده از ذخیره‌ساز سمت تقاضا باعث افزایش هزینه و نوسان تولید نیروگاه مجازی می‌شود، اما هزینه‌ها در نیروگاه مجازی با ذخیره‌ساز سمت تقاضا حدود ۱/۵ برابر کمتر از هزینه‌های شبکه‌ی سنتی بدون ذخیره‌ساز است. برای حل مدل در ابعاد واقعی، از الگوریتم ترکیبی ELM-GA استفاده شده است، که پیشنهادی نزدیک به بهینه، اما با سرعت بسیار بالاتر از روش MILP ارائه می‌کند؛ زیرا آموزش و یادگیری همگرایی به نقطه‌ی بهینه را سرعت می‌بخشد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش ابعاد مسئله به ۶۰ واحد نیروگاهی، شکاف بهینگی به ۴/۴٪ رسیده است، در حالی که سرعت حل یادگیری ماشین ۱۶ برابر بهتر از MILP بوده است.

۱. مقدمه

انسان‌ها از دیرباز از انرژی‌های تجدیدپذیر، مانند: خورشید، باد، آب، و زیست‌توده برای گرمایش، روشنایی، حمل‌ونقل، و کشاورزی استفاده کرده‌اند. با کشف آتش و سوخت‌های فسیلی، مانند: چوب، زغال‌سنگ، نفت، و گاز، مصرف انرژی افزایش یافته و تحولات صنعتی، فناوری و اقتصادی را به همراه داشته است. در قرن بیستم نیز با توسعه‌ی نیروگاه‌های هسته‌ای، انرژی هسته‌ای به‌عنوان یک منبع جدید انرژی پدیدار شده است.

لذا با افزایش نیاز به انرژی، باید برای خرید، فروش، و توزیع آن چاره‌ای اندیشیده می‌شد که نتیجه‌ی آن ایجاد بازارها و بورس‌های انرژی بوده است. نیروگاه مجازی، که مجموعه‌ای از واحدهای کوچک تولید و مصرف برق است، از نتایج بازارهای اخیر است.

ازدست‌رفتن انرژی در ساعت‌های غیرپیک و قطعی آن در ساعت‌های پیک، از دلایل به‌وجودآمدن مفهومی به نام مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا بود. مدیریت سمت تقاضا مفهومی است که بر مجموعه‌ی فعالیت‌ها با هدف تأثیرگذاری در مصرف انرژی دلالت دارد و مزایایی، از جمله: افزایش پایداری شبکه، کاهش هزینه‌های عملیاتی، حفاظت از محیط‌زیست، و افزایش رضایت مشترکان دارد. یکی از مهم‌ترین روش‌های مدیریت سمت تقاضا، استفاده از ذخیره‌ساز در سمت تقاضاست؛ که بعضی از آن‌ها، به‌صورت باتری، بعضی به‌صورت حرارتی و سیستم‌های سرمایشی/ گرمایشی منازل مسکونی، و بعضی نیز به‌صورت منابع آب هستند.

در پژوهش حاضر، بهینه‌سازی و زمان‌بندی یک نیروگاه مجازی کامل، شامل: چند تولیدکننده‌ی انرژی، توصرف‌کنندگان[۱]، مصرف‌کنندگان، و ذخیره‌سازهای سمت عرضه و تقاضا، مطالعه و مشارکت بهینه‌ی واحدها با استفاده از یادگیری ماشین به‌دست آمده است. علاوه‌بر این، سناریوهایی مانند وجود یا نبود ذخیره‌ساز سمت تقاضا و شرایط آب‌وهوایی و شبکه‌ی برق ایران بررسی و با مقایسه‌ی اطلاعات به‌دست‌آمده، افزایش سود طرف‌های درگیر و لزوم وجود ذخیره‌ساز سمت تقاضا نشان داده شده است. همچنین با استفاده از الگوریتم‌های ELM-GA[۲] و MILP[3]، ساختار بهینه‌ی مشارکت واحدها در واحدهای زمانی مختلف ارائه شده است. در بخش دوم، به مرور پیشینه‌ی

[1] Prosumer

[2] Extreme Learning Machine and a Genetic Algorithm

[3] Mixed-Integer Linear Programming

استناد به این مقاله:

دهقانی، بنت‌الهدی، لطفی، محمدمهدی و صدیقی، علیرضا، ۱۴۰۴. به‌کارگیری الگوریتم یادگیری ماشین برای بهینه‌سازی تأمین انرژی در نیروگاه‌های مجازی. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص.۱۱۱-۱۲۵. https://doi.org/10.24200/j65.2025.66704.2433

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

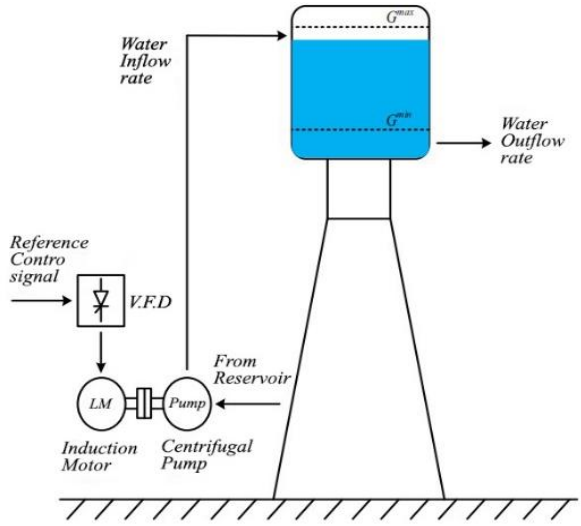
پژوهش؛ در بخش سوم، به مدل‌سازی مسئله؛ در بخش چهارم، به تجزیه‌وتحلیل عددی آن؛ و در پایان، به نتیجه‌گیری پرداخته شده است.

۲. مرور ادبیات

نیاز روزافزون به خرید، فروش، و توزیع انرژی، منجر به تشکیل بازارهای برق و انرژی در سراسر جهان شده است. در ابتدا، بازار به‌صورت انحصاری بوده است؛ بنابراین، دولت‌ها انرژی را از تولیدکنندگان می‌خریدند و سپس به‌عنوان عمده‌فروش، به شرکت‌های توزیع یا مستقیماً به مصرف‌کنندگان می‌فروختند. اما در سال ۱۹۹۰، عدم تنظیم قیمت برق، آسیب به محیط‌زیست، محدودیت‌های مالی، عدم شفافیت، انگیزه‌های اندک برای بهبود کیفیت، و کاهش هزینه‌ها و حمایت محدود از منابع تجدیدپذیر، مسئولان را وادار به ایجاد سیاست عمده‌فروشی در بازار برق کرده است.[۱]

در ابتدا، یک عامل خرید معرفی می‌شده است؛ که در آن، تولیدکنندگان انرژی خود را به‌صورت گروهی توسط نماینده‌ای در بورس انرژی عرضه می‌کردند.[۲] نماینده می‌توانست یک شرکت عمده‌فروشی یا یک شرکت بزرگ تولید دولتی باشد. در نتیجه، نیروگاه‌های مجازی به‌عنوان نوعی نماینده معرفی می‌شدند. نیروگاه مجازی، مجموعه‌ای از واحدهای تولید و مصرف کوچک است، که توسط یک سیستم کنترل مرکزی هماهنگ شده است.[۳] اما به‌دلیل محدودیت‌های فناوری رایانه و شبکه و نبود شرایط نظارتی مناسب برای اهداف اجرایی، استفاده از نیروگاه مذکور تا سال ۲۰۰۳ به‌تعویق افتاده است، زمانی که شرکت آلمانی RWE از شبکه‌ای از ژنراتورهای کوچک‌مقیاس استفاده کرد تا خدمات مناسب شبکه را فراهم کند. از آن زمان، نیروگاه‌های مجازی به‌عنوان راهی برای ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه و متعادل‌کردن تقاضا و عرضه‌ی برق به‌طورفزاینده محبوب شده‌اند.[۴] تفاوت اصلی نیروگاه‌های مجازی و معمولی این است که نیروگاه‌های مجازی چابک‌تر، کارآمدتر، و مقرون به صرفه‌تر هستند. نیروگاه مجازی می‌تواند به سرعت به تغییرات تقاضا و شرایط بازار پاسخ دهد و به شرکت‌ها اجازه می‌دهد در سطوح بهینه با ضایعات و هزینه‌های عملیاتی کمتر فعالیت کنند.[۵] دلایل برتری نیروگاه مجازی نسبت به سایر نیروگاه‌ها، کاهش هزینه‌های تولید واحد، افزایش سود تولیدکنندگان، کمک به تثبیت شبکه‌ی برق، کمینه‌سازی تلفات انتقال انرژی، بهبود قابلیت اطمینان و انعطاف‌پذیری، و کاهش انتشار کربن است.[۶]

در دهه‌ی ۱۹۷۰، چالش‌هایی در صنعت برق به وجود آمده است که باعث قطعی برق و آسیب به تجهیزات الکتریکی، هزینه‌های تولید بالا در ساعت‌های اوج مصرف، و از دست‌دادن انرژی تولیدی مازاد در سایر ساعت‌ها شده است. از سوی دیگر، با وجود احداث نیروگاه‌های مختلف در سراسر جهان، با افزایش مستمر تقاضا و محدودیت‌های گسترش عرضه، مدیریت سمت تقاضا با استفاده از ذخایر ضروری به‌نظر می‌رسد. ذخیره‌سازی سمت تقاضا از سیستم‌های ذخیره‌سازی مختلفی، مثل منبع ذخیره‌سازی آب و بانک ICE، برای کاهش مصرف برق در زمان‌های اوج مصرف، افزایش زمان‌های غیرپیک، صاف‌ترکردن منحنی بار شبکه، و کاهش نوسان‌های قیمت برق استفاده می‌کند.[۷] استفاده از دستگاه ذخیره‌سازی می‌تواند باعث ذخیره‌ی انرژی در زمان‌های خارج از پیک شود و در زمان‌های پیک به جای استفاده از نیروگاه‌های اضافی، از انرژی ذخیره‌شده استفاده شود. همچنین قابلیت اطمینان را بهبود می‌بخشد و از مصرف منابع تجدیدپذیر پشتیبانی می‌کند. در شکل ۱، یک منبع آب به‌عنوان ذخیره‌ساز سمت تقاضا مشاهده می‌شود. در یک شبکه‌ی کامل نیروگاه مجازی، چندین واحد عرضه و تقاضا شامل تولیدکنندگان انرژی، مصرف‌کنندگان،



شکل ۱. نمودار عملکردی یک منبع آب به‌عنوان ذخیره‌ساز سمت تقاضا.

توصرف‌کنندگان، و واحدهای ذخیره‌سازی تحت کنترل یک واحد مرکزی بهینه‌سازی مشارکت واحدها وجود دارد.

پژوهش‌های متعددی در زمینه‌ی نیروگاه مجازی، مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا، استفاده از یادگیری ماشین در نیروگاه مجازی و ترکیبی از موارد مذکور انجام شده است؛ که در جدول ۱، خلاصه‌ای از برخی از آن‌ها ارائه شده است.

همان‌طور که مشخص است، در معدود مطالعاتی،[۱۰] درباره‌ی استفاده از منبع آب به‌عنوان مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا، شبکه و نیروگاه‌ها همه سنتی بوده و هیچ تنوعی در نیروگاه‌ها و منابع انرژی وجود نداشته و عدم قطعیت در نظر گرفته نشده است. در مطالعه‌ی حاضر، شبکه‌ای با مشارکت نیروگاه‌های دیزلی، هیدروالکتریک، پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، توصرف‌کننده، باتری یا ذخیره‌سازی سمت عرضه، مصرف‌کننده، و واحدهای مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا بررسی شده‌اند. هدف مطالعه‌ی حاضر، بهینه‌سازی سود عناصر در ریزشبکه‌ی ۲۴ باسه استاندارد IEEE با استفاده از MILP و یادگیری ماشین بوده است. بیشتر نیروگاه‌های مجازی را می‌توان نوعی ریزشبکه در نظر گرفت، که تولیدکنندگان به صورت واحد ظاهر می‌شوند. در پژوهش حاضر، افزایش سود یک تولیدکننده با مشارکت در یک نیروگاه مجازی بررسی و همچنین تأثیر حضور ذخیره‌ساز سمت تقاضا تحلیل شده است.

۳. تعریف مسئله و مدل‌سازی

در پژوهش حاضر، مسئله‌ی بهینه‌سازی عملکرد یک نیروگاه مجازی در یک ریزشبکه‌ی استاندارد فرموله شده است. مسئله‌ی اصلی، یک مسئله‌ی مشارکت واحدها و توزیع بار اقتصادی بوده است. هدف، نیز تعیین راهبرد بهینه‌ی تولید، ذخیره‌سازی، و مصرف انرژی برای تمامی واحدهای تحت مدیریت نیروگاه مجازی در یک افق زمانی ۲۴ ساعته بوده است. راهبرد مذکور باید به‌گونه‌ای تعیین شود که ضمن برآورده‌ساختن تقاضای بار و رعایت تمامی محدودیت‌های فیزیکی و عملیاتی هر واحد، سود کل سیستم را بیشینه سازد.

در مدل پیشنهادی، یک ریزشبکه‌ی ۲۳ باسه استاندارد IEEE شامل یک نیروگاه مجازی در نظر گرفته شده است، که نیروگاه‌های دیزلی، هیدروالکتریک، خورشیدی، بادی عمودی داریوس، یک ماشین الکتریکی به‌عنوان توصرف‌کننده، و یک باتری را مدیریت می‌کند. علاوه‌بر حضور مصرف‌کنندگان، تعدادی منبع آب هم برای مدیریت سمت تقاضا در نظر گرفته شده است؛ که برای تولید

جدول ۱. مقایسه‌ی پژوهش‌های پیشین.

Objective function	Uncertainty	Demand management	Solution method	Model	Power plant	Reference
Profit	-	-	-	Interactive method	Virtual	[8]
Fines and income	✓	-	CCP	-	Virtual	[9]
Production losses and their costs	-	✓	ELM-GA	-	Traditional	[10]
Profit	-	-	-	MIP	Virtual	[11]
Exchange scenarios in the smart grid	-	✓	MLPTA	-	Traditional	[12]
Production cost. elasticity of supply and demand	✓	✓	-	Min-Max and Max-Min	Traditional	[13]
Prediction error	✓	-	BLSTM	-	Virtual	[14]
Prediction error	✓	-	K-means	-	Virtual	[15]
Profit. pump operating costs and floating producer losses	✓	✓	ELM-GA	MILP	Virtual	Current research

جدول ۲. اندیس‌های مدل.

Index	Definition	Index	Definition
t	Time	he	Hydroelectric power plant
d	Diesel power plant	s	Solar panel
w	Wind turbine	v	Electric Vehicle
b	Battery	i	Storage
l	Time intervals in the dispatch window	p	Pump

جدول ۳. متغیرهای مدل.

Variable	Definition	Variable	Definition
$P_{he.t}$	Output power of hydroelectric power plant he at time t (kW)	$z_{he.t}$	Binary variable; 1 if diesel power plant d is started up/shut down at time t, 0 otherwise
$P_{d.t}$	Diesel power plant outp Output power of diesel power plant (d) at time t (kW)	$z_{d.t}$	Binary variable; 1 if diesel power plant d is started up/shut down at time t, 0 otherwise
$u_{d.t}$	Binary variable; 1 if diesel power plant d is on at time t, 0 otherwise	$u_{s.t}$	Binary variable; 1 if solar panel (s) is on at time t, 0 otherwise
$P_{s.t}$	Output power of solar panel s at time t (kW)	$z_{s.t}$	Binary variable; 1 if solar panel s is started up/shut down at time t, 0 otherwise
$P_{w.t}$	Output power of wind turbine w at time t (kW)	$u_{w.t}$	Binary variable; 1 if wind turbine w is on at time t, 0 otherwise
$z_{w.t}$	Binary variable; 1 if wind turbine w is started up/shut down at time t, 0 otherwise	$P_{v.t}$	Charged power of the electric vehicle v at time t (kW)
$x_{v.t}$	Discharged power of the electric vehicle v at time t (kW)	$u_{x.v.t}$	Binary variable; 1 if the electric vehicle v is discharging at time t, 0 otherwise
$u_{v.t}$	Binary variable; 1 if the electric vehicle v is charging at time t, 0 otherwise	$P_{b.t}$	Charged power of the battery b at time t (kW)
$x_{b.t}$	Discharged power of the battery b at time t (kW)	$u_{b.t}$	Binary variable; 1 if the battery b is charging at time t, 0 otherwise
$u_{x.b.t}$	Binary variable; 1 if the battery (b) is discharging at time t, 0 otherwise		

انرژی در زمان اوج مصرف و تقاضای بالا، به هر کدام از آن‌ها، شش پمپ متصل به موتور القایی قرار گرفته‌اند، که به درایو فرکانس متغیر متصل بوده‌اند. اندیس‌ها، متغیرها، و پارامترهای مدل به ترتیب در جدول‌های ۲ الی ۴ ارائه شده‌اند.

راهبرد مناسب برای پاسخگویی بار و بیشینه‌سازی سود عناصر درگیر در نیروگاه مجازی تعیین شده است، تا از جهش قیمت در ساعت‌های پیک جلوگیری شود. در پژوهش حاضر، دو سناریو بررسی شده‌اند:

جدول ۴. پارامترهای مدل.

Parameter	Definition	Parameter	Definition
$C_{o.\ he.t}$	Repair and maintenance costs of hydroelectric power plant he at time t (currency)	$C_{he.t}$	Marginal costs of hydroelectric power plant he at time t (currency)
Y_{he}	Hydroelectric power plant on/off cost (currency)	$r_{d.t}$	Reliability of diesel power plant d at time t
$C_{f.t}$	Fuel cost at time t (currency)	$C_{d.t}$	Marginal costs of diesel power plant d at time t (currency)
$C_{o.d.t}$	Repair and maintenance costs of diesel power plant (d) at time t (currency)	Y_d	Diesel power plant on/off cost (currency)
R_d	Diesel power plant power increase rate	$P_{real.d.t}$	Rated power of diesel power plant d at time t (kW)
UT_d	Minimum operating time for diesel power plant	DT_d	Minimum downtime for diesel power plant
$C_{s.t}$	Marginal costs of solar panel s at time t (currency)	$C_{o.s.t}$	Solar panel repair and maintenance costs s at time t (currency)
Y_s	Solar panel on/off cost (currency)	R_s	Solar panel power increase rate
$P_{real.s.t}$	Rated power of solar panel s at time t (kW)	$r_{s.t}$	Reliability of solar panel s at time t
UT_s	Minimum working time for solar panel	DT_s	Minimum downtime for solar panels
E_s	Daily solar energy limit	T_r	Reference temperature (Celsius)
T_c	Average temperature (Celsius)	Td	Course Collection
G_{AC}	Radiation at time t	G_{ST}	Standard radiation
$C_{w.t}$	Wind turbine marginal costs w at time t (currency)	$C_{o.w.t}$	Wind turbine repair and maintenance costs w at time t (currency)
Y_w	Wind turbine on/off cost (currency)	R_w	Wind turbine power increase rate
$P_{real.w.t}$	Rated power of wind turbine w at time t (kW)	$r_{w.t}$	Wind turbine reliability w at time t
UT_w	Minimum operating time for wind turbine	DT_w	Minimum downtime for wind turbine
K_{co}	Wind turbine cut-off speed (m\s)	K_r	Nominal wind turbine speed (m\s)
K_{ci}	Wind turbine cutting speed (m\s)	θ	Percentage of wind turbine electricity production
C_{deg}	Cost of destruction and depreciation of electric car (currency)	C_{con}	Cost of using an electric car (currency)
C_{mir}	Electric car repair and maintenance costs (currency)	C_v	Marginal costs of electric cars (currency)
$P_{real.v.t}$	Rated charging power of electric car v at time t (kW)	$P_{real.x.v.t}$	Rated discharge power of electric machine v at time t (kW)
η_v	Electric car efficiency	$D_{v.t}$	Electric machine load demand v at time t (kW)
SOC_v	Electric car charging status	SOC_b	Battery charge status
C_{bmc}	Battery repair and maintenance costs (currency)	C_b	Battery destruction and depreciation cost (currency)
C_{cc}	Battery charging cost (currency)	C_{dc}	Battery discharge cost (currency)
$P_{real.b.t}$	Rated battery charging power b at time t (kW)	$P_{real.x.b.t}$	Rated battery discharge power b at time t (kW)
η_b	Battery efficiency	E_b	Battery energy capacity
R	Reliability required	PRICE	Selling price per unit of energy (currency)
$D_{un.t}$	Unmet demand at time t (kW)	D_t	Load demand at time t (kW)
M	A very large positive number	ε	A very small positive number

الف) مقایسه‌ی پاسخ به بار و سود دو حالت ایجاد و بهره‌برداری از نیروگاه مجازی یا ادامه‌ی روش سنتی کنونی.

ب) بررسی، مقایسه، و تعیین راهبرد بهینه‌ی به‌کارگیری مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا در سه حالت حضور در شبکه‌ی سنتی، حضور در نیروگاه مجازی، و عدم حضور.

وقتی انرژی تولیدی بیش از تقاضاست، باتری و ماشین الکتریکی شارژ و در سمت تقاضا نیز، علاوه‌بر پاسخ به نیاز مشترکان، با به‌حرکت درآوردن موتورها، آب ورودی در منابع موردنظر ذخیره می‌شوند. در زمان اوج مصرف و فشار بر شبکه، انرژی ذخیره‌شده در باتری و ماشین الکتریکی وارد شبکه می‌شود تا از فشار وارده بر شبکه‌ی موردنظر بکاهد. همچنین با آزادسازی آب درون منابع و به‌حرکت درآمدن پمپ‌ها و سپس موتورهای القایی، منبع تولید انرژی جدیدی خواهد بود، که انرژی تولیدی آن به‌سرعت و با طی مسیر انتقال کوتاه‌تر و هدررفت کمتر، می‌تواند شکاف در عرضه و تولید انرژی با تقاضای آن را پوشش دهد و مانع از ایجاد قطعی شود.

مفروضات شبکه‌ی پژوهش حاضر به این قرار بوده‌اند:

- پارامترهای مربوط به شرایط آب‌وهوایی (سرعت باد و تابش خورشید) و تقاضای روزانه، ذاتاً غیرقطعی هستند. با این حال، در نوشتار حاضر، از یک رویکرد بهینه‌سازی قطعی استفاده شده است؛ که در آن، فرض شده است که یک پیش‌بینی نقطه‌ای دقیق برای پارامترهای مذکور در افق زمانی ۲۴ ساعته در دسترس بوده و مدل براساس مقادیر پیش‌بینی‌شده‌ی اخیر حل شده است. بنابراین، عدم قطعیت مستقیماً در مدل ریاضی لحاظ نشده است، بلکه با استفاده از داده‌های پیش‌بینی‌شده مدیریت شده است.
- هزینه‌ها و درآمدهای مرتبط به‌صورت قطعی و ثابت فرض شده‌اند.
- خرابی‌های برنامه‌ریزی‌نشده در نظر گرفته نشده‌اند.
- مدل‌سازی پژوهش حاضر به دو بخش نیروگاه مجازی و مدیریت سمت تقاضا تقسیم و از ترکیب مبانی اصلی و عمومی نیروگاه‌ها و مدل‌سازی در پژوهش‌های پیشین استفاده شده است.

تابع هزینه در نیروگاه هیدروالکتریک به صورت رابطه‌ی ۱ بوده و محدودیت‌های آن در بخش ذخیره‌ساز ارائه شده است:

$$A(he)=\sum_{t}\sum_{he}\left((C_{he.t}\times P_{he.t})+C_{o.he.t}+\left(Y_{he}\times z_{he.t}\right)\right) \quad (1)$$

تابع هزینه‌ی نیروگاه دیزلی به‌صورت رابطه‌ی ۲ و محدودیت‌های آن مطابق روابط ۳ الی ۷ است:

$$B(d)=\sum_{t}\sum_{d}\left((C_{f.d.t}\times P_{d.t})+C_{o.d.t}+\left(Y_{d}\times z_{d.t}\right)\right) \quad (2)$$

$$-R_d \le P_{d.t}-P_{d.t-1}\le R_d \quad \forall d,t>1 \quad (3)$$

$$P_{d.t}\le P_{real.d.t}\times u_{d.t} \quad \forall d,t \quad (4)$$

$$\tau=t-(UT_d-1)\ .\sum_{\tau}^{t}u_{d.\tau}\ge UT_d\times u_{d.t} \quad \forall d,t \quad (5)$$

$$\tau=t-(DT_d-1)\ .\sum_{\tau}^{t}(1-u_{d.\tau})\ge DT_d\times(1-u_{d.t}) \quad \forall d,t \quad (6)$$

$$u_{d.t}-u_{d.t-1}=z_{d.t} \quad \forall d,t>1 \quad (7)$$

تابع هدف نیروگاه خورشیدی نیز مطابق رابطه‌ی ۸ و و محدودیت‌های آن مطابق رابطه‌های ۹ الی ۱۶ هستند:

$$C(s)=\sum_{t}\sum_{s}\left((C_{s.t}\times P_{s.t})+C_{o.s.t}+\left(Y_{s}\times z_{s.t}\right)\right) \quad (8)$$

$$-R_s \le P_{s.t}-P_{s.t-1}\le R_s \quad \forall s,t>1 \quad (9)$$

$$P_{s.t}\le P_{real.s.t}\times u_{s.t} \quad \forall s,t \quad (10)$$

$$\tau=t-(UT_s-1)\ .\sum_{\tau}^{t}u_{s.\tau}\ge UT_s\times u_{s.t} \quad \forall s,t \quad (11)$$

$$\tau=t-(DT_s-1)\ .\sum_{\tau}^{t}(1-u_{s.\tau})\ge DT_s\times(1-u_{s.t}) \quad \forall s,t \quad (12)$$

$$u_{s.t}-u_{s.t-1}=z_{s.t} \quad \forall s,t>1 \quad (13)$$

همچنین، رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ از نوشتار ژائوکسیا[1] و همکاران (۲۰۱۷)،[۱۶] استخراج شده‌اند:

$$Td\times P_{s.t}\le E_s \quad \forall s \quad (14)$$

$$P_{s.t}=\left(P_{real.s.t}\times G_{AC}\right)\left(1+h\left(T_c-T_r\right)\right)/G_{ST} \quad \forall s,t>1 \quad (15)$$

$$u_{s.t}=\begin{cases}0 & G_{AC}<200\\ 1 & G_{AC}\ge 200\end{cases} \quad \forall s,t>1 \quad (16)$$

در ادامه، تابع هزینه‌ی نیروگاه بادی نیز مطابق رابطه‌ی ۱۷ و محدودیت‌های در نظر گرفته‌شده در آن به شرح روابط ۱۸ الی ۲۲ هستند.

$$D(w)=\sum_{t}\sum_{w}\left((C_{w.t}\times P_{w.t})+C_{o.s.t}+\left(Y_{w}\times z_{w.t}\right)\right) \quad (17)$$

$$-R_w \le P_{w.t}-P_{w.t-1}\le R_w \quad \forall w,t>1 \quad (18)$$

$$P_{w.t}\le P_{real.w.t}\times u_{w.t} \quad \forall w \quad (19)$$

$$\tau=t-(UT_w-1)\ .\sum_{\tau}^{t}u_{w.\tau}\ge UT_w\times u_{w.t} \quad \forall w \quad (20)$$

$$\tau=t-(DT_w-1)\ .\sum_{\tau}^{t}(1-u_{w.\tau})\ge DT_w\times(1-u_{w.t}) \quad \forall w,t>1 \quad (21)$$

$$u_{w.t}-u_{w.t-1}=z_{w.t} \quad \forall w,t>1 \quad (22)$$

توان خروجی توربین بادی تابعی از سرعت باد در زمان t است؛ که با استفاده از سه پارامتر کلیدی سرعت باد، شامل: سرعت آستانه‌ی قطع، سرعت نامی، و سرعت آستانه‌ی خروج، به‌صورت تابع چندضابطه‌ای مطابق روابط ۲۳ الی ۲۵ هستند، که بر مبنای نوشتار اولاه[2] و همکاران (۲۰۱۷)،[۱۷] هستند:

[1] Zhaoxia

[2] Ullah

$$P_{w,t}=\begin{cases}0 & 0\le k\le K_{ci}\\ P_{real,w,t}\times\dfrac{k-K_{ci}}{K_r-K_{ci}} & K_{ci}<k\le K_r\\ P_{real,w,t} & K_r<k\le K_{co}\\ 0 & K_{co}<k\end{cases}\quad\forall w,t \tag{23}$$

$$0\le P_{w,t}\le\theta\times P_{real,w,t}\quad\forall w,t \tag{24}$$

$$u_{w,t}=\begin{cases}0 & K_{ci}<2.5\\ 1 & K_{ci}\ge 2.5\end{cases}\quad\forall w,t \tag{25}$$

تابع هدف ماشین الکتریکی مطابق رابطه‌ی ۲۶ و محدودیت‌های آن براساس نوشتار فلیسچر[۳] و همکاران (۲۰۱۳)،[۱۸] مطابق رابطه‌های ۲۷ الی ۳۳ هستند:

$$E(v)=\sum_t\sum_v((C_v+C_{deg})\times P_{v,t})+(C_{con}\times x_{v,t})+C_{mir}) \tag{26}$$

$$SOC_v+(\eta_v\times P_{v,t})-\left(\frac{x_{v,t}}{\eta_v}\right)\le D_{v,t}\quad\forall v,t \tag{27}$$

$$P_{v,t}\le P_{real,v,t}\times u_{v,t}\quad\forall v,t \tag{28}$$

$$P_{v,t}\le P_{real,x,v,t}\times u_{x,v,t}\quad\forall v,t \tag{29}$$

$$\sum P_t-D_t\le M\times u_{v,t}\quad\forall v,t \tag{30}$$

$$\sum P_t-D_t\ge\varepsilon-M(1-u_{v,t})\quad\forall v,t \tag{31}$$

$$D_t-\sum P_t\le M\times u_{x,v,t}\quad\forall v,t \tag{32}$$

$$D_t-\sum P_t\ge\varepsilon-M(1-u_{x,v,t})\quad\forall v,t \tag{33}$$

تابع هدف باتری نیز مطابق رابطه‌ی ۳۴ و محدودیت‌های آن نیز براساس نوشتار کبیری‌فر و همکاران (۲۰۲۲)،[۱۱] مطابق رابطه‌های ۳۵ الی ۴۱ هستند.

$$F(b)=\sum_t\sum_b((C_b\times P_{b,t})+(C_{cc}\times P_{b,t})+(C_{dc}\times x_{v,t})+C_{bmc}) \tag{34}$$

$$SOC_b+(\eta_b\times P_{b,t})-\left(\frac{x_{b,t}}{\eta_b}\right)\le E_b\quad\forall b,t \tag{35}$$

محدودیت ۳۵، دینامیک سطح انرژی ذخیره‌شده در باتری را مدل می‌کند. همچنین تضمین می‌کند که سطح انرژی باتری در هر ساعت، با درنظرگرفتن میزان شارژ، تخلیه، و راندمان، از ظرفیت کل باتری تجاوز نکند.

$$P_{b,t}\le P_{real,b,t}\times u_{b,t}\quad\forall b,t \tag{36}$$

$$P_{b,t}\le P_{real,x,b,t}\times u_{x,b,t}\quad\forall b,t \tag{37}$$

$$\sum P_t-D_t\le M\times u_{b,t}\quad\forall b,t \tag{38}$$

$$\sum P_t-D_t\ge\varepsilon-M(1-u_{b,t})\quad\forall b,t \tag{39}$$

$$D_t-\sum P_t\le M\times u_{x,b,t}\quad\forall b,t \tag{40}$$

$$D_t-\sum P_t\ge\varepsilon-M(1-u_{x,b,t})\quad\forall b,t \tag{41}$$

عبارت ۴۲، تعادل توان را در هر ساعت تضمین می‌کند، به این معنا که مجموع تولید و انرژی تخلیه‌شده از ذخیره‌سازها باید با تقاضای بار و انرژی موردنیاز برای شارژ برابر باشد.

$$D_{un,t}+P_{d,t}+P_{s,t}+P_{w,t}+P_{b,t}+P_{ng,t}+P_{v,t}-x_{b,t}-x_{v,t}=D_t\quad\forall t \tag{42}$$

محدودیت‌های ۴۳ و ۴۴، الزام‌های اصلی کل سیستم را نشان می‌دهند. عبارت ۴۳، کمینه‌ی سطح قابلیت اطمینان سیستم را با درنظرگرفتن واحدهای در حال کار اعمال می‌کند و تابع هدف کل سیستم نیز مطابق رابطه‌ی ۴۴ است:

$$(r_{ng,t}\times u_{ng,t})+(r_{d,t}\times u_{d,t})+(r_{s,t}\times u_{s,t})+(r_{w,t}\times u_{w,t})\ge R\quad\forall t \tag{43}$$

$$max\sum_t(D_t\times PRICE)-A(he)-B(d)-C(s)-D(w)-E(v)-F(b) \tag{44}$$

به‌طورخلاصه، چارچوب مدل‌سازی ارائه‌شده در پژوهش حاضر، یک رویکرد ترکیبی است که از یکپارچه‌سازی و تلفیق مدل‌های توسعه‌یافته در مراجع مختلف بهره می‌برد. همان‌طور که تشریح شد، اجزاء مدل براساس مدل‌های ارائه‌شده در برخی نوشتارها،[۱۱ و ۱۸] پیاده‌سازی شده‌اند. در این میان، مدل‌سازی بخش ذخیره‌ساز و الگوریتم یادگیری ماشین، به‌طورکامل از نوشتار ناندکئولیار و کومار ری[۴] (۲۰۲۲)،[۱۰] اقتباس شده است. هدف از این رویکرد یکپارچه، بهره‌گیری هم‌زمان از نقاط قوت هر یک از مدل‌های پایه به‌منظور دستیابی به عملکردی دقیق‌تر و جامع‌تر بوده است.

الگوریتم ترکیبی استفاده‌شده، الگوریتمی بوده است که در آن «الگوریتم ژنتیک (GA)» به‌عنوان موتور اصلی بهینه‌سازی عمل کرده و «ماشین یادگیری بی‌نهایت (ELM)» نقش یک شتاب‌دهنده‌ی هوشمند برای بهبود و تسریع همگرایی را داشته است. فرایند حل با الگوریتم ژنتیک آغاز شده است. GA با ایجاد یک جمعیت اولیه از راه‌حل‌های کاندید (که هر راه‌حل، یک راهبرد کامل ۲۴ ساعته برای مشارکت واحدهاست) به جستجو در فضای جواب پرداخته و در هر نسل، با استفاده از عملگرهای انتخاب براساس شایستگی (مقدار تابع هدف)، ترکیب و جهش، جمعیت به سمت یافتن جواب‌هایی با کیفیت بالاتر هدایت شده است.

با این حال، برای جلوگیری از همگرایی زودرس به بهینه‌های محلی و افزایش سرعت رسیدن به جواب‌های با کیفیت، از ماشین یادگیری بی‌نهایت به‌عنوان یک عملگر کمکی هوشمند در طول فرایند تکامل GA استفاده شده است. پس از گذشت تعداد معینی از نسل‌ها، مجموعه‌ای از بهترین جواب‌های یافت‌شده تا آن لحظه، به‌عنوان داده‌های آموزشی برای یک شبکه‌ی ELM به‌کار رفته‌اند. ELM که یک شبکه‌ی عصبی بسیار سریع است، الگوی موجود در جواب‌های اخیر را خوب یاد می‌گیرد. سپس، در نسل‌های بعدی الگوریتم ژنتیک، برخی از جواب‌های جدید تولیدشده (فرزندان) به‌عنوان ورودی به شبکه‌ی ELM آموزش‌دیده داده شده و شبکه‌ی ELM، یک نسخه‌ی اصلاح‌شده و بهبودیافته از آن جواب را براساس دانش استخراج‌شده از

[6]Fleischer

[4] Nandkeolyar & KumarRay

جواب‌های برتر قبلی پیش‌بینی کرده است؛ که جواب اصلاح‌شده، جایگزین جواب اولیه در جمعیت GA می‌شود.

این فرایند ترکیبی باعث می‌شود که جستجوی الگوریتم ژنتیک به‌جای تکیه بر تغییرات کاملاً تصادفی، با استفاده از دانش انباشته‌شده در شبکه‌ی ELM، به سمت مناطق امیدبخش‌تر فضای جواب هدایت شود. در نتیجه، همگرایی به راه‌حل‌های با کیفیت و پایدار تسریع می‌شود و کیفیت نهایی جواب بهبود می‌یابد.

۴. بررسی نتایج

برای پیاده‌سازی و حل مدل‌ها از دو بستر محاسباتی مجزا استفاده شده است. مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح با استفاده از نرم‌افزار GAMS بر روی یک رایانه‌ی شخصی با مشخصات پردازنده‌ی CPU M۳۸۰@۲/۵۳GHz ۳ Intel(R) Core(TM) i و ۴۰۰ گیگابایت حافظه‌ی RAM حل شده است. الگوریتم ترکیبی ELM-GA نیز با استفاده از زبان برنامه‌نویسی پایتون در محیط Google Colaboratory پیاده‌سازی و اجرا شده است. برای اجرای الگوریتم ELM-GA، از منابع محاسباتی استاندارد فراهم‌شده توسط Colab، شامل شتاب‌دهنده‌ی گرافیکی (GPU) استفاده شده است، تا سرعت فرآیندهای یادگیری ماشین افزایش یابد.

نیروگاه مجازی بررسی‌شده در پژوهش حاضر، شامل: یک نیروگاه دیزلی با ظرفیت ۱۰۰ مگاوات، یک مزرعه‌ی خورشیدی با توان ۱۰۰ کیلووات، شش توربین بادی با مجموع توان ۵۰ کیلووات، نیروگاه هیدروالکتریک متشکل از چهار واحد ۵۰ مگاواتی، یک باتری با ظرفیت ۴ کیلووات، و یک ماشین الکتریکی با ظرفیت ۱۹/۲ کیلووات بوده است.

۱.۴. مطالعه‌ی موردی (داده‌ها)

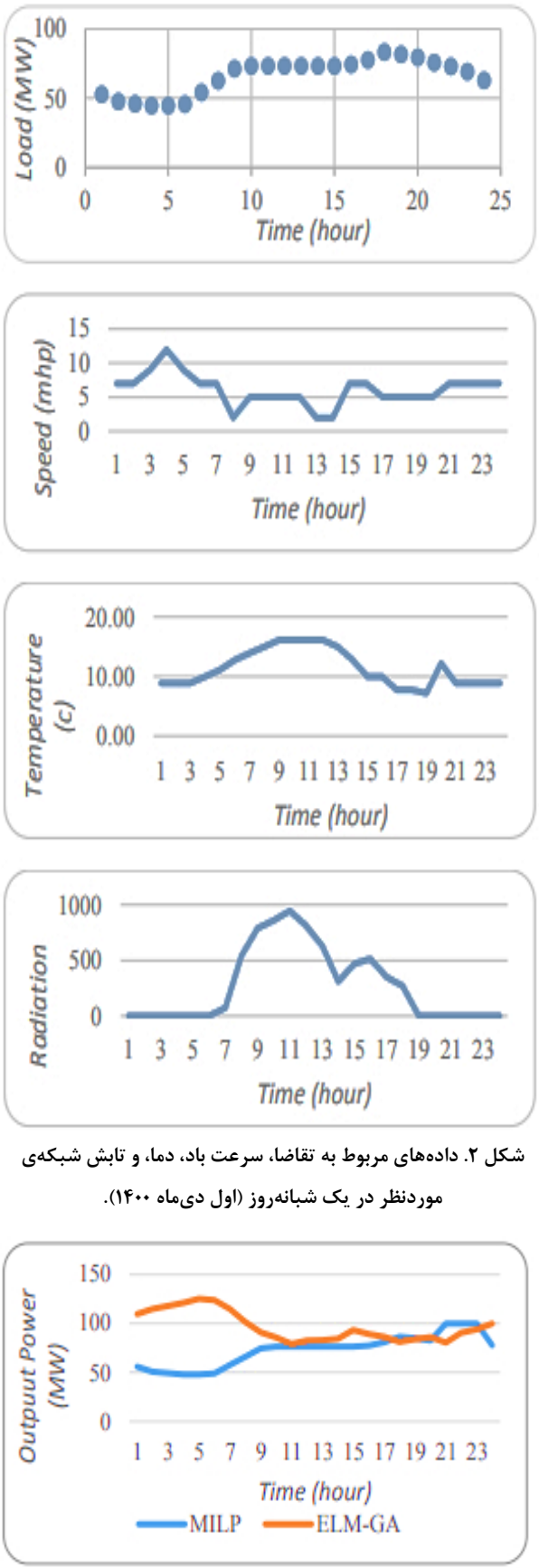
مقادیر تقاضا، سرعت باد، دما، و میزان تابش در شبانه‌روز بررسی‌شده (اول دی‌ماه ۱۴۰۰)، از داده‌های واقعی استان یزد استخراج شده‌اند، که نمودارهای آن‌ها در شکل ۲ مشاهده می‌شوند.

قیمت خرید برق از هر نیروگاه به‌طورمتوسط ۵۳/۰۶ تومان به ازاء هر کیلووات ساعت و هزینه‌ی سوخت برای نیروگاه دیزلی، ۴۰ تومان به ازاء هر مترمکعب و همچنین، دمای مرجع در نیروگاه خورشیدی و تابش استاندارد به ترتیب ۲۹/۵ و ۱۰۰۰ بوده است. اطلاعات توربین‌های بادی، مطابق نوشتار ژائوکسیا[5] و همکاران (۲۰۱۷)،[۱۶] در نظر گرفته شده است. در شبکه‌ی بررسی‌شده، ۶ ذخیره‌ساز در سمت تقاضا وجود داشته است، که حجم هر منبع ذخیره‌ساز ۷۰۰۰ مترمکعب و کمینه و بیشینه‌ی سطح آب داخل آن، ۱۵ و ۹۰ درصد حجم کل بوده است. منبع مذکور، که برای تأمین آب استانی با ظرفیت حدودی ۱/۳ میلیونی استفاده شده است، در ارتفاع ۵ متری از سطح زمین قرار گرفته و خود آن نیز ۴ متر ارتفاع داشته است.

۲.۴. مقایسه‌ی عملکرد روش‌ها

مقایسه‌ی توان خروجی مجموعه‌ی نیروگاه‌های هیدروالکتریک با استفاده از دو روش MILP و ELM-GA در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

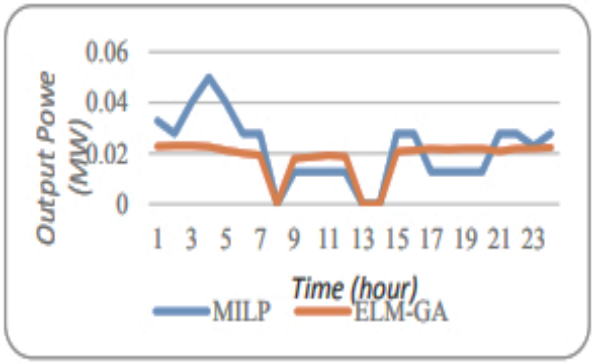
در روش MILP فقط از دو واحد برای تولید انرژی استفاده شده است. چون برای پاسخ به تقاضا، فقط به انرژی تولیدی دو واحد نیاز است و هزینه‌ها و



شکل ۲. داده‌های مربوط به تقاضا، سرعت باد، دما، و تابش شبکه‌ی موردنظر در یک شبانه‌روز (اول دی‌ماه ۱۴۰۰).

شکل ۳. مقایسه‌ی توان خروجی واحدهای هیدروالکتریک در دو روش MILP و ELM-GA.

[5] Zhaoxia



شکل ۴. مقایسه‌ی توان خروجی توربین‌های بادی در دو روش MILP و ELM-GA.

تلفات نیز باید به میزان کمینه برسند. روش MILP، استفاده از دو واحد را پیشنهاد کرده است و دو واحد دیگر در ۲۴ ساعت بررسی‌شده، انرژی تولید نکرده‌اند. پس هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات برای ۴ واحد محاسبه شده است، در حالی که آورده‌ای ندارند؛ اما تلفات نیروگاه را کمینه می‌سازند.

در روش ELM-GA، هر چهار واحد هیدروالکتریک موجود در ریزشبکه‌ی بررسی‌شده در هر ساعت از شبانه‌روز در حال کار بوده و انرژی تولید کرده‌اند. علاوه‌بر این، نتایج پژوهش حاضر و نتایج منتشرشده در نوشتار دهقانی و همکاران (2024)،[۱۹] نشان می‌دهند که واحدهای هیدروالکتریک در ظرفیتی کمتر از ظرفیت نامی خود مشغول به کار هستند و نیازی به تولید انرژی با بیشینه‌ی ظرفیت و توان برای پاسخ به تقاضا وجود ندارند.

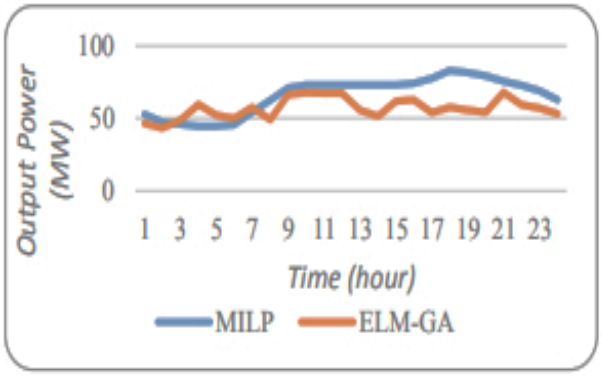
نتایج و ویژگی‌های روش یادگیری ماشین را با توجه به مسئله‌ی بررسی‌شده، می‌توان در این موارد دانست:

- در نیروگاه مجازی از موارد قبلاً احداث‌شده استفاده شده است، که در این صورت استفاده‌ی بیشینه از واحدهای موجود با کمینه‌ی هزینه بهتر خواهد بود.
- روش ذکرشده‌ی نیروگاه دیزلی می‌تواند با استفاده از نصف ظرفیت خود، تقاضا را پاسخ دهد. در نتیجه نیازی به کار در بیشینه‌ی ظرفیت نیست.

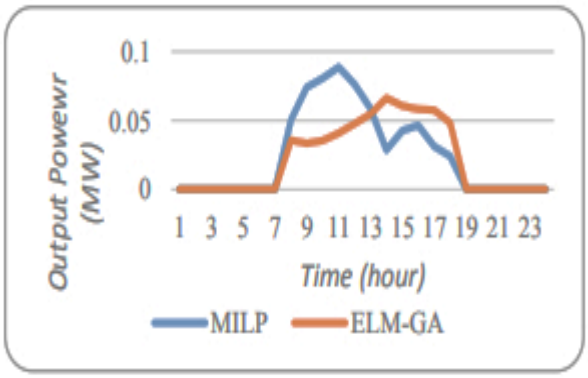
در شکل ۴، مقایسه‌ی توان واقعی مجموعه‌ی توربین‌های بادی با دو روش MILP و ELM-GA مشاهده می‌شود.

نتایج روش MILP به‌درستی نشان می‌دهند که توربین‌های بادی فقط در ۲۱ ساعتی که وزش باد کافی وجود داشته است، فعال بوده و توان تولید کرده‌اند و در ساعت‌های باقی‌مانده فعالیتی نداشته‌اند. نتیجه‌ی اخیر، همخوانی کامل عملکرد مدل را با شرایط ورودی باد تأیید می‌کند.

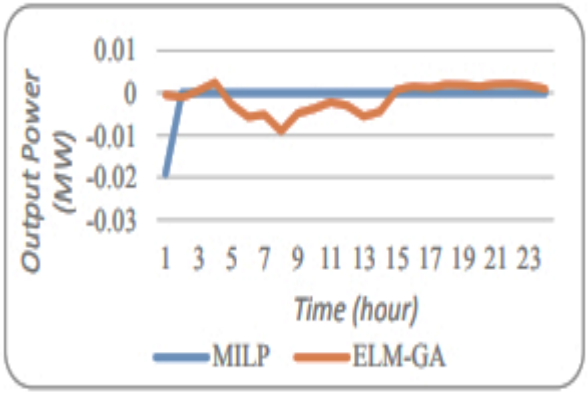
همچنین روش MILP تصریح می‌کند که کمینه‌ی هزینه‌های توربین‌های بادی در صورتی اتفاق می‌افتد که بار شبکه به میزان مساوی بین توربین‌های مشابه تقسیم شود. در نتیجه، توان تولیدی توربین‌های مشابه در هر ساعت به‌طوریکسان محاسبه شده است. اما نتایج به‌دست‌آمده از روش ELM-GA نشان می‌دهند که کاهش هزینه‌ها در تولید انرژی غیریکسان در توربین‌های مشابه اتفاق افتاده است. همچنین باید گفت که نوسان تولید انرژی از طریق توربین‌های بادی در روش ELM-GA به‌طورچشمگیری کمتر از روش MILP بوده است؛ که دلیل آن را می‌توان تولید غیرمشابهِ توربین‌های مشابه دانست.



شکل ۵. مقایسه‌ی توان خروجی نیروگاه دیزلی در دو روش MILP و ELM-GA.



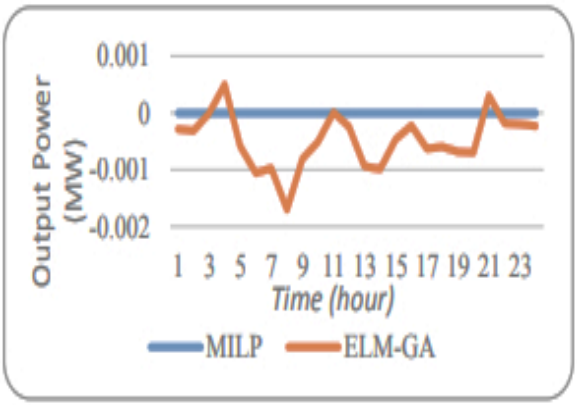
شکل ۶. مقایسه‌ی توان خروجی نیروگاه خورشیدی در دو روش MILP و ELM-GA.



شکل ۷. مقایسه‌ی توان خروجی ماشین الکتریکی در دو روش MILP و ELM-GA.

مقایسه‌ی توان واقعی نیروگاه دیزلی، نیروگاه خورشیدی، ماشین الکتریکی، و باتری با استفاده از دو روش MILP و ELM-GA، در شکل‌های ۵ الی ۸ مشاهده می‌شود.

نتایج روش MILP نشان می‌دهند که نیازی نیست تا نیروگاه دیزلی در توان نامی خود و یا حتی نزدیک به آن کار کند؛ بلکه فقط کافی است با بیشینه‌ی حدود ۸۳٪ ظرفیتش کار کند. نیروگاه خورشیدی نیز فقط در ۱۰ ساعت انرژی تولید می‌کند و در شبکه حضور دارد؛ زیرا مقدار تابش مناسب برای به‌کار افتادن پنل‌ها فقط در همان ۱۰ ساعت وجود دارد. روش اخیر نشان می‌دهد که در شبانه‌روز بررسی‌شده، نیازی به حضور باتری نیست و فقط هزینه‌ی وجود باتری به سیستم تحمیل می‌شود. لذا، با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان باتری یا به نوعی ذخیره‌ساز سمت عرضه را از سیستم حذف کرد. اما در ساعت اولیه‌ی روز نیاز است تا ماشین الکتریکی در



شکل ۸. مقایسه‌ی توان خروجی باتری در دو روش MILP و ELM-GA.

بیشینه‌ی توان خود شارژ شود؛ تا علاوه‌بر کاهش هزینه‌ها، شکاف بین عرضه و تقاضا نیز کاهش یابد؛ زیرا در آن ساعت، مازاد تولید اتفاق می‌افتد.

با توجه به شکل‌های اخیر می‌توان این موارد را استنتاج کرد:

- نیروگاه دیزلی در روش ELM-GA، نوسان بیشتری را تجربه می‌کند؛ اما فقط از حدود نصف ظرفیت نامی برای تولید انرژی استفاده می‌کند. این در حالی است که در روش MILP از حدود۸۳٪ ظرفیت نامی بهره می‌برد.

- بیشینه‌ی تولید نیروگاه خورشیدی در روش MILP در حدود ۷ صبح اتفاق می‌افتد؛ اما در روش ELM-GA ، بیشینه‌ی تولید در ۱۱ صبح اتفاق می‌افتد.

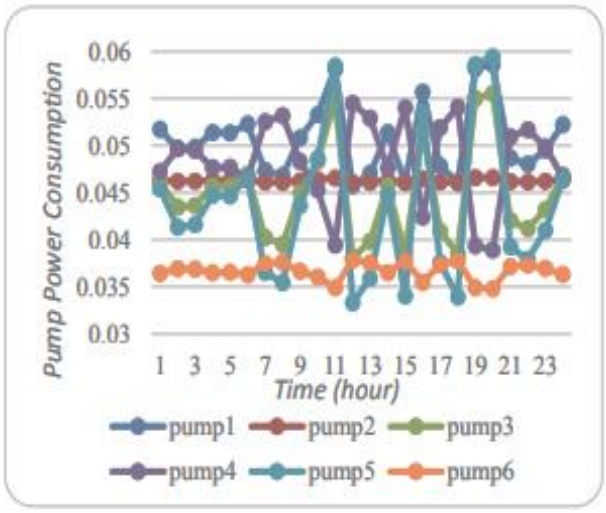
- در روش MILP ماشین الکتریکی فقط در ساعت اول شارژ می‌شود؛ اما در روش ELM-GA، ماشین الکتریکی شارژ و تخلیه را با توجه به نیاز شبکه در ساعت‌های مختلف تجربه می‌کند.

- باتری در روش MILP هیچ شارژ و تخلیه‌ای را تجربه نمی‌کند و فقط هزینه‌ی نگهداری را به سیستم تحمیل می‌کند؛ اما در روش ELM-GA، باتری نیز در نیروگاه مجازی نقش دارد و شارژ و تخلیه را تجربه می‌کند.

۳.۴. تحلیل سناریوها

مقدار تابع هدف مربوط به نیروگاه مجازی در روش MILP، یعنی سود حاصل برابر با مقدار ۱۳۵۰- میلیون تومان به‌دست آمده است. البته با توجه به اینکه مقدار درآمد از هزینه‌ها کمتر بوده است، مقدار به‌دست‌آمده، زیان شبکه را نشان می‌دهد. مقدار تابع هدف مربوط به نیروگاه مجازی در روش ELM-GA برابر با مقدار ۱۶۷۸- میلیون تومان به‌دست آمده است؛ که نشان می‌دهد هزینه‌ها در روش ELM-GA بیشتر از روش MILP است و جواب روش قبل بر بهینه‌ی کلی دلالت دارد. روش ELM-GA به نقطه‌ی بهینه نزدیک شده است، اما نتوانسته است به بهینه‌ی کل دست پیدا کند.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده از روش MILP، وجود توان رزرو برای هر واحد نیروگاه هیدروالکتریک در ساعت‌های مختلف ضروری است. حتی با اینکه ۲ واحد از ۴ واحد در شبانه‌روز موردبحث انرژی تولید نمی‌کنند، در ساعت‌های مختلف نیاز به توان رزرو دارند. روش موردنظر برای کمینه‌ساختن هزینه‌ی عملیاتی پمپ‌ها پیشنهاد داده است که هر ۶ پمپ یک ذخیره‌ساز، در تمامی



شکل ۹. توان مصرفی پمپ‌های ذخیره‌ساز از روش ELM-GA .

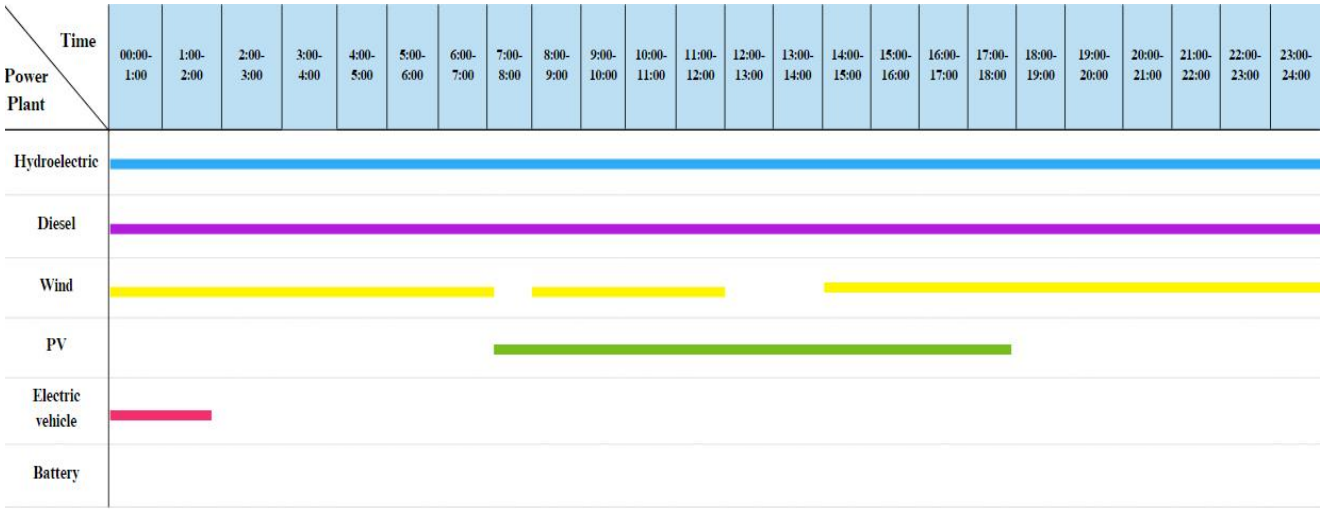
ساعت‌های شبانه‌روز روشن و در بیشینه‌ی توان خود، یعنی ۹۰ کیلووات، در حال کار باشند. در نتیجه، توان مصرفی هر ۶ ذخیره‌ساز در همه‌ی ساعت‌های شبانه‌روز یکسان و برابر با ۵۴۰ کیلووات به‌دست آمده است. همچنین تلفات تولید نیروگاه‌های هیدروالکتریک نیز برابر با مقدار ۸۳۲۷۱۰/۲ بوده است. هزینه‌ی عملیاتی کل پمپ‌ها را می‌توان برابر با مقدار ۷۶۱/۱ و $C_{op.p}$=۳۶۷۹۴/۶ تومان محاسبه کرد.

نتایج حاصل از روش ELM-GA، وجود توان رزرو را در هر ساعت و برای واحدهای درگیر تولید انرژی نشان می‌دهد. مطابق نتایج اخیر، در هر ۶ پمپ، یک ذخیره‌ساز در تمامی ساعت‌های شبانه‌روز روشن بوده است و توان مصرفی آن‌ها در شکل ۹ مشاهده می‌شود. در روش ELM-GA نیز مانند روش MILP، پمپ‌ها در همه‌ی ساعت‌ها روشن بوده‌اند، اما با ظرفیت کمتر کار کرده‌اند. همچنین تلفات تولید نیروگاه‌های هیدروالکتریک نیز برابر با مقدار ۸۶۰۹۲۲ به‌دست آمده است، که از مقدار به‌دست‌آمده در روش قبل بیشتر بوده است، زیرا جواب به‌دست‌آمده از روش قبل بر بهینه‌ی کل دلالت دارد.

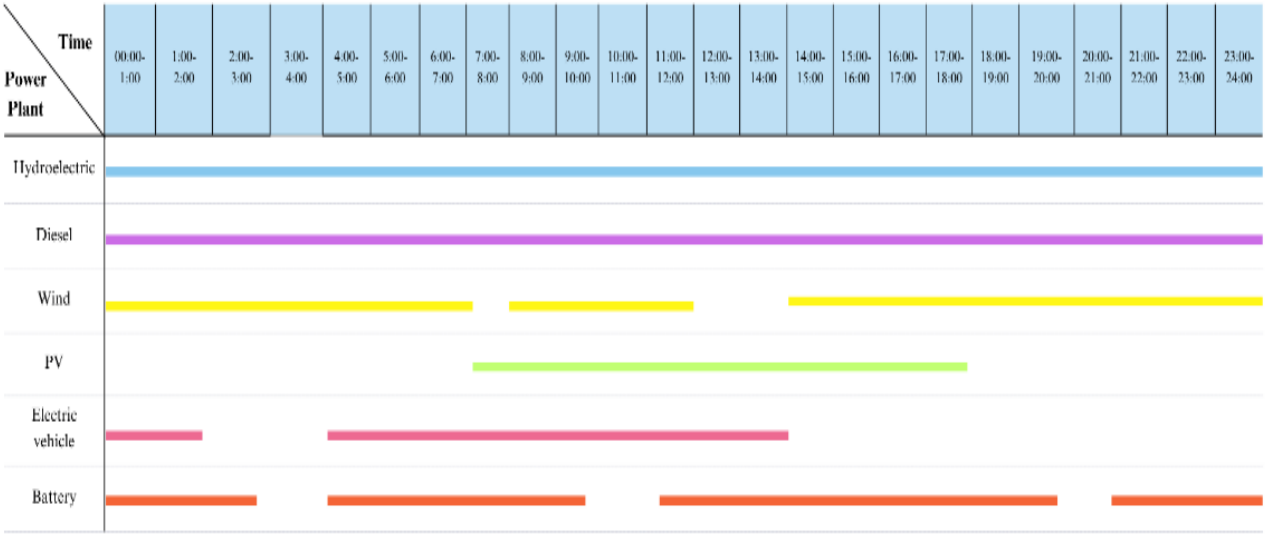
هزینه‌ی عملیاتی کل پمپ‌ها را می‌توان برابر مقدار ۲۶۴۸۷۳ و $C_{op.p}$=۱۲۷۸۹۶۲۴/۳۶ تومان محاسبه کرد، که افزایش فاحش نسبت به روش MILP را نشان می‌دهد.

روش MILP برای کمینه‌ساختن هزینه‌ها و تلفات تا جای ممکن سعی می‌کند عناصر درگیر در نیروگاه مجازی، به میزان کمینه حضور داشته باشند؛ ولی با بیشینه‌ی توان موردنیاز استفاده شوند. علاوه‌بر این، نشان داده شده است که برای رسیدن به اهداف تعریف‌شده، تقسیم بار بین واحدهای مشابه و تولید مقادیر انرژی مشابه از طریق واحدهای مذکور بر سایر روش‌ها ارجحیت دارد. اما در روش ELM-GA، همه‌ی عناصر نیروگاه مجازی به انجام وظایف خود پرداخته و هیچ‌کدام هزینه‌ی نگهداری را بدون داشتن آورده‌ای به سیستم تحمیل نکرده‌اند. درنهایت، مشارکت بهینه‌ی واحدها در در دو روش، در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود.

در شرایط ذکرشده و بدون حضور و استفاده از نیروگاه مجازی و مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا، نیروگاه‌ها باید به‌تنهایی کار کنند و در هر ساعت، با توجه به شرایط جوی، توان تولیدی بیشینه را فراهم سازند. همچنین در شرایط واقعی، باتری و ماشین الکتریکی در زمانی که مازاد تولید وجود دارد، شارژ و در ساعت‌های پیک



شکل ۱۰. مشارکت واحدهای درگیر در نیروگاه مجازی در روش MILP.



شکل ۱۱. مشارکت واحدهای درگیر در نیروگاه مجازی در روش ELM-GA .

مصرف تخلیه می‌شوند. اما نتایج حاصل از روش‌های پیشنهادی، تصمیم‌های دیگری را برای دو عضو مذکور اتخاذ کرده‌اند. در این حالت، سود فروش انرژی به مقدار ۳۰۱۵۷۷۰۰۱۰۰- رسیده است. این رقم درحالی به‌دست آمده است که سود روش برنامه‌ریزی خطی برابر با ۱۳۵۰- و سود روش یادگیری ماشین برابر با ۱۶۷۸- بوده است. مقایسه‌ی اعداد نشان می‌دهد که استفاده از نیروگاه مجازی در کاهش زیان مؤثر و راه‌حل مناسب‌تری نسبت به بازار انحصاری بوده است. ناندکئولیار و کومار ری (۲۰۲۲)،[۱۰] شبکه‌ای سنتی به همراه مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا را در نظر گرفته و تعداد دفعه‌های تغییر وضعیت پمپ‌ها از روشن به خاموش و بالعکس را در حالت MILP برابر با ۱۱۰۸ و در حالت استفاده از الگوریتم ELM-GA برابر با ۷۸۲ بار در یک شبانه‌روز به‌دست آورده‌اند. همچنین نمودارهای ارائه‌شده در پژوهش اخیر نشان می‌دهند که توان مصرفی پمپ‌ها در هر ساعت متفاوت بوده و نوسان را تجربه کرده‌اند.

با توجه به نتایج، دفعه‌های تغییر پمپ‌ها به وضعیت روشن و خاموش در هر دو حالت حل از مقادیر به‌دست‌آمده در نوشتار ناندکئولیار و کومار ری (۲۰۲۲)،[۱۰] کمتر بوده و توان مصرفی پمپ‌ها نیز نوسان کمتری را تجربه کرده‌اند. در نتیجه، هزینه‌های عملیاتی پمپ‌ها و هزینه‌ی ذخیره‌سازها در پژوهش حاضر

جدول ۵. مجموع توان نامی هر نوع نیروگاه بررسی‌شده در مطالعه‌ی ژائوکسیا و همکاران.[۱۶]

Power plant	Diesel	Solar	Wind	Battery
Total rated power (kW)	30	40	50	4

نسبت به پژوهش ذکرشده کاهش یافته است، که می‌تواند نشانگر تأثیر استفاده و بهره‌گیری از نیروگاه مجازی در کاهش هزینه‌ها باشد.

برای مقایسه‌ی عملکرد نیروگاه مجازی در حضور مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا و عدم حضور آن، پژوهش حاضر با پژوهش ژائوکسیا و همکاران (۲۰۱۷)،[۱۶] مقایسه شده است؛ که ایشان، یک نیروگاه مجازی شامل ۶ توربین بادی، ۴ پنل خورشیدی، ۱ واحد نیروگاه دیزلی، و ۱ باتری را در نظر گرفته و توان خروجی هر واحد و هزینه‌های آن‌ها را محاسبه کرده‌اند. مجموع توان هر نوع نیروگاه بررسی‌شده توسط ایشان، در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۶. مقایسه‌ی توان‌های واقعی تولیدی با نوشتار ژائوکسیا و همکاران (۲۰۱۷)،[۱۶] (کیلووات).

Time	[16]	MILP	ELM-GA
00:00-1:00	29.6	43.7	156.3
1:00-2:00	19.2	42.1	157.9
2:00-3:00	25.6	54.0	166.5
3:00-4:00	13.8	63.4	180.5
4:00-5:00	11.5	73.4	177.6
5:00-6:00	11.1	70.6	173.8
6:00-7:00	18.9	76.0	172.4
7:00-8:00	30.9	54.0	150.8
8:00-9:00	58.6	64.5	157.5
9:00-10:00	34.0	58.3	153.2
10:00-11:00	75.6	46.2	146.7
11:00-12:00	69.8	52.3	150.0
12:00-13:00	63.2	41.0	138.8
13:00-14:00	60.2	34.8	135.9
14:00-15:00	80.5	59.6	155.2
15:00-16:00	60.0	50.1	151.9
16:00-17:00	48.3	35.9	140.6
17:00-18:00	44.7	37.6	138.8
18:00-19:00	31.5	37.2	139.4
19:00-20:00	30.0	36.5	140.1
20:00-21:00	30.0	50.6	148.5
21:00-22:00	30.0	48.7	150.0
22:00-23:00	32.6	48.6	151.2
23:00-24:00	29.6	46.7	153.1

جهت مقایسه‌ی نتایج پژوهش حاضر با نتایج نوشتار ژائوکسیا و همکاران (۲۰۱۷)،[۱۶] واحدهای تولیدکننده‌ی انرژی باید متناسب‌سازی شوند؛ بدین صورت که واحدهای هیدروالکتریک و ماشین الکتریکی از پژوهش حاضر حذف و مجموع توان نامی واحدهای باقی‌مانده مطابق جدول ۵ در نظر گرفته شده و توان‌های واقعی به‌دست‌آمده در بخش‌های قبل، متناسب‌سازی شده‌اند. در بخش حاضر، وابستگی توان تولیدی به تقاضا نادیده گرفته شده است.

مجموع توان واقعی تولیدی توسط واحدهای دو پژوهش بررسی‌شده در هر ساعت شبانه‌روز، در جدول ۶ ارائه شده‌اند؛ که مطابق آن، توان تولیدی در نیروگاه مجازی با حضور مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا بیشتر از حالت عدم حضور مدیریت‌کننده بوده است؛ در نتیجه، هزینه‌ها نیز در حضور مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا بیشتر بوده است، که می‌تواند ناشی از نیاز پمپ‌ها به مصرف انرژی علاوه‌بر تقاضای مؤثر شبکه باشد. با وجود افزایش هزینه‌ها در کوتاه‌مدت، نوسان انرژی تولیدی در حالتی که مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا وجود دارد، کمتر از حالت دیگر است. به‌عبارت دیگر، کاهش نوسان می‌تواند نشان‌دهنده‌ی کاهش شکاف بین عرضه و تقاضا باشد، که یکی از اهداف اصلی استفاده از نیروگاه مجازی است. همچنین می‌توان اظهار داشت که کاهش نوسان تولید انرژی، فشار کمتری به شبکه و نیروگاه موردنظر وارد می‌کند و هزینه‌ها، به‌خصوص هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات را در بلندمدت کاهش می‌دهد.

۴.۴. تحلیل حساسیت

کارایی الگوریتم ترکیبی ELM-GA، ریشه در نقش کلیدی مؤلفه‌ی یادگیری ماشین (ELM) در بهبود فرآیند بهینه‌سازی دارد. در صورت حذف بخش ELM، الگوریتم به یک الگوریتم ژنتیک (GA) استاندارد تبدیل می‌شود، که برای رسیدن به جواب با کیفیت، نیازمند بودجه‌ی محاسباتی بسیار بالایی (شامل جمعیت بزرگ‌تر و تعداد نسل‌های بیشتر) و در نتیجه، زمان حل طولانی‌تری است. در ساختار ترکیبی، ELM به‌عنوان یک عملگر هوشمند، با یادگیری الگوهای موجود در جواب‌های برتر، جستجوی الگوریتم ژنتیک را به سمت مناطق امیدبخش‌تر فضای جواب هدایت می‌کند. فرآیند اخیر، هم از همگرایی زودرس جلوگیری می‌کند و هم سرعت رسیدن به یک جواب همگراتر و باکیفیت‌تر را به‌طورقابل‌توجهی تسریع می‌سازد.

برای مقایسه‌ی سرعت و کیفیت حل دو روش مذکور، براساس تعداد واحدهای حاضر در نیروگاه مجازی، مسائلی با داده‌های تصادفی در سه محدوده‌ی ابعادی کوچک (تا ۲۰ واحد نیروگاهی)، متوسط (۲۰ تا ۴۰ واحد نیروگاهی) و بزرگ (۴۰ تا ۶۰ واحد نیروگاهی) در نظر گرفته شده‌اند. برای تحلیل اخیر، واحدهای جدید به‌صورت تصادفی و با مشخصات فنی و اقتصادی مشابه با انواع واحدهای تعریف‌شده در مطالعه‌ی موردی اصلی (شامل واحدهای: دیزلی، خورشیدی، بادی، و...) تولید شده‌اند. بازه‌ی زمانی ۴۸ ساعت برای رسیدن به پاسخ معین شده است. در مقایسه‌ی انجام‌شده، مقدار جمعیت در روش ELM-GA برابر ۱۰ و تعداد تولید نسل برابر ۵۰ در نظر گرفته شده است؛ که نتایج آن در جدول‌های ۷ الی ۹ ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول‌های اخیر مشخص است، در مسائلی با ابعاد کوچک و متوسط، روش MILP علاوه‌بر دستیابی به بهینه‌ی کلی، زمان کمتری نیز در رسیدن به جواب صرف کرده است. این در حالی است که در روش ELM-GA نه فقط زمان بیشتری صرف شده است، بلکه مقدار نزدیک به بهینه به‌دست آمده است. اما با بالارفتن ابعاد مسئله و رسیدن به ۶۰ واحد، زمان روش MILP به‌طرزچشمگیری بالا رفته است، در حالی که در روش دیگر زمان بسیار کمتری صرف شده است. با توجه به نتایج سایر مسئله‌ها و نزدیک‌بودن جواب به‌دست‌آمده از روش ELM-GA به بهینه‌ی کلی، می‌توان در مسائلی با ابعاد بزرگ از روش اخیر برای صرف زمان کمتر استفاده کرد و اطمینان داشت که جواب به‌دست‌آمده به بهینه‌ی کلی نزدیک است.

از این ویژگی می‌توان برای توسعه‌ی زیرساخت‌های تولید انرژی متناسب با تغییر تقاضا و تعریف سیاست‌های مناسب استفاده کرد. بدین صورت که با استفاده از داده‌های پیشین و تاریخچه‌ی هواشناسی و مصرف انرژی در مکانی خاص، ماشین آموزش داده می‌شود و سپس به‌وسیله‌ی داده‌ها و پیش‌بینی‌های هواشناسی روزهای آتی، از ماشین خواست تا پیش‌بینی تقاضای انرژی در روزهای موردنظر را ارائه کند. در نتیجه، با صرف زمانی کمتر، نتایجی نزدیک به بهینه به‌دست می‌آید، که می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری باشد.

جدول ۷. مقایسه‌ی سرعت و کیفیت حل دو روش MILP و ELM-GA در مسائلی با ابعاد کوچک.

Number of units	Solution time (seconds)		Objective function (million)		Optimality gap (%)
	MILP	ELM-GA	MILP	ELM-GA	
10	0.129	4.5	-991.3	-1036	45.1
12	0.137	5	-1022.5	-1177	15.1
14	0.252	7	-1022.5	-1215	18.8
16	0.255	9	-1022.6	-1285	25.7
18	0.258	11	-1922.6	-1340	31.0

جدول ۸. مقایسه‌ی سرعت و کیفیت حل دو روش MILP و ELM-GA در مسائلی با ابعاد متوسط.

Number of units	Solution time (seconds)		Objective function (million)		Optimality gap (%)
	MILP	ELM-GA	MILP	ELM-GA	
20	0.42	23	-2124.97	-2173	2.3
24	0.97	67	-2125	-2320	9.2
28	1.45	94	- 2125.02	-2338	10.0
32	1.80	131	- 2125.03	-2341	10.2
36	2.54	173	- 2125.01	-2397	12.8

جدول ۹. مقایسه‌ی سرعت و کیفیت حل دو روش MILP و ELM-GAدر مسائلی با ابعاد بزرگ.

Number of units	Solution time		Objective function		Optimality gap (%)
	MILP	ELM-GA	MILP	ELM-GA	
42	6 (s)	14 (min)	-3227	-3886	20.4
50	100 (s)	56 (min)	-4330	-4755	10.3
60	More than 48 hour	180 (min)	-5432	-5670	4.4

۵. نتیجه‌گیری

هدف از انجام پژوهش حاضر، تشویق به گذر از بازار انحصاری با احداث نیروگاه مجازی و کاهش شکاف بین عرضه و تقاضا با استفاده از ذخیره‌سازها در سمت تقاضا بوده است؛ که با مقایسه‌ی شبکه‌ی برق سنتی با نیروگاه مجازی در حضور و عدم‌حضور مدیریت‌کننده‌ی سمت تقاضا و بررسی سود و زیان ناشی آن دنبال شده است. از اهداف دیگر پژوهش حاضر، می‌توان به استفاده از یادگیری ماشین برای افزایش سرعت حل مدل‌ها و پیش‌بینی جهت برنامه‌ریزی آینده اشاره کرد. فراتر از نتایج فنی، یافته‌های پژوهش حاضر، بینش‌های مدیریتی مهمی را برای سیاست‌گذاران و مدیران این حوزه فراهم کرده است. اولاً، توجیه‌پذیری اقتصادی چارچوب نیروگاه مجازی به‌عنوان یک جایگزین برتر برای شبکه‌ی سنتی، یک دلیل محکم برای سرمایه‌گذاری در تجمیع منابع انرژی پراکنده است. ثانیاً، نتایج نشان می‌دهند که مدیریت سمت تقاضا، علی‌رغم هزینه‌های عملیاتی اولیه، یک سرمایه‌گذاری راهبردی بلندمدت برای افزایش پایداری شبکه و کاهش هزینه‌های آتی نگهداری است. درنهایت، مقایسه‌ی روش‌های حل به مدیران نشان می‌دهد که برای تصمیم‌گیری‌های راهبردی و آفلاین، دقت روش‌های دقیقی مانند MILP ارجحیت دارد، در حالی که برای عملیات روزانه و آنلاین که سرعت، یک مسئله‌ی حیاتی است، ابزارهای هوشمند و سریع (ELM-GA) کارایی بسیار بیشتری دارند.

مدل پیشنهادی شامل بیشینه‌سازی تابع سود و کمینه‌سازی تلفات نیروگاه هیدروالکتریک و هزینه‌ی عملیاتی پمپ‌ها بوده و با درنظرگرفتن عدم قطعیت تقاضا و شرایط آب‌وهوایی در شبانه‌روز، با استفاده از روش‌های MILP و ELM-GA حل و نتایج مقایسه شده‌اند. در پژوهش‌های آینده می‌توان مواردی از جمله بررسی و مدل‌سازی بازار رقابت عمده‌فروشی، درنظرگرفتن خرابی‌های برنامه‌ریزی‌نشده، و سایر الگوریتم‌های یادگیری ماشین را بررسی کرد.

References - منابع

1. Awerbuch, S. and Preston, A., 1997. The Virtual Utility: Accounting, Technology & Competitive Aspects of the Emerging Industry. *Springer: Berlin/Heidelberg*. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=BX3rBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR13&dq=1.%09Awerbuch,+S.,+Preston,+A,.+1997.+The+Virtual+Utility:+Accounting,+Technology+%26+Competitive+Aspects+of+the++++Emerging+Industry.+Springer:+Berlin/Heidelberg&ots=n5ySfEIyFp&sig=64S7tKZufYrpka9Zw4gI429REpM
2. Borenstein, S. and Bushnell, J., 2015. The U.S. electricity industry after 20 years of restructuring. *National Bureau of Economic Research, 7*(1), *pp.*437-463. https://doi.org/10.1146/annurev-economics-080614-115630
3. Narkhede, M., Chatterji, S. and Ghosh, S., 2013. Multi objective optimal dispatch in a virtual power plant using genetic algorithm. *International Conference on Renewable Energy and Sustainable Energy*. https://doi.org/10.1109/ICRESE.2013.6927822
4. Mao, T., Guo, X., Xie, P., Zhou, J., Zhou, B., Han, S., Wu, W. and Sun., L., 2020. Virtual power plant platforms and their applications in practice: a brief review. 2020 *IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC) pp.*2071-2076. *IEEE*. 10.1109/iSPEC50848.2020.9351147
5. Abdelaziz, Y. A., Hegazy, Y. G., Elkhattam, W. and Othman, M., 2013. Virtual power plant: The future of power delivery systems. *Second European Workshop on Renewable Energy Systems*. *pp.*1-2. https://www.academia.edu/download/72762869/VIRTUAL_POWER_PLANT_THE_FUTURE_OF_POWER_20211015-20727-10e0k2l.pdf
6. Rouzbahani, H. M., Karimipour, H. and Lei, L., 2021. A review on virtual power plant for energy management. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *47, pp.*101370. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101370
7. Warren, P., 2014. A review of demand-side management policy in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 29, pp.*941-951. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.009
8. Park, S. and Son, S., 2020. Interaction-based virtual power plant operation methodology for distribution system operator's voltage management. *Applied Energy, 271, pp.*115222. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115222
9. Aguilar, J., Bordons, C. and Arce, A., 2021. Chance Constraints and Machine Learning integration for uncertainty management in Virtual Power Plants operating in simultaneous energy markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 133, pp.*107304. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107304
10. Nandkeolyar, S. and KumarRay, P., 2022. Multi objective demand side storage dispatch using hybrid extreme learning machine trained neural networks in a smart grid. *Journal of Energy Storage, 51, pp.*104439. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104439
11. Kabirifar, M., Pourghaderi, N. and Moeini-Aghtaie, M., 2022. Optimal operation strategy of virtual power plant considering EVs and ESSs. *Scheduling and Operation of Virtual Power Plants*, *pp.*257-297. https://doi.org/10.1016/B978-0-32-385267-8.00017-2
12. Ali, Y., 2023. A novel machine learning-based power trading algorithm (MLPTA) for demand side management (DSM). *2023 International Conference on Emerging Power Technologies (ICEPT) pp.*1-5. *IEEE*. https://doi.org/10.1109/ICEPT58859.2023.10152394
13. Karimi, H., Jadid, S. and Hasanzadeh, S., 2023. Optimal-sustainable multi-energy management of microgrid systems considering integration of renewable energy resources: A multi-layer four-objective optimization. *Sustainable Production and Consumption, 36, pp.*126-138. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.025
14. Ahmadian, A., Ponnambalam, K., Almansoori, A. and Elkamel, A., 2023. Optimal management of a virtual power plant consisting of renewable energy resources and electric vehicles using mixed-integer linear programming and deep learning. *Energies, 16*(2), *pp.*1000. https://doi.org/10.3390/en16021000
15. Singh, S., Subburaj, V., Sivakumar, K., Kumar, R., Muthuramam, M. S., Rastogi, R., Patil, V. R. and Rajaram, A., 2024. Optimum power forecasting technique for hybrid renewable energy systems using deep learning. *Electric Power Components and Systems, pp.*1-18. https://doi.org/10.1080/15325008.2024.2316251
16. Zhaoxia, X., Jiakai, N., Guerrero, J. and Hongwei, F., 2017. Multiple time-scale optimization scheduling for islanded microgrids including PV, wind turbine, diesel generator and batteries. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp.*2594-2599. *IEEE*. https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216436
17. Ullah, Z., Arshad, and Hassanin, H., 2017. Modeling, optimization, and analysis of a virtual power plant demand response mechanism for the internal electricity market considering the uncertainty of renewable energy sources. *Energies, 15*(14), *pp.*5296. https://doi.org/10.3390/en15145296

18. Fleischer, C., Waag, W., Bai, Z. and Sauer, D.U., 2013. Adaptive on-line state-of-available-power prediction of lithium-ion batteries. *Journal of Power Electronics, 13*(4), *pp.*516-527. https://doi.org/10.6113/JPE.2013.13.4.516

19. Dehghani, B., Lotfi, M. and Sedighi, A., 2024. Development of machine learning algorithm for energy supply management in virtual power plant. https://ganj.irandoc.ac.ir/#/articles/0e46b15100029e1032001d2255207137. [In Persian]

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 127-139

Sharif University of Technology

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



Research Note

Analytical Based Simulation Modeling for Short-Term and Long-Term Planning in Open Pit Mining

Milad Abolghasemian[1], Maryam Daneshmand-Mehr [2] and Erfan Hasannayebi*[3]

[1]Department of Industrial Engineering, Ayandegan University, Tonekabon, Iran.
[2]Department of Industrial engineering, Branch of lahijan, Islamic Azad University, Lahijan, Iran
[3]Department of Industrial Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran
* corresponding author: (hassannayebi@sharif.edu)

Article Info

Article history:

Received:29 October 2023

Revised:25 May 2024

Accepted:23 July 2024

Keywords:

Hierarchical framework,
simulation based on optimization,
long-term planning,
short-term planning,
design of experiment.

Abstract

Open-pit mining operations are complex and multifaceted, requiring meticulous planning to optimize resource extraction, operational efficiency, and cost-effectiveness. In this paper, a two-level hierarchical framework based on simulation is presented for production planning and material loading machines in Iran's largest open-pit copper mine. Analytical-based simulation modeling offers a powerful tool for mining engineers and planners to simulate various scenarios, assess the impact of different decisions, and optimize mining operations. By integrating mathematical models, statistical analysis, and simulation techniques, this approach enables the evaluation of alternative strategies, risk assessment, and performance forecasting in open-pit mining environments. This paper aims to explore the application of analytical-based simulation modeling in the context of short-term and long-term planning in open-pit mining. It will delve into the methodology, tools, and techniques employed in developing simulation models for optimizing operational processes, enhancing productivity, and mitigating risks in open-pit mining operations. The study will also highlight the benefits, challenges, and future prospects of utilizing analytical-based simulation modeling for effective planning and decision-making in the dynamic field of open-pit mining. To solve the problem of planning machinery in mining, a planning problem has been formulated and applied in the framework of the proposed two-level hierarchical method. The Opt Quest software package to solve the optimization problem at the high level of the proposed framework in order to prepare a long-term optimal production plan. At the lower level of the framework, with the help of a meta-modeling approach, a deterministic function has been fitted to accurately estimate the number of loading machines by determining the optimal number of shovels using the design of experiments. The calculations performed in this mining complex show how the proposed framework can have a favorable effect on the amount of production, material handling costs and income. By embracing analytical-based simulation modeling, mining managers can make informed decisions, mitigate risks, and drive operational excellence in open-pit mining environments. This approach empowers managers to proactively address challenges, capitalize on opportunities, and steer mining operations towards greater efficiency, profitability, and sustainability in both the short and long term.

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:
Abolghasemian, M., Daneshmand-Mehr, M. and Hasannayebi, E. 2026. Analytical based simulation modeling for short-term and long-term planning in open pit mining, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.127-139. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64326.2401

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

یادداشت فنی

مدل‌سازی تحلیلی مبتنی بر شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در معدن روباز

میلاد ابوالقاسمیان[۱]، مریم دانشمندمهر[۲] و عرفان حسن نایبی*[۳]

[۱] گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مدیریت راهبردی، دانشگاه آیندگان، تنکابن، ایران.

[۲] گروه مهندسی صنایع، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان، ایران .

[۳] دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (hassannayebi@sharif.edu)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت ۱۴۰۳/۰۴/۱۲

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۷/۱۱

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۸/۱۴

واژگان کلیدی:

چارچوب سلسله‌مراتبی،

شبیه‌سازی مبتنی بر بهینه‌سازی،

برنامه‌ریزی بلندمدت،

برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت،

طراحی آزمایش.

چکیده

در نوشتار حاضر، یک چارچوب سلسله‌مراتبی دوسطحی مبتنی بر شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی تولید و ماشین‌آلات بارگذاری مواد در بزرگ‌ترین معدن روباز مس ایران ارائه شده است. برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی ماشین‌آلات در معدن، یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی فرمول‌بندی‌شده و در چارچوب روش سلسله‌مراتبی دوسطحی پیشنهادی استفاده شده است. از بسته‌ی نرم‌افزاری Opt Quest برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی در سطح بالای چارچوب پیشنهادی به‌منظور تهیه‌ی یک برنامه‌ی بلندمدت بهینه‌ی تولیدی استفاده شده است. در سطح پایین چارچوب، به کمک رویکرد شبه مدل‌محور یک تابع قطعی جهت برآورد دقیق میزان ماشین‌آلات بارگذاری با تعیین مقدار بهینه‌ی بیل‌های مکانیکی با استفاده از طراحی آزمایش‌ها، یک برنامه‌ی کوتاه‌مدت متناسب‌سازی شده است. محاسبات انجام‌شده در مجتمع معدنی مس سرچشمه نشان می‌دهد که چگونه چارچوب پیشنهادی قادر است در میزان تولیدها، هزینه‌های جابجایی مواد، و درآمد، اثر مطلوب بگذارد.

۱. مقدمه

یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین پایه‌های اقتصاد هر کشور، منابع معدنی و ذخایر تحت‌الارضی آن کشور است. امروزه، سنگ معدنی مس، به‌عنوان یکی از منابع تأمین درآمد در جهان بشمار می‌رود؛ بر این اساس، به‌دلیل وابستگی زیاد به تأمین درآمد یک کشور به آن، ضروری است تا هزینه‌های موجود در درون یک معدن، که شامل: مراحل اکتشاف، حمل‌ونقل، و... است، کاهش یابد. بخش معدن، به‌عنوان یکی از حفره‌های زیربنایی اقتصاد، نقش اساسی در تأمین مواد اولیه‌ی صنایع دیگر را نیز دارد و توسعه‌ی سرمایه‌گذاری در بخش معدن می‌تواند موجب کسب ارزش افزوده‌ی مناسب در بسیاری از بخش‌های دیگر اقتصادی کشور شود. نقش معادن و منابع در رشد اقتصادی هر کشوری انکارناپذیر است. بدون تردید، بهره‌برداری صحیح از معادن کشور، یک عامل مثبت و مهم در رشد و توسعه‌ی اقتصادی محسوب می‌شود. در بین تمامی اجزاء صنایع معادن، سیستم جابجایی، نقش قابل‌توجهی در هزینه‌های عملیاتی معادن دارد.[۱]

هر تن سنگ مس بارگذاری‌شده در کامیون‌ها نزدیک به ۱۰۰ هزار دلار ارزش دارد.[۲] به همین دلیل، یک معدن مس می‌تواند درآمد خود را در هر روز از طریق تولید بیشتر افزایش دهد. برای بیشینه‌سازی میزان تولیدها و به‌دنبال آن، افزایش درآمد در هر روز، یک چارچوب سلسله‌مراتبی مبتنی بر شبیه‌سازی در نوشتار حاضر ارائه شده است. برنامه‌ریزی سلسله‌مراتبی، یک ابزار مفید برای کاهش فضای متغیر تصمیم مسئله‌ی پیچیده محسوب می‌شود.[۳] زیرا، معادن شامل چند پارامتر احتمالی هستند، که مدل‌سازی از طریق روش‌های سنتی، آن را خیلی پیچیده می‌سازد. در سیستم‌های مذکور، درنظرگرفتن تمام جنبه‌های مسئله از طریق مدل‌سازی ریاضی امکان‌پذیر نیست؛ زیرا در مدل‌سازی ریاضی فرض می‌شود که پارامترها قطعی هستند. یکی از مناسب‌ترین روش‌هایی که می‌تواند برای شناخت وضعیت جاری سیستم‌های اخیر استفاده شود، ابزار قدرتمند شبیه‌سازی است.[۴] شبیه‌سازی، تقلیدی از عملکرد فرآیند یا سیستم واقعی با گذشت زمان است، که این امکان را برای کاربر فراهم می‌سازد تا با انجام آزمایش، رفتار سیستم واقعی را حدس بزند.[۵]

مزیت اصلی چارچوب توسعه داده‌شده این است که قادر به انجام راستی‌آزمایی برنامه‌ریزی تولید در سطح بالایی است. برای حل مسئله‌ی موجود به کمک چارچوب پیشنهادی لازم است یک برنامه بهینه‌سازی و مدل ریاضی توسعه داده شوند، که سطوح اصلی الگوی ذکرشده به حساب می‌آیند. سطح پایین

استناد به این مقاله:

ابوالقاسمیان، میلاد، دانشمندمهر، مریم و حسن نایبی، عرفان، ۱۴۰۴. مدل‌سازی تحلیلی مبتنی بر شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در معدن روباز . مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص.۱۲۷-۱۳۹. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64326.2401

حق مولف © نویسندگان

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

چارچوب که با هدف کاهش فضای متغیر تصمیم قابل‌قبول مسئله طراحی شده است، شامل: توسعه‌ی مدل شبیه‌سازی و یک برنامه‌ی بهینه‌سازی، و اعمال محدودیت‌های موجود به آن از طریق مطالعه‌های پیشین سیستم و آنالیز "چه می‌شود، اگر است". سطح بالای چارچوب، شامل توسعه‌ی بهترین روش قابل‌قبول برای به‌دست‌آوردن راه‌حل بهینه برای هدف اصلی مسئله در یک زمان کم است. چارچوب ارائه‌شده بعد از انجام راستی‌آزمایی‌های لازم، قابل پیاده‌سازی در مورد مطالعاتی خواهد بود. علاوه‌بر این، یک برنامه‌ریزی بلندمدت و کوتاه‌مدت را برای مجتمع معدنی مشخص می‌کند. این کار را ابتدا با تعیین حجم بهینه‌ی تولید و سپس، تعیین منابع اثرگذار در بارگذاری مواد استخراجی مشخص می‌کند. برای این منظور، پس از برآورد، مدل ریاضی جایگزین مدل شبیه‌سازی به‌منظور تعیین ترکیب منابع اثرگذار بارگذاری مواد در راستای افزایش خروجی سیستم با اضافه‌کردن محدودیت‌های سیستمی ارائه شده است. بنابراین، مهم‌ترین نوآوری‌ها و سهم اصلی مشارکت پژوهش حاضر شامل این موارد است:

- ارائه‌ی برنامه‌ریزی توأماً کوتاه‌مدت و بلندمدت برای شبیه‌سازی فرآیندهای استخراج و برنامه‌ریزی در معدن روباز، که به تحلیل دقیق‌تری از آثار مختلف در عملکرد معدن کمک می‌کند.
- توسعه‌ی مدل‌هایی برای شبیه‌سازی هزینه‌ها و سودهای مرتبط با برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، که می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مالی بهتر در عملیات معدن کمک کند.
- ایجاد سازوکاری برای شبیه‌سازی و مدل‌سازی، که می‌تواند به تسهیل فرآیندهای برنامه‌ریزی و بهبود کارایی عملیات معدن کمک کند.

ادامه‌ی نوشتار حاضر به این صورت سازمان‌دهی شده است:

در بخش ۲، یک مرور تاریخی از موضوع، که یکی از عناوین مهم نوشتار حاضر محسوب می‌شود، فراهم شده است. جزئیات بیشتر معدن مس سرچشمه و معرفی چارچوب اجرایی پژوهش در بخش ۳ توضیح داده شده است، در بخش ۴، نتایج به‌کارگیری چارچوب برنامه‌ریزی بهینه‌ی پیشنهادی و آزمایش‌هایی که نشان‌دهنده‌ی کارائی چارچوب ارائه‌شده هستند، بررسی شده‌اند. سرانجام در بخش ۵، نتایج به‌دست‌آمده ارائه شده‌اند.

۲. مرور ادبیات

توزیع سلسله‌مراتبی دوسطحی مبتنی بر شبیه‌سازی ارائه‌شده در نوشتار حاضر، شباهت بسیاری به چارچوب برنامه‌ریزی تولید سلسله‌مراتبی دارد؛ که در ادبیات مربوط به آن، تلاش‌های بسیاری برای حل برنامه‌ریزی یکپارچه و مسئله‌ی زمان‌بندی انجام شده است. چارچوب برنامه‌ریزی تولید سلسله مراتبی (HPP)[1] کاربرد گسترده‌ای برای حل مسائل زنجیره‌ی تأمین با ترکیب‌های مختلف، مانند: محیط محصول‌های چندگانه، تجهیزات چندگانه، و محیط محصولات چندگانه‌ی دسته‌ای دارد.[۶] عموماً در بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی، مدل شبیه‌سازی را به‌عنوان یک جعبه‌ی سیاه در نظر می‌گیرند. خروجی تخمینی هر شبیه‌سازی از طریق الگوریتم تعریف‌شده‌ی موجود در نرم‌افزار برای تعیین بهترین ترکیب ممکن سیستم با درنظرگرفتن جنبه‌هایی که در تابع هدف و محدودیت‌ها تعریف شده است، ایجاد می‌شود. در این راستا، قاسمی و همکاران (۲۰۲۴)،[۷] و تکین و سابانچوقلو[2] (۲۰۰۴)،[۸] در زمینه‌ی معرفی الگوریتم‌های بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی بحث کرده‌اند. تک[3] و همکاران (۲۰۲۴)،[۹] به معرفی نرم‌افزارهایی که می‌توان برای بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی از آن‌ها استفاده کرد، پرداخته‌اند. ابزار Opt Quest و نرم‌افزار Sim Runner، معروف‌ترین نرم‌افزارهای بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی هستند، که در این حوزه استفاده می‌شوند. جعفرعلی و همکاران (۲۰۰۵)،[۱۰] به مقایسه‌ی بین عملکردهای Opt Quest و Sim Runner در تعیین زمان‌بندی بهینه برای سیستم‌های تولیدی پرداخته و مشخص کرده‌اند که نرم‌افزار Opt Quest، بهترین مقدار نزدیک به بهینه را به‌دست می‌آورد.

دیگر مطالعات گوناگونی را که در سال‌های اخیر برای مسئله‌ی برنامه‌ریزی تجهیزات جابجایی مواد در معادن توسط پژوهشگران در حوزه‌ی مذکور انجام شده‌اند، در دو دسته‌ی روش تک مرحله‌ای و روش چندمرحله‌ای می‌توان طبقه‌بندی کرد. براساس نتایج حاصل‌شده از مطالعه‌ی منابع تئوریک موجود می‌توان به این نتیجه رسید که روش‌های چندمرحله‌ای قادر هستند اهداف تولید را به‌خوبی پوشش دهند. روش چندمرحله‌ای، مسئله‌ی تخصیص را به دو زیرمسئله تقسیم می‌کند: مسئله‌ی اول، که در رأس توجهات قرار دارد، مسئله‌ی تولید است؛ و مسئله‌ی دوم، تجهیز ادوات جابجایی است. در میان نوشتارهای منتشرشده، توجه بسیاری به روش‌های هیورستیک برای حل مسئله‌ی تجهیز کامیون شده است.[۱۱] گرچه می‌توان مسائل در ابعاد کوچک را به شکل دقیق حل کرد؛ اما به هر حال، روش‌های مذکور جزء راه‌حل‌های مسئله‌ی تخصیص محسوب می‌شوند. زیرا برای معیارهای مدنظر، خواه بیشینه‌سازی میزان تولیدها و یا کمینه‌سازی عدم فعالیت تجهیزات، مثل زمان انتظار کامیون‌ها و یا زمان بیکاری بیل‌های مکانیکی استفاده می‌شوند. روش‌های ذکرشده، حل بهینه‌ای همانند روش دقیق، برای مسئله فراهم نمی‌آورند؛ بلکه حل نزدیک به بهینه ایجاد می‌کنند.[۱۲] چانگ و لین[4] (۲۰۲۳)،[۱۳] با استفاده از روش‌های احتمالات به مطالعه و تجزیه‌وتحلیل سیستم معدن روباز پرداخته‌اند. شیشوان و بندروف[5] (۲۰۱۹)،[۱۴] سیستم خودکنترلی را جهت تخصیص کامیون بهینه به‌منظور افزایش بهره‌وری طراحی کرده‌اند. در مطالعه‌یی، کوئینینبرگ[6] (۱۹۸۲)،[۱۵] به بهینه‌سازی سیستم کامیون– بیل برای یک معدن روباز از طریق به‌کارگیری مبانی نظریه‌ی صف و برنامه‌ریزی ریاضی پرداخته است. میراندا و همکاران (۲۰۱۴)،[۱۶] اولین مدل شبکه جهت اعزام کامیون به بیل مکانیکی در یک سیستم کامیون– بیل را برای معادن روباز معرفی کرده‌اند. پاتل و دسایی[7] (۲۰۱۸)،[۱۷] مدل توسعه داده‌شده‌ی میراندا و همکاران،[۱۶] را به صورت دو مرحله‌ای توسعه داده‌اند، به‌طوری که ابتدا هر بیل، تعداد معینی کامیون را بارگذاری کند؛ سپس، کامیون‌ها به مناطق مشخص اعزام شوند. چینبات و تاکاکو[8] (۲۰۰۹)،[۱۸] به ارزیابی اعزام کامیون در یک معدن روباز با استفاده از برنامه‌ریزی خطی پرداخته‌اند. اسباربارو[9] (۲۰۲۱)،[۱۹] مدل پاتل و دسایی،[۱۷] را توسعه داده و آن را با استفاده از برنامه‌ریزی پویا برای تخصیص کامیون در

[1] Hierarchical Production Planning
[2] Tekin & Sabuncuoglu
[3] Teck
[4] Chang & Lin
[5] Shishvan & Benndorf
[6] Koenigsberg
[7] Patel & Desai
[8] Chinbat & Takakuwa
[9] Sbarbaro

مسیر استفاده کرده‌اند؛ به طوری که طول صف و زمان انتظار برای بارگیری و زمان بیکاری بیل‌های مکانیکی را کاهش داده‌اند. آلاریه و گاماچه[10] (۲۰۰۲)،[۲۰] به مطالعه‌ی روش‌های حل موجود برای اعزام کامیون در معدن روباز پرداخته‌اند. سگورف[11] و همکاران (۱۹۸۹)،[۲۱] به مطالعه‌ی کنترل زمان کامیون‌های صنعتی در معدن روباز پرداخته‌اند.

در تمامی مطالعات اخیر از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی، مانند نظریه‌ی صف استفاده شده است. بنابراین، به‌نظر می‌رسد که مدل‌سازی به کمک برنامه‌ریزی ریاضی قادر نیست تمام جنبه‌های مسئله را در نظر بگیرد. زیرا مدل‌های ریاضی فرض می‌کنند که پارامترهایی مثل: زمان حمل‌ونقل، زمان تعمیرات، و... همگی به‌صورت قطعی هستند. بنابراین، رویکرد مدل‌سازی شبیه‌سازی برای ارزیابی سیستم حمل‌ونقل در چنین مسائلی مناسب است. چاندا و داگدلن[12] (۱۹۹۵)،[۲۲] با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی، چارچوبی برای کمینه‌سازی مجموع انحراف‌های پارامترهای کیفیت و مقدار تولید ارائه داده‌اند. شیه و فری[13] (۱۹۹۵)،[۲۳] یک رویکرد برنامه‌ریزی مبتنی بر محدودیت را برای کمینه‌سازی انحراف از معیار مراحل تولید در یک معدن زغال سنگ با درنظرگرفتن جزئیات احتمالی ارائه داده‌اند. چانگ و همکاران (۲۰۲۳)،[۶] اقدام به تجزیه‌وتحلیل سیستم حمل‌ونقل معدن روباز از طریق شبیه‌سازی کرده‌اند. رانیکمن[14] و همکاران (۱۹۹۷)،[۲۴] با استفاده از نرم افزار WITNESS سیستم حمل‌ونقل کامیون را به‌منظور افزایش میانگین تولیدها به مقایسه‌ی سناریوهای مختلف پرداخته‌اند. چینبات و تاکایوا[15] (۲۰۰۸)،[۲۵] با استفاده از ترکیب مدل شبیه‌سازی و روش DAMIC برای افزایش تولید و حذف گلوگاه اقدام کرده‌اند. منا[16] و همکاران (۲۰۱۳)،[۲۶] ارائه‌دهنده‌ی روشی با استفاده از بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی به‌منظور بیشینه‌سازی بهره‌وری کلی ناوگان حمل‌ونقل در یک معدن روباز هستند. تقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۵)،[۲۷] یک مدل برنامه‌ریزی تولید با استفاده از برنامه‌ریزی فازی آرمانی ارائه و کاهش هزینه‌ی تولید و افزایش درآمد منجر به افزایش سود را بررسی کرده‌اند. عابدی سعیدآباد و تقی‌زاده (۲۰۱۵)،[۲۸] ارزیابی و بهبود عملکرد خط تولید را از طریق شبیه‌سازی کامپیوتری در یکی از کارخانه‌های آهن‌سازی ایران انجام داده‌اند. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۰)،[۱] یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی دوفازی برای اجرای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و کوتاه‌مدت در یک معدن روباز در ایران ارائه داده‌اند. براساس مطالعه‌ی اخیر، ابتدا یک مقدار برای میزان استخراج‌ها در درازمدت برآورد و سپس مقدار تجهیزات جابجایی، که برای تحقق هدف مذکور مورد نیاز است، محاسبه شده است. همچنین ایشان (۲۰۲۲)،[۴] در مطالعه‌ی دیگری، یک برنامه‌ریزی چندهدفه برای کنترل میزان استخراج‌ها و مدت زمان اعزام کامیون‌ها برای حمل بار را به منظور کاهش هزینه‌ها انجام داده‌اند. جهانگیری و همکاران (۲۰۲۳)،[۵] یک برنامه‌ریزی برای تعیین ترکیب بهینه‌ی کادر درمان در بخش اورژانس با استفاده از بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی شبه مدل‌محور ارائه کرده و توانسته‌اند با ارائه‌ی یک شبه‌مدل مبتنی بر رگرسیون، ۴۸٪ زمان انتظار پذیرش بیماران را در بخش اورژانس در زمان فراگیری کرونا کاهش دهند.

با توجه به بررسی منابع تئوریک موجود در ادبیات موضوع، برنامه‌ریزی تجهیزات جابجایی مواد در معدن را می‌توان در دسته‌ی برنامه‌ریزی احتمالی قرار داد. در این‌صورت، با توجه به اینکه بیان جزئیات جریان در معدن واقعی در مسئله خیلی مشکل است، لذا ساخت مدل شبیه‌سازی سیستم، شامل متغیرهای تصمیم برای حل مسئله ضروری است.

۳. روش پژوهش

در بخش حاضر پژوهش، ابتدا جزئیات مربوط به معدن مس سرچشمه به عنوان مطالعه‌ی موردی و همچنین چارچوب پیشنهادی پژوهش توضیح داده شده است.

۱.۳. معرفی مجتمع معدن مس سرچشمه

مجتع مس سرچشمه در استان کرمان در جنوب شرقی ایران واقع شده است. سرچشمه، یک معدن بزرگ روباز دارد، که دومین معدن بزرگ مس جهان محسوب می‌شود؛ که در ۶۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان کرمان و ۵۰ کیلومتری جنوب شهرستان رفسنجان واقع شده است. ارتفاع متوسط منطقه در حدود ۲۶۰۰ متر است، که بالاترین نقطه‌ی آن حدود ۳۰۰۰ متر ارتفاع دارد. در معدن مس سرچشمه، مطالعه‌ی زمین و حفر کانال‌های زیرزمینی بخش اولیه‌ی فرآیند استخراج سنگ را شامل می‌شود، که جمع‌آوری داده، تجزیه‌وتحلیل، بروزرسانی اطلاعات از حفاری تا استخراج مراحل اصلی آن محسوب می‌شوند. نتایج حاصل از پردازش دادها در اختیار بخش مهندسی به‌منظور توسعه‌ی برنامه‌های حفاری قرار می‌گیرد. در بخش برنامه‌ریزی حفاری، طرح حفاری میان‌مدت برنامه‌ریزی می‌شود. بخش عملیاتی، مسئول اجرای برنامه‌های حفاری بخش برنامه‌ریزی است. پس از اجرای حفاری، نوع مواد معدنی استخراج‌شده باید مشخص شود.[۱] در حالت کلی مواد استخراج‌شده در معدن مس سرچشمه، در ۴ گروه طبقه‌بندی می‌شوند، که عبارت‌اند از:

۱. **سنگ معدن سولفید:** سنگ معدن استخراجی است، که درجه‌ی مس در آن، بیشتر از ۰/۷٪ است.

۲. **سنگ معدن اکسید:** سنگ معدن استخراجی است، که درجه‌ی مس در آن، بین ۰/۲۵ و ۰/۷ درصد است.

۳. **سنگ درجه‌ی پایین:** سنگ معدن استخراجی است، که درجه‌ی مس در آن، بین ۱۵/ ۰و ۰/۲۵ درصد است.

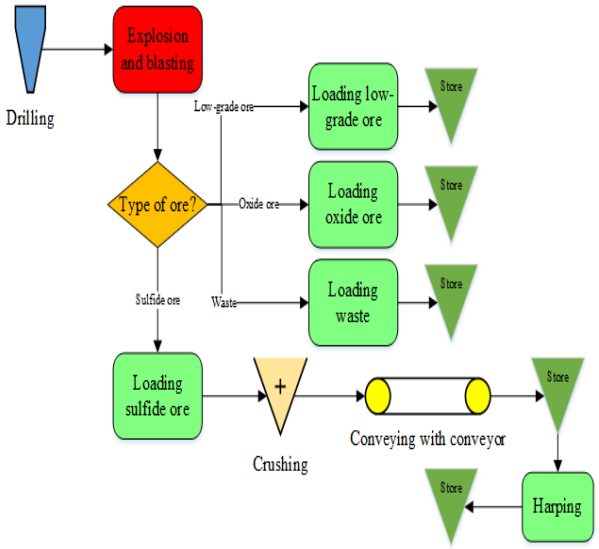
۴. **ضایعات:** سنگ معدن استخراجی است، که درجه‌ی مس در آن، کمتر از ۰/۱۵٪ است.

نسبت مقدار استخراج انواع مختلف سنگ‌ها در معدن مذکور به ترتیب ۴۵، ۵ ، ۴۴، و ۶ درصد است. براساس انواع مختلف سنگ معدن، یک راهبرد جابجایی و ذخیره‌سازی برای سنگ معدن استخراجی انتخاب می‌شود. اولین نوع ماده‌ی معدنی، سنگ معدن سولفید است، که ابتدا پس از بارگیری به یک ایستگاه سنگ‌شکن منتقل می‌شود. در معدن روباز اخیر، یک ایستگاه سنگ‌شکن با ظرفیت ۶۰۰۰۰ تن در هر روز وجود دارد. پس از آن ماده به یک سیلوی ذخیره‌سازی مس با ظرفیت ۱۵۰۰۰۰تن انتقال می‌یابد، که پس از گذراندن مرحله‌ی خردایش سنگ معدن مس نرم در انبار موردنظر ذخیره می‌شود.

[10] Alarie & Gamache
[11] Sgurev
[12] Chanda & Dagdelen
[13] Shih & Frey
[14] Runciman
[15] Chinbat & Takakuwa
[16] Mena

جدول ۱. مشخصات ادوات لازم برای تجهیز کامیون به‌منظور جابجایی.[۱]

Vehicle type	Upper bound	Lower bound	Current quantity	Hourly Cost ($)
(Shovel 1)	11	9	10	45
(Shovel 2)	9	7	8	69
(Shovel 3)	9	7	8	67
(Shovel 4)	2	1	1	118



شکل ۱. مدل انیمیشن شبیه‌سازی‌شده‌ی سیستم معدن مس سرچشمه.

سنگ‌های معدن اکسید، درجه‌ی پایین و ضایعات هر کدام به ایستگاه ذخیره‌سازی دامپینگ خود منتقل می‌شوند. هزینه‌ی عملیاتی به‌کارگیری هر ساعت بیل نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

مدیریت برای بیشینه‌سازی میزان تولیدها و درآمد حاصل از معدن، محدودیت‌هایی را در نظر گرفته است، که عبارت‌اند از:

۱. تعداد بیل در دسترس محدود است؛

۲. میزان سنگ سولفید بارگذاری‌شده از منابع استخراجی باید مطابق ظرفیت معدن باشد؛

۳. میزان سنگ سولفید، اکسید، درجه‌ی پایین، و ضایعات استخراج‌شده باید مطابق با تقاضای موجود باشد؛

۴. کل هزینه‌های بارگذاری موجود در معدن، که شامل هزینه‌های بارگذاری مواد در کامیون‌ها توسط بیل‌ها می‌شود، باید کمینه شود.

در شکل ۱، مدل انیمیشن شبیه‌سازی‌شده ساختار در نظر گرفته‌شده برای سازوکار مجتمع معدنی مشاهده می‌شود. علاوه بر این، در شکل‌های ۱ الی ۵ (مندرج در پیوست)، محیط نرم‌افزاری به منظور شبیه‌سازی در نرم‌افزار ARENA نشان داده شده‌اند.

۲.۳. نمادگذاری

در جدول ۲، نمادهایی که برای متغیرها و پارامترها در مدل توسعه داده‌شده استفاده شده‌اند، ارائه شده‌اند.

جدول ۲. نمادها.

Variables	Description
TP	(Total production amount)
NS_i	(Shovel types i and $i = 1,2,3,4$
TC_{in}	Amount of incoming cargo to the crusher (tons)
S_{out}	Sulfide ore production rate (tons)
O_{out}	Oxide ore production rate (tons)
L_{out}	Low grade stone production rate (tons)
W_{out}	Waste generation rate (tons)
Parameters	Description
C_i	Cost of using a shovel (dollars) $i = 1,2,3,4$
B	Budget (Dollars)
C_c	Crusher capacity (tons)
Other factor	Description
Response surface variables	Total production rate of the complex
Controllable items of the simulation model	The production rate of sulfide ore, oxide ore, low-grade ore, and waste, and the amount of incoming cargo to the crusher.

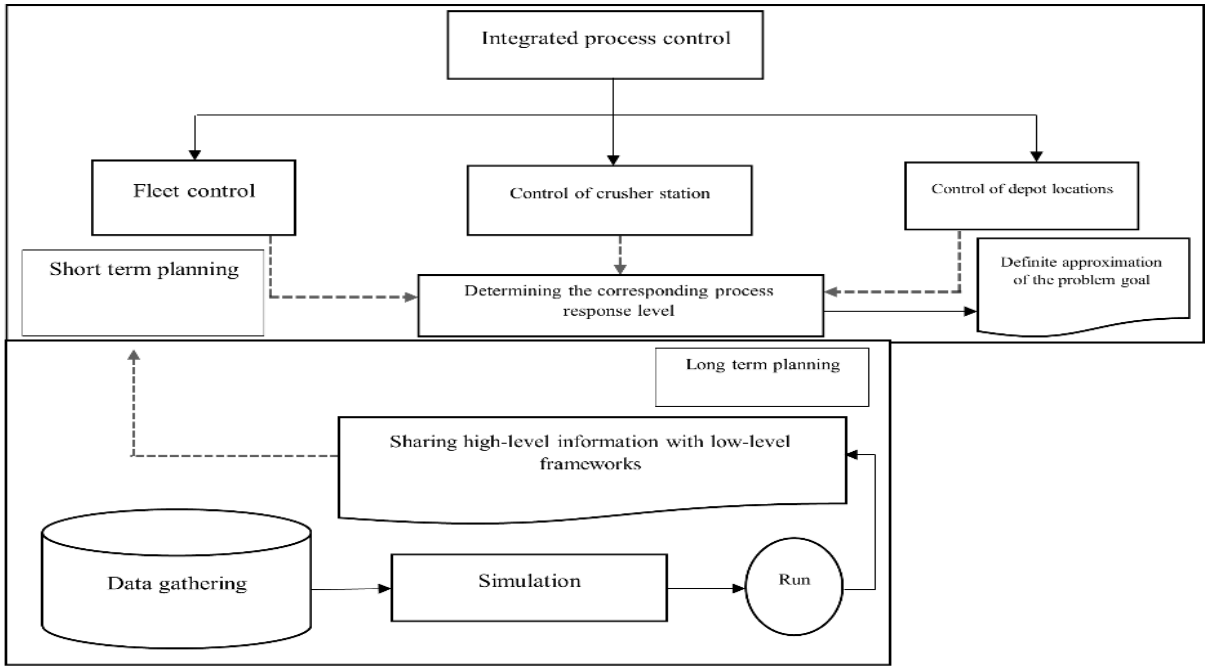
۳.۳. روش بهینه‌سازی مدل شبیه‌سازی سلسله‌مراتبی پیشنهادی

چارچوب پیشنهادی دوسطحی سلسله‌مراتبی مبتنی بر شبیه‌سازی[۱۷] به‌منظور افزایش درآمد از طریق کنترل فرآیند تولید مجتمع معدن مس سرچشمه در بخش حاضر شرح داده شده است. در سطح بالای چارچوب مذکور، کنترل مطلوب تولید وضعیت جاری مجتمع انجام می‌شود (شکل ۲).

با استفاده از سطح بالای چارچوب پیشنهادی، مقدار نزدیک به بهینه‌ی متغیرهای کنترل‌شده در مدل شبیه‌سازی براساس تقاضای موجود و ظرفیت مجتمع به‌دست می‌آید. تحقق هدف در سطح بالای فرآیند سبب می‌شود تا برنامه‌ریزی بلندمدت در سیستم تعیین شود. حل مسئله‌ی حاضر، مقدار متغیرهای تصمیم را با توجه به ظرفیت محدود ایستگاه سنگ‌شکن تعیین می‌کند. در واقع، بعد از حل مسئله‌ی ایجادشده، میزان تولید هر یک از اقلام معدنی یا مقدار نزدیک به بهینه‌ی متغیرهای تصمیم در نظر گرفته‌شده، به‌دست می‌آیند. متغیرهای تصمیم ذکرشده، عبارت‌اند از: میزان محموله‌ی ورودی به ایستگاه سنگ‌شکن، میزان تولید سنگ سولفید، میزان تولید سنگ اکسید، میزان تولید سنگ درجه‌ی پایین، و میزان ضایعات. بعد از تعیین مقادیر بهینه‌ی به‌دست‌آمده از حل مسئله در سطح بالا، در واقع برنامه‌ی بهنیه‌ی تولیدی برای مجتمع تنظیم می‌شود؛ که همان برنامه‌ی برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در مجتمع معدنی خواهد بود. براساس برنامه‌ی تهیه‌شده‌ی مذکور، با تشکیل سطح پاسخ متناظر با سطح بالا، از طریق رویکرد شبه مدل‌محور[۱۸]، یک برنامه‌ی جدید برای تجهیز ادوات جابجایی لازم است تعریف شود. مدل ریاضی فرمول‌بندی‌شده در

[17] Simulation

[18] Meta modeling approach



شکل ۲. ساختار چارچوب دوسطحی سلسله‌مراتبی شبیه‌سازی مبتنی بر بهینه‌سازی.

سطح بالا، در حقیقت مسئله‌ی تولید بهینه‌ایی است که با هدف بیشینه‌سازی درآمد دنبال می‌شود. بدیهی است هر چه میزان مواد تولیدی بیشتر باشد، میزان درآمد نیز بیشتر خواهد بود؛ اما این میزان باید به گونه‌ای باشد که با محدودیت-های موجود در مجتمع سازگار باشد. در واقع، مسئله‌ی اخیر قادر است مقدار تولید انتظاری را که باعث افزایش درآمد می‌شود، بیشینه سازد (معادله‌ی ۱). در سطح بالای چارچوب، تابع تولید انتظاری از جمع خروجی واحدهای تولیدی در مجتمع معدنی اخیر به‌دست می‌آید.

این تذکر لازم است که معادله‌ی ۱، در سطح بالای چارچوب از طریق روش فرابتکاری و به‌صورت تخمینی در نظر گرفته شده است. معادله‌ی ۲، بیشترین سطح ظرفیت ایستگاه سنگ‌شکن را بیان می‌کند. معادله‌های ۳ الی ۶، میزان تولید مواد معدنی استخراجی را برای هر یک از اقلام طبقه‌بندی‌شده کنترل می‌کنند و محدودیت ۷، تضمین می‌کند که متغیرهای تصمیم مثبت گزارش شوند.

$$MaxTP = Total\ Solphide\ Throughput \quad (1)$$

$$s.t$$

$$\mathrm{Tc}_{in} \le C_c \quad \text{برای } i = 1,2,3,4 \quad (2)$$

$$L \le S_{out} \le U \quad (3)$$

$$L \le O_{out} \le U \quad (4)$$

$$L \le L_{out} \le U \quad (5)$$

$$L \le W_{out} \le U \quad (6)$$

$$\mathrm{Tc}_{in}, S_{out}, O_{out}, L_{out}, W_{out} \ge 0 \quad (7)$$

۱.۳.۳. چارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی بلندمدت

در بخش حاضر، به بحث بهینه‌سازی تولیدها در مجتمع معدن مس سرچشمه برای افزایش درآمد حاصل از آن پرداخته شده است. برای این منظور، از ابزار ابتکاری بهینه‌سازی Opt Quest موجود در نرم‌افزار Arena در سطح بالای چارچوب پیشنهادی استفاده شده است. ابزار Opt Quest، یک روش ابتکاری برای جستجوی راهبرد بهینه است، که جستجوهایی را از طریق تجزیه‌وتحلیل تخمینی خروجی مدل شبیه‌سازی انجام می‌دهد. نرم‌افزار Arena با استفاده از روش‌های جستجوی هوشمندی، همچون جستجوی ممنوع، به جستجوی ترکیب بهینه‌ی مدل شبیه‌سازی ساخته‌شده در نرم‌افزار Arena، تحت وضعیتی که برای متغیرها تعریف شده است، از طریق تعریف اطلاعات مدل، مثل تعریف متغیر سطح پاسخ و متغیرهای قابل کنترل می‌پردازد. Opt Quest یک راه‌حل بالقوه برای مدل طراحی‌شده در نرم‌افزار Arena ارائه می دهد. Opt Quest نتایج شبیه‌سازی را تحلیل می‌کند و به واسطه‌ی جستجوی هوشمندانه‌ای که انجام می‌دهد، یک راه‌حل جدید بالقوه مهیا می‌سازد.[۱] برای استفاده از Opt Quest، ابتدا باید ساختار مسئله‌ی بهینه‌سازی مشخص شود. به‌عبارت دیگر، متغیرهای تصمیم و تابع هدف باید تعریف شوند. هدف پژوهش حاضر این است که از طریق تعیین مقدار بهینه برای متغیرهای تصمیم اثرگذار در فرآیند استخراج در مجتمع معدن مس سرچشمه، میزان تولیدهای ماهانه براساس برنامه‌ها و ظرفیت معدن افزایش داده شود. همان‌طور که مشخص است از طریق تولید بیشتر، می‌توان درآمد بیشتر حاصل کرد. برای این منظور، حدود بالا و پایین متغیرهای تصمیم به‌عنوان پارامترهای از پیش تعیین‌شده در Opt Quest قرار داده شده‌اند (جدول ۳). ساختار کلی مسئله‌ی برنامه‌ریزی، که برای افزایش تولیدهای ماهانه‌ی مجتمع، که در Opt Quest ساخته شده است، در معادله‌های ۱ الی ۷ نشان داده شده است.

۲.۳.۳. چارچوب پیشنهادی برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت

یک مدل شبیه‌سازی ساده‌شده، یک سیستم واقعی است که برای یک زیرمجموعه از متغیرهای ورودی (عوامل)، پاسخ مدل شبیه‌سازی به‌عنوان تابع زیرمجموعه‌ی اخیر تعریف می‌شود. یک شبه‌مدل، یک مدل انتزاعی[۱۹] از زیرمجموعه‌ی متغیرهای ورودی شبیه‌سازی است، که قادر است سیستم را تشریح کند.[۵] در نوشتار حاضر، ساخت شبه‌مدل براساس روش ابوالقاسمیان و

[19] Abstraction Model

جدول ۳. مقدار پارامترهای از پیش تعیین‌شده.

Parameter	Upper bound	Lower bound	Unit
Crusher capacity	60000	0	tons
Sulfide ore production quantity	35000	20000	tons
Oxide ore production quantity	20000	15000	tons
Low grade ore production quantity	3500	3000	tons
Waste ore production quantity	1500	0	tons
Budget	1656	0	dollars

جدول ۴. مقایسه بین وضعیت تولید موجود و بهینه.

Status	Variables					Production (Tons)	Income (Dollars)
	L_{out}	O_{out}	S_{out}	W_{out}	Tc_{in}		
Current	17422	6094	15121	9019	35000	47703	4770300
Optimum	3043	15336	31254	1191	57897	57799	5779900

همکاران (۲۰۲۰)،[۱] انجام شده است. مدل شبیه‌سازی ساخته‌شده برای تعیین میزان تولیدهای سیستم به منظور به‌دست‌آوردن پاسخ متغیرها به ازاء سناریوهای مختلف ۲^k (k، تعداد متغیرها) طرح عاملی کامل برای این ۴ عامل در نظر گرفته شده است:

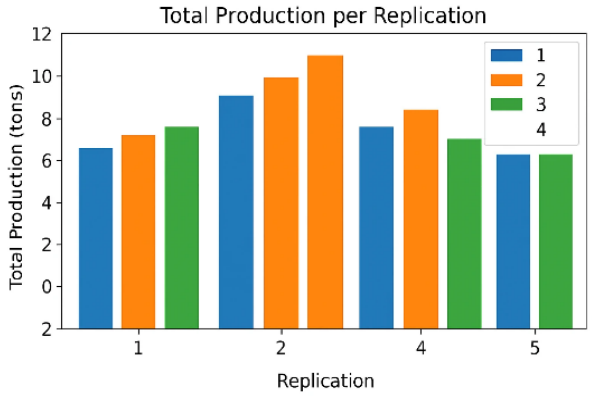
۱. X_1: تعداد بیل‌های مکانیکی نوع ۱،

۲. X_2: تعداد بیل‌های مکانیکی نوع ۲،

۳. X_3: تعداد بیل‌های مکانیکی نوع ۳،

۴. X_4: تعداد بیل‌های مکانیکی نوع ۴.

حدود قابل‌قبول برای متغیرها عبارت‌اند از: $۱۱ \le X_۱ \le ۹$، $۹ \le X_۲ \le ۷$ ، $۹ \le X_۳ \le ۷$ و $۲ \le X_۴ \le ۱$. عوامل مذکور، متغیرهای مستقل هستند که به‌عنوان متغیرهای ورودی به مدل شبیه‌سازی برای ساخت متغیر وابسته (میزان تولیدهای TP) استفاده می‌شوند. تمام ترکیب‌های ممکن ۴ متغیر مستقل (عوامل) و نتایج خروجی آن‌ها به تعداد $۳\times۳\times۳\times۲=۵۴$ باید جمع‌آوری و برای متناسب‌سازی شبه‌مدل استفاده شوند. این در حالی است که برای جمع‌آوری تعداد داده‌های ذکرشده، به‌منظور برآورد معادله‌ی رگرسیون، مخصوصاً زمانی که تعداد عوامل زیاد است، نیازمند صرف زمان زیادی است. ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۰)،[۱] نشان داده‌اند که می‌توان با استفاده از طرح آزمایش عاملی کامل ۲^k، یک شبه‌مدل معتبر ارائه داد. طرح آزمایش عاملی کامل، طرحی است مشتمل بر k عامل هر یک در دو سطح، و چون پاسخ چنین طرحی نیاز به $۲^k = ۲\times۲\times\ldots\times۲$ مشاهده دارد، آن را طرح ۲^k می‌نامند. وقتی در یک طرح عاملی، k عامل وجود دارد، این طرح به کمترین تعداد اجرا نیاز دارد. سطح هر عامل می‌تواند کمّی، کیفی، و یا حتی اعمال و عدم اعمال باشد. مدل آماری طرح ۲^k شامل: $\binom{k}{۱}=۱$ اثر اصلی، $\binom{k}{۲}=۱$ اثرمتقابل دو عاملی، $\binom{k}{۳}=۱$ اثرمتقابل سه‌عاملی، و بالاخره $\binom{k}{k}=۱$ اثرمتقابل k عاملی است. بنابراین، طرح ۲^k جمعاً $۲^k-۱=\binom{k}{۱}+\binom{k}{۲}+\binom{k}{۳}+\ldots+\binom{k}{k}$ اثر دارد. در نوشتار حاضر، طرح مذکور نیاز به ۱۶ ترکیب دارد، که فقط سطوح بالا و پایین هر عامل در جریان شبیه‌سازی برای جمع‌آوری اطلاعات استفاده شده‌اند. هر ترکیب عوامل،



شکل ۳. مقدار تولید کل مجتمع در هر تکرار شبیه سازی.

۱۰ بار به مدت ۳۰ روز به اجرا در آمده‌اند، تا اطمینان حاصل شود که دقت خطا در تخمین میانگین نرخ تولیدها کمتر از ۰/۰۵ است. همچنین تحلیل‌های به‌عمل‌آمده از اندازه‌گیری عملکرد سیستم نشان می‌دهند که دوره‌ی گرم‌کردن سیستم معادل ۴ روز است، که باید در تنظیم‌های مدل، قبل از به اجرا درآوردن در نظر گرفته شود.

۴. یافته های پژوهش

با اعمال تنظیم‌های ذکرشده در معادله‌های ۱ الی ۷ و تعریف مسئله، مدل در Opt Quest به اجرا در می‌آید. بعد از ۶۳۸ بار اجرای مدل شبیه‌سازی در ابزار Opt Quest، بهترین مقدار شبیه‌سازی در تکرار ۸۵ از بین ۲۵ راه‌حل ممکن، که در مجموعه‌ی معادله‌های تعریف‌شده صدق می‌کند، به‌دست می‌آید. در این تکرار مقدار تولیدها به ۵۷۷۹۹ تن می‌رسد. میزان تولید سنگ درجه‌ی پایین در وضعیت به‌دست‌آمده: ۳۰۴۲ تن، سنگ اکسید: ۱۵۳۳۶ تن، سنگ سولفید: ۳۱۲۵۴ تن، و ضایعات: ۱۱۹۶ تن گزارش شده است. همچنین مقدار ظرفیت بهینه برای ایستگاه سنگ‌شکن، ۵۷۸۹۷ تن به‌دست آمده است. در شکل ۳، مقدار تولید در هر تکرار شبیه‌سازی مشاهده می‌شود.

در جدول ۴، مقایسه‌ای بین وضعیت موجود و بهینه‌ی تولید ارائه شده است. علاوه‌بر اینکه وضعیت بهینه نسبت به وضعیت موجود متوازن شده است، با توجه به ترکیب به‌دست‌آمده، مقدار تولیدها ۲۱٪ افزایش یافته است، که نشان می‌دهد می‌توان از طریق آن، درآمد را نیز افزایش داد.

با لحاظ‌کردن هدف عملیاتی اخیر به‌عنوان هدف بلندمدت مجتمع، در ادامه، ترکیب اجرای تجهیزات بارگیری برای تحقق هدف مذکور در کوتاه‌مدت تعیین

شده است. برای این منظور، آثار اصلی چهار عامل، تقابل میان عوامل در مدل رگرسیون در معادله‌ی ۸ نشان داده شده است.

$$TP = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k}\beta_i X_i + \sum_i\sum_j \beta_{ij}X_{ij} + \sum_i\sum_j\sum_k \beta_{ijk}X_iX_jX_k + \beta_{1234}X_1X_2X_3X_4 + \varepsilon \quad (8)$$

که در آن،

TP: میزان کل تولیدها،

β_i: جزء ثابت معادله‌ی رگرسیون،

β_{ij}: اثر تقابل دوطرفه بین عامل‌های i و j ،

β_{ijk}: اثر تقابل سه‌طرفه بین عامل‌های i، j، و k،

β_{1234}: اثر تقابل چهارطرفه بین تمامی متغیرها،

ε: خطای جزئی متناسب‌سازی مدل رگرسیون است.

نتایج شبیه‌سازی برای $۲^۴ = ۱۶$، نقطه‌ی طراحی جمع‌آوری شده است (جدول پیوست ۲)، و ضرایب β برای شبه‌مدل چندجمله‌ای رگرسیون تخمین زده شده است. نتایج آزمایش با تحلیل آماری در نرم‌افزار DX انجام شده است، که در جدول ۵، نتایج تحلیل مذکور ارائه شده است.

در جدول ۵، در ستون اول، آثار اصلی و همه‌ی آثار متقابل معنی‌دار؛ در ستون دوم، اثر بالقوه‌ی جملات؛ در ستون سوم، ضرایب آثار؛ و در دو ستون آخر، مقدار احتمالات و مقدار P نشان داده شده‌اند. با توجه به نتایج موجود در جدول ۵، مقدار آماره‌ی F، برای مدل برابر ۵/۵۲ به‌دست آمده است؛ که نشان می‌دهد مدل مذکور معنی‌دار است. در حقیقت با توجه به مقدار F، فقط ۱/۸۲٪ ممکن است مدل در محدوده‌ی تعریف‌شده دچار اختلال شود. مقادیر $Prob > F$ برای جملاتی که کمتر از ۰/۰۵در جدول اخیر گزارش شده‌اند، معنی‌دار هستند و در متناسب‌سازی مدل از آن جملات استفاده می‌شود و مقادیر بالای ۰/۱ نشان می دهند که جمله معنی‌دار نیست. البته باید توجه شود که اگرچه متغیرهای $X_۲$ و $X_۳$ معنی‌دار نیستند، اما از آن‌ها برای تحلیل استفاده شده است؛ زیرا متغیرهای اخیر جزء متغیرهای تصمیم سیستم موردنظر هستند و هدف، محاسبه‌ی مقدار بهینه‌ی آن‌ها در آینده بوده است.

نتایج Auto select مدل رگرسیون در نرم‌افزار DX، مدل رگرسیون چندجمله‌ای را به صورت معادله‌ی ۹ متناسب‌سازی کرده است.

$$\begin{aligned} TP = {} & 39382.25 - 1640.25X_1 + 2331.81X_2 + \\ & 827.3X_3 + 8055.37X_4 + 240.19X_1X_3 - \\ & 406.12X_1X_4 - 297.06X_2X_3 - 546.12X_3X_4 \end{aligned} \quad (9)$$

مقدار آماره‌ی P، برای مدل، معنی‌دار و برابر با ۰/۰۱ گزارش شده است. در مدل رگرسیون، آثار متقابل نشانگر اثر هم‌زمان تغییرات متناظر متغیرهای تصمیم در سطح پاسخ هستند. شبه‌مدل ارائه‌شده در معادله‌ی ۱۱، به کمک مدل شبیه‌سازی سیستم واقعی، که در نوشتار حاضر بررسی شده است، ساخته شده است. با روشن‌شدن معادله‌ی اخیر می‌توان بهترین ترکیب ممکن مجموعه‌ی متغیرهای تصمیم را از طریق بهینه‌سازی مدل، تحت محدودیت‌های مدیریتی بعد از تأیید اعتبار آن به‌دست آورد.

۱.۴. اعتبارسنجی شبه‌مدل

میزان اعتبار شبیه‌سازی نشان می‌دهد که چگونه مدل می‌تواند رفتار سیستم واقعی را بازگو کند. اعتبار شبه‌مدل از طریق روش‌های بسیاری که به‌صورت مقایسه بین خروجی‌های شبه‌مدل و شبیه‌سازی است، انجام می‌شود. در نوشتار حاضر، جهت پذیرش شبه‌مدل از روش خطای مطلق نسبی (ARE)[20] $ARE\left(SO, MO\right) = \left|\left(SO - MO\right)\right| / SO$ استفاده شده است، که در آن SO خروجی شبیه‌سازی و MO خروجی شبه‌مدل است (ابوالقاسمیان و همکاران (۲۰۲۰)[۱]).

برای حصول اطمینان از اعتبار شبه‌مدل ساخته‌شده، لازم است شبه‌مدل و مدل شبیه‌سازی در ۵ نقطه‌ی دیگر طراحی– به جز نقاط طرح $۲^۴$– به تصادف در محدوده‌ی قابل‌پذیرش اجرا شوند و سپس نتایج به‌دست‌آمده از اجرای شبیه‌سازی با مقادیر به‌دست‌آمده از شبه‌مدل مقایسه شوند.

چهار ستون اول در جدول ۶، نشانگر نقاط تصادفی انتخاب‌شده برای عامل‌های $X_۱$، $X_۲$، $X_۳$، و $X_۴$ هستند. به ترتیب دو ستون بعد $\left(SO, MO\right)$ نشان‌دهنده‌ی مقادیر به‌دست‌آمده از شبه‌مدل رگرسیون و مدل شبیه‌سازی هستند. متعاقباً، در ستون آخر مقدار خطای مطلق نسبی محاسبه شده است.

جدول ۵. تحلیل آماری شبه‌مدل رگرسیون.

term	Effect	Coefficient	F-value	$Prob > F$
Constant	47897	39382.25	5.52	0.01
X_1	-327.94	-1640.25	11.96	0.01
X_2	-44.69	2331.81	0.22	0.65
X_3	33.56	827.37	0.12	0.73
X_4	-185.94	8055.37	3.75	0.09
X_1X_3	240.19	240.19	6.25	0.04
X_1X_4	-203.6	-406.12	4.47	0.05
X_2X_3	-297.6	-297.06	9.57	0.01
X_3X_4	-273.06	-546.12	8.08	0.02

[20] Absolute Relative Error

جدول ۶. اعتبارسنجی شبه‌مدل.

ARE	Simulation output	Meta model output	Design point			
			X_4	X_3	X_2	X_1
0.008	47656±329	48081	1	8	8	10
0.02	47433±502	48717	2	7	8	9
0.01	48600±427	47912	1	8	9	11
0.02	49201±556	47751	2	8	7	10
0.01	49045±484	48251	1	8	7	9

جدول ۷. تغییرات بر روی مقدار عوامل.

Status	Factors				Production (tons)
	Shovel 1	Shovel 2	Shovel 3	Shovel 4	
Optimum	9	8	7	7	48210
Increase	10	9	8	8	47986
Decrease	8	7	6	6	42025

متوسط ARE برای شبه‌مدل، ۱/۳٪ به‌دست آمده است. بنابراین نتیجه گرفته شده است که شبه‌مدل قادر است به‌خوبی مقادیر نزدیک به بهینه‌ی متغیرهای تصمیم را تعیین کند. لذا می‌توان از معادله‌ی ۱۰ در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی استفاده کرد. به‌طوری که در آینده با اعمال محدودیت‌های تکنولوژیکی بتوان ترکیب بهینه‌ی ماشین‌آلات بارگذاری را برای مسئله تعیین کرد.

۲.۴. حل مسئله‌ی تعیین ماشین‌آلات بارگذاری

ترکیب بهنیه‌ی منابع اثرگذار بارگذاری به‌منظور بیشینه‌سازی کل خروجی‌های سیستم، که براساس محدودیت‌های مدیریتی و متغیرهای تصمیم قابل تعریف است، را می‌توان به‌صورت روابط ۱۰ الی ۱۳ نشان داد. برای این منظور، پس از برآورد مدل ریاضی جایگزین مدل شبیه‌سازی به منظور تعیین ترکیب منابع اثرگذار بارگذاری مواد در راستای افزایش خروجی سیستم با اضافه‌کردن محدودیت‌های سیستمی ارائه شده است.

$$\begin{aligned} Max\,TP = {} & 39382.25 - 1640.25X_1 + 2331.81X_2 + \\ & 827.3X_3 + 8055.37X_4 + 240.19X_1X_3 - \\ & 406.12X_1X_4 - 297.06X_2X_3 - 546.12X_3X_4 \end{aligned} \quad (10)$$

$$s.t:$$

$$\sum_{i=1}^{4} C_i NS_i \le B \quad (11)$$

$$L_i \le NS_i \le U_i \qquad i = 1,2,3,4 \quad (12)$$

$$X_i \ \ integer \qquad i = 1,2,3,4 \quad (13)$$

معادله‌ی ۱۰، تابع هدف را نشان می‌دهد که طبق مراحل قبل تعیین شده است. معادله‌ی ۱۱، تضمین می‌کند که هزینه‌ی ماشین‌آلات بارگذاری از سطح بودجه‌ی در دسترس تجاوز نکند. در معادله‌ی ۱۲، محدوده‌ی تعریف‌شده برای بیل‌ها در نظر گرفته شده است. برای این منظور، حدود بالا و پایین، تعداد موجود، و هزینه‌ی به‌کارگیری ساعتی متغیرهای تصمیم به‌عنوان پارامترهای از پیش تعیین‌شده‌ی استفاده‌شده در Opt Quest قرار داده شده است. در جدول ۱، مقادیر جمع‌آوری‌شده‌ی مذکور نشان داده‌اند.

در این سطح از پژوهش حاضر، اهداف افزایش درآمد از طریق تولیدهای بیشتر و کاهش هزینه‌های جابجایی تجهیزات بارگذاری موجود مد نظر بوده است بنابراین، برای حل مسئله‌ی دو هدفه‌ی مذکور از روش اپسیلون محدودیت استفاده شده است؛ که مطابق آن، یکی از اهداف به‌عنوان تابع اصلی و هدف دیگر به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به اینکه برای هدف هزینه، کران بالای B در نظر گرفته شده است؛ لذا، در نوشتار حاضر، تابع هزینه‌ی کل به‌عنوان محدودیت در نظر گرفته شده است. ساختار تابع هزینه‌ی کل سیستم بارگذاری به‌صورت $C_T = \sum_{i=1}^{4} C_i NS_i \le B$ نشان داده شده است. این محدودیت هزینه در مدل به‌صورت $C_1NS_1 + C_2NS_2 + C_3NS_3 + C_4NS_4 \le B$ در نظر گرفته شده است؛ که در آن B، کران بالای سطح بودجه در دست برای ادوات بارگذاری در مجتمع معدن مس سرچشمه است، که باید از طریق تعیین مقدار بهینه‌ی تجهیزات بارگذاری، بهبود یابد یا سطح اخیر حفظ شود. مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح غیرخطی، با استفاده از نرم‌افزار LINGO حل شده و ترکیب بهینه‌ی منابع بارگذاری به‌صورت $X_1^* = 9, X_2^* = 8, X_3^* = 7, X_4^* = 2$ به‌دست آمده است. همچنین مقدار شبه‌مدل به ازاء ترکیب بهینه، یعنی $TP(X_1^*, X_2^*, X_3^*, X_4^*)$ برابر با ۴۸۲۱۰ تن به‌دست آمده است، که بیانگر افزایش میزان تولید از ۴۷۷۰۳ به ۴۸۲۱۰ تن است.

۳.۴. تحلیل حساسیت

در بخش کنونی، تأثیر تغییر در پارامترهای مدل بر روی تابع هدف بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا در مقدار عامل‌های کلیدی، یعنی بیل‌های مکانیکی نوع اول، نوع دوم، نوع سوم، و نوع چهارم نسبت به وضع بهینه تغییر بافته و مقدار تابع هدف بررسی شده است. در جدول ۷، تغییرات ناشی از پارامترهای ذکرشده بر روی مدل نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل‌شده، در صورت افزایش مقدار عامل‌های کلیدی، تجهیزات جابجایی نسبت به وضع موجود از ۴۷۷۰۳ تن تولیدات به ۴۷۹۸۶ تن تولیدات کل افزایش پیدا کرده است؛ اما نسبت به وضع بهینه، علیرغم به‌کارگیری بیشتر منابع، تولیدهای بیشتری حاصل نشده است. علاوه‌بر این، در صورت کاهش منابع نیز میزان تولیدها کاهش پیدا می‌کند.

علاوه‌بر تغییر اخیر، در مقدار بودجه‌ی دردسترس نیز تغییراتی به‌وجود آمده و تأثیر تغییرهای کاهشی و افزایشی آن در مقدار تابع هدف و میزان کل استخراج بررسی شده است. با توجه به نتایج حاصل‌شده، در صورتی که مقدار بودجه نسبت به وضعیت موجود افزایش یابد، ضمن افزایش در مقدار هزینه‌ها، مقدار

جدول ۸. تغییرات بر روی مقدار هزینه.

Status	Cost (Dollar)	Production (Tons)
Current	33870	48210
Increase	42870	48315
Decrease	15369	23458

تولید افزایش می‌کند. اما، مقدار تولید در مقایسه با وضعیت بهینه، که برابر با ۳۸۸ به‌دست آمده است، تغییر محسوسی کرده و برابر با ۴۸۳۱۲ تن محاسبه شده است. بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که افزایش در مقدار هزینه‌ها با توجه به افزایش در مقدار هزینه و تغییر محسوس در میزان تولید به صلاح نیست. اما در صورتی که مقدار بودجه کاهش یابد، علی‌رغم اینکه هزینه‌ها کاهش می‌یابند، اما افت بسیار شدیدی در مقدار تولید حاصل می‌شود. در جدول ۸ تغییرات افزایشی و کاهشی مربوط به مقدار هزینه و تاثیر آن بر میزان تولیدات نشان داده شده است.

۵. نتیجه‌گیری

در نوشتار حاضر، یک چارچوب سلسله‌مراتبی دوسطحی مبتنی بر شبیه‌سازی برای برنامه‌ریزی بهینه‌ی تولید و بارگذاری ماشین‌آلات در مجتمع معدن مس سرچشمه پیشنهاد شده است؛ که هدف از آن، بیشینه‌سازی درآمد معدن در هر شیفت کاری از طریق تعیین برنامه‌ی تولیدی بهینه‌ی انواع سنگ‌های معدنی مجتمع در سطح بالا و حل مسئله‌ی بارگذاری ماشین‌آلات (بیل‌های مکانیکی)، در سطح پایین بوده است. برای این منظور، از یک مدل شبیه‌سازی توسعه داده‌شده در نرم‌افزار ARENA، استفاده شده است. از ابزار Opt Quest جهت حل مسئله در سطح بالا و تعیین مقدار بهینه‌ی انواع مواد معدنی در مجتمع استفاده شده است. در سطح پایین چارچوب پیشنهادی اخیر، یک سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مبتنی بر بهینه‌سازی شبیه‌سازی یکپارچه به کمک شبه‌مدل رگرسیون و طراحی آزمایش‌ها طراحی شده است؛ که قادر است به‌منظور ارزیابی اثر تکنولوژی تولید در عملکرد یک سازمان به تصمیم‌گیران کمک کند. علاوه بر این، در سطح پایین چارچوب پیشنهادی نشان داده شده است که چگونه می‌توان با استفاده از مدل‌سازی شبیه‌سازی و شبه‌مدل رگرسیون، مقدار بهینه‌ی ترکیب منابع بارگذاری را به‌دست آورد.

در مقایسه با سایر مطالعات انجام‌شده، به‌طورکلی روش‌های مختلفی از لحاظ نظری برای رویکرد شبه مدل‌محور،[۵-۱] توسعه داده شده است. اما مهم‌ترین مزیت چارچوب پیشنهادی، ساختار سلسله‌مراتبی بودن آن است که به‌دلیل برنامه‌ریزی توأمان کوتاه‌مدت و بلندمدت در معدن هم از رویکرد شبه مدل‌محور و هم مدل‌محور استفاده شده است. این در حالی است که در هر یک از مطالعات مذکور، فقط از یک رویکرد شبه مدل‌محور و توسعه‌ی یک شبه‌مدل استفاده شده است. اما در پژوهش حاضر، فقط به توسعه‌ی یک شبه‌مدل بسنده نشده است. زیرا هر کدام از رویکردهای ذکرشده قادر به احصاء نیازهای برنامه‌های معدنی به‌طور جداگانه هستند. اما در پژوهش حاضر، با توسعه‌ی مبانی نظری و معرفی رویکرد بهینه‌سازی مدل‌های شبیه‌سازی به‌طور سلسله‌مراتبی، قابلیت اخیر به‌صورت هم‌زمان فراهم آورده شده است. این در حالی است که در برخی مطالعات،[۱۱، ۱۴، و ۲۶] فقط به برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در یک معدن از طریق مطالعه بر روی سیستم اعزام بهینه‌ی ترکیب‌های تجهیزات حمل‌ونقل پرداخته شده است؛ اما در پژوهش حاضر، به برنامه‌ریزی بلندمدت از طریق تعیین سطح بهینه‌ی تولیدها در درازمدت نیز توجه شده است.

با توجه به موارد اشاره‌شده و نتایج به‌دست‌آمده، بینش‌های مدیریتی مختلفی از اجرای پژوهش حاضر برای مدیران معادن، علی‌الخصوص مجتمع معدنی مس سرچشمه، به این شرح پیشنهاد شده است:

۱- ایجاد یک راهبرد جامع برای برنامه‌ریزی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، که شامل: اهداف واضح، معیارهای عملکرد، و زمان‌بندی‌های مشخص باشد.

۲- سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، مانند نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیشرفته برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و تصمیم‌گیری‌ها.

۳- ایجاد سیستم‌هایی برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های واقعی از عملیات معدن به‌منظور بهبود دقت مدل‌های شبیه‌سازی و تصمیم‌گیری.

۴- راه‌اندازی سیستم‌های پایش و ارزیابی مستمر برای بررسی عملکرد و آثار برنامه‌ریزی‌های انجام‌شده و انجام اصلاحات لازم.

۵- استفاده از شبیه‌سازی برای بررسی سناریوهای مختلف استخراج و برنامه‌ریزی، به‌منظور شناسایی بهترین گزینه‌ها و کاهش عدم قطعیت‌ها.

سرانجام، پیشنهادهایی که از سوی نویسندگان برای مطالعات آتی مطرح شده است، عبارت‌اند از: مقایسه‌ی عملکرد روش مدل‌سازی و روش حل جایگزین برای مسئله با چارچوب پیشنهادی ارائه‌شده در نوشتار حاضر به‌منظور کاهش زمان محاسبات و همچنین توسعه و ارائه‌ی چارچوبی به منظور ارزیابی سود حاصل در سیستم می‌توان اشاره کرد.

References - منابع

1. Abolghasemian, M., Kanai, A. G., and Daneshmandmehr, M. 2020. A two-phase simulation-based optimization of hauling system in open-pit mine. *Iranian journal of management studies*, *13(4),* pp. 705-732. https://doi.org/10.22059/ijms.2020.294809.673898
2. Nageshwaraniyer, S. S., Son, Y. J., and Dessureault, S. 2013. Simulation-based optimal planning for material handling networks in mining. *Simulation*, *89(3),* pp. 330-345. https://doi.org/10.1177/0037549712464278
3. de Sousa Junior, W.T., Montevechi, J.A.B., de Carvalho Miranda, R. and Campos, A.T., 2019. Discrete simulation-based optimization methods for industrial engineering problems: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering, 128*, pp.526-540. https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.073

4. Abolghasemian, M., Kanafi, A. G., and Daneshmand-Mehr, M. 2022. Simulation-Based Multiobjective Optimization of Open-Pit Mine Haulage System: A Modified-NBI Method and Meta Modeling Approach. *Complexity, 2022*. https://doi.org/10.1155/2022/3540736

5. Jahangiri, S., Abolghasemian, M., Ghasemi, P., and Chobar, A. P. 2023. Simulation-based optimisation: analysis of the emergency department resources under COVID-19 conditions. *International journal of industrial and systems engineering, 43(1),* pp. 1-19. https://doi.org/10.1504/IJISE.2023.128399

6. Chang, K.H., Chen, T.L., Yang, F.H. and Chang, T.Y., 2023. Simulation optimization for stochastic casualty collection point location and resource allocation problem in a mass casualty incident. *European Journal of Operational Research, 309(3),* pp.1237-1262. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.01.065

7. Ghasemi, A., Farajzadeh, F., Heavey, C., Fowler, J. and Papadopoulos, C.T., 2024. Simulation optimization applied to production scheduling in the era of industry 4.0: A review and future roadmap. *Journal of Industrial Information Integration, 39* p.100599. https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100599

8. Tekin, E., and Sabuncuoglu, I. 2004. Simulation optimization: A comprehensive review on theory and applications. *IIE transactions, 36(11),* pp. 1067-1081. https://doi.org/10.1080/07408170490500654

9. Teck, S., Dewil, R. and Vansteenwegen, P., 2024. A simulation-based genetic algorithm for a semi-automated warehouse scheduling problem with processing time variability. *Applied Soft Computing, 160*, pp.111713. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.111713

10. Jafferali, M., Venkateshwaran, J., and Son, Y. J. 2005. Performance comparison of search-based simulation optimisation algorithms for operations scheduling. *International Journal of Simulation and Process Modelling, 1(1-2)*, pp. 58-71. https://doi.org/10.1504/IJSPM.2005.007114

11. Ozdemir, B. and Kumral, M., 2019. Simulation-based optimization of truck-shovel material handling systems in multi-pit surface mines. *Simulation Modelling Practice and Theory, 95*, pp.36-48. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.04.006

12. Zhang, L., and Xia, X. 2015. An integer programming approach for truck-shovel dispatching problem in open-pit mines. *Energy Procedia, 75*, pp. 1779-1784. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.469

13. Chang, K.H. and Lin, C.P., 2023. An efficient simulation optimization method for the redundancy allocation problem with a chance constraint. *Journal of the Operational Research Society,* pp.1-15. https://doi.org/10.1080/01605682.2023.2272860

14. Shishvan, M.S. and Benndorf, J., 2019. Simulation-based optimization approach for material dispatching in continuous mining systems. *European Journal of Operational Research, 275(3)*, pp.1108-1125. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.015

15. Koenigsberg, E. 1982. Twenty five years of cyclic queues and closed queue networks: A review. *Journal of the Operational Research Society, 33(7)*, pp. 605-619. https://doi.org/10.1057/jors.1982.136

16. Miranda, R.D.C., Montevechi, J.A.B., Silva, A.F.D. and Marins, F.A.S., 2014. A new approach to reducing search space and increasing efficiency in simulation optimization problems via the fuzzy-DEA-BCC. *Mathematical Problems in Engineering, 2014*. https://doi.org/10.1155/2014/450367

17. Patel, M., and Desai, D. A. (2018). Critical review and analysis of measuring the success of Six Sigma implementation in manufacturing sector. *International Journal of Quality & Reliability Management, 35(8),* 1519-1545. https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2017-0081

18. Chinbat, U. and Takakuwa, S., 2009, December. Using simulation analysis for mining project risk management. *In Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC),* (pp. 2612-2623). IEEE. https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429647

19. Sbarbaro, H.M.D., 2021. Simulation Of Haulage Systems Using A Flexible Simulation Environment. *IFAC-PapersOnLine, 54(11)*, pp.133-138. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.063

20. Alarie, S., and Gamache, M. 2002. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 16(1)*, pp. 59-76. https://doi.org/10.1076/ijsm.16.1.59.3408

21. Sgurev, V., Vassilev, V., Dokev, N., Genova, K., Drangajov, S., Korsemov, C., and Atanassov, A. 1989. TRASY—an automated system for real-time control of the industrial truck haulage in open-pit mines. *European Journal of Operational Research, 43(1),* pp. 44-52. https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90408-6

22. Chanda, E. K. C., and Dagdelen, K. 1995. Optimal blending of mine production using goal programming and interactive graphics systems. *International Journal of Surface Mining and Reclamation, 9(4),* pp. 203-208. https://doi.org/10.1080/09208119508964748

23. Shih, J. S., and Frey, H. C. 1995. Coal blending optimization under uncertainty. *European Journal of Operational Research, 83(3)*, pp. 452-465. https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00243-6

24. Runciman, N., Vagenas, N., and Corkal, T. 1997. Simulation of haulage truck loading techniques in an underground mine using WITNESS. *Simulation*,

68(5), pp. 291-299. https://doi.org/10.1177/003754979706800504

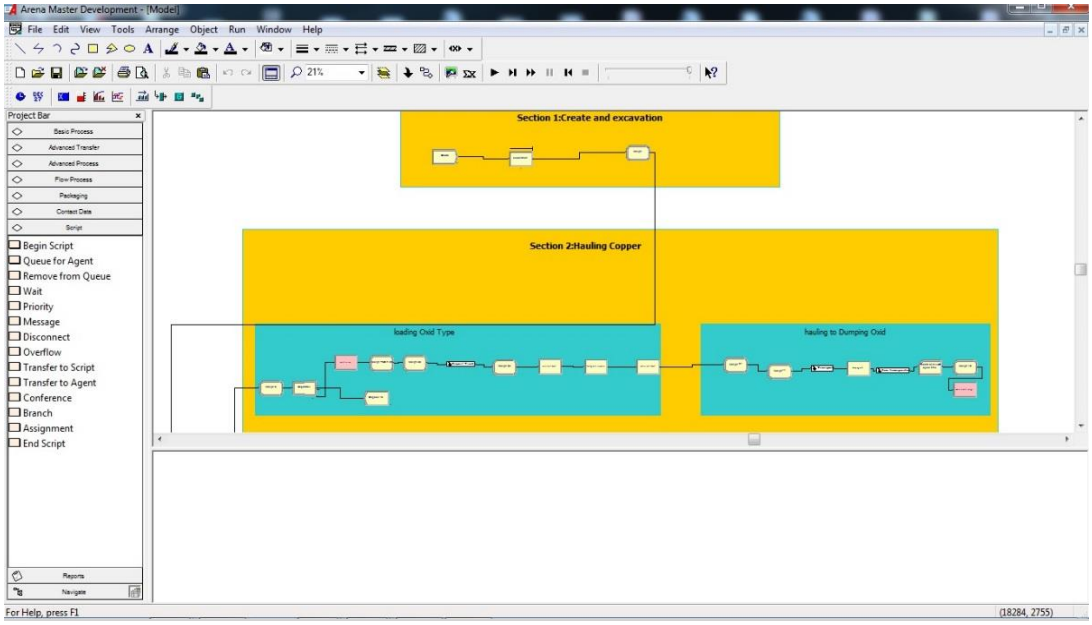
25. Chinbat, U., and Takakuwa, S. 2008. Using operation process simulation for a six sigma project of mining and iron production factory. *Winter Simulation Conference,* pp. 2431-2438. https://doi.org/10.1109/WSC.2008.4736351

26. Mena, R., Zio, E., Kristjanpoller, F., and Arata, A. 2013. Availability-based simulation and optimization modeling framework for open-pit mine truck allocation under dynamic constraints. *International Journal of mining science and Technology, 23(1)*, pp. 113-119. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2013.01.017

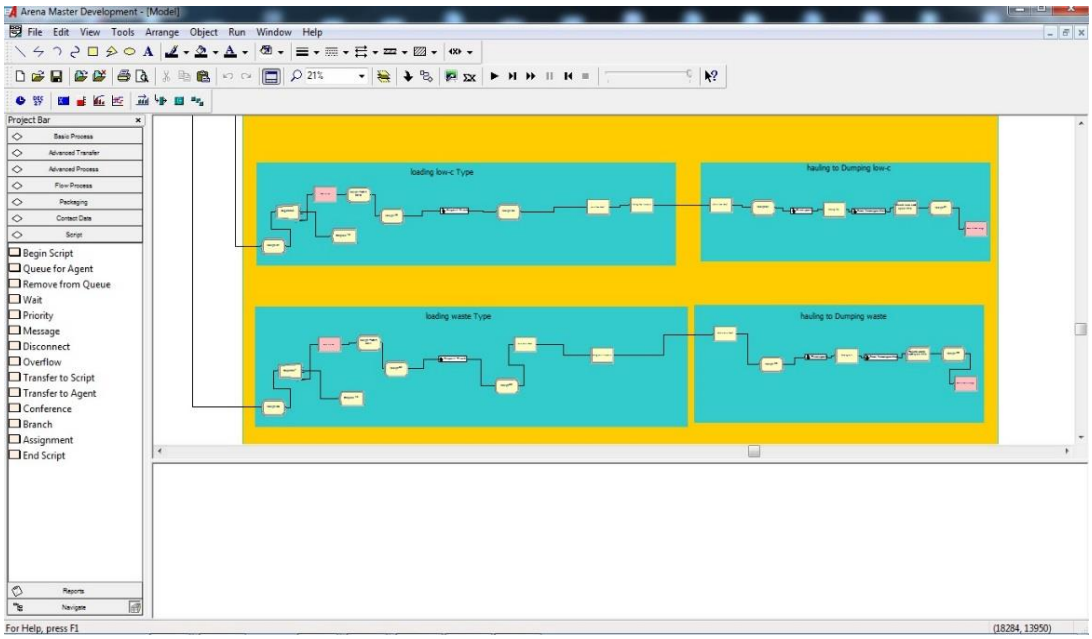
27. Taghizadeh, H., Bazrkar, A., & Abedzadeh, M. 2015. Optimization production planning using fuzzy goal programming techniques. *Modern Applied Science, 9(9),* pp. 68. http://dx.doi.org/mas.v9n9p68

28. Saidabad, A. A., & Taghizadeh, H. 2015. Performance and improvement of production line function using computer simulation (case study: An iron foundry). *American Journal of Computational Mathematics, 5(4),* pp. 431. https://doi.org/10.4236/ajcm.2015.54038

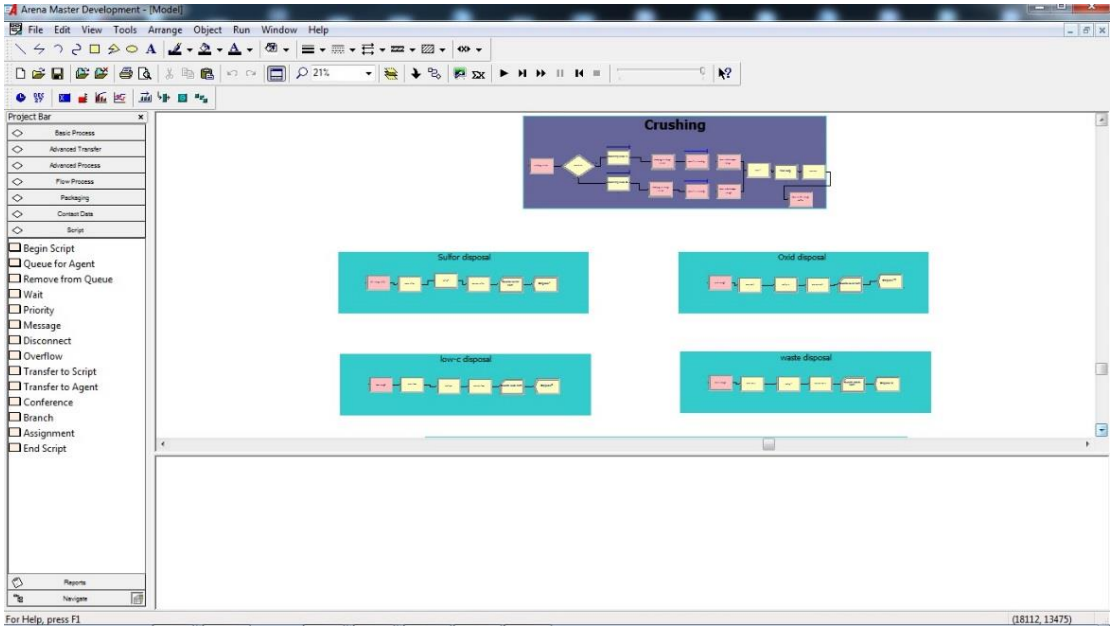
پیوست



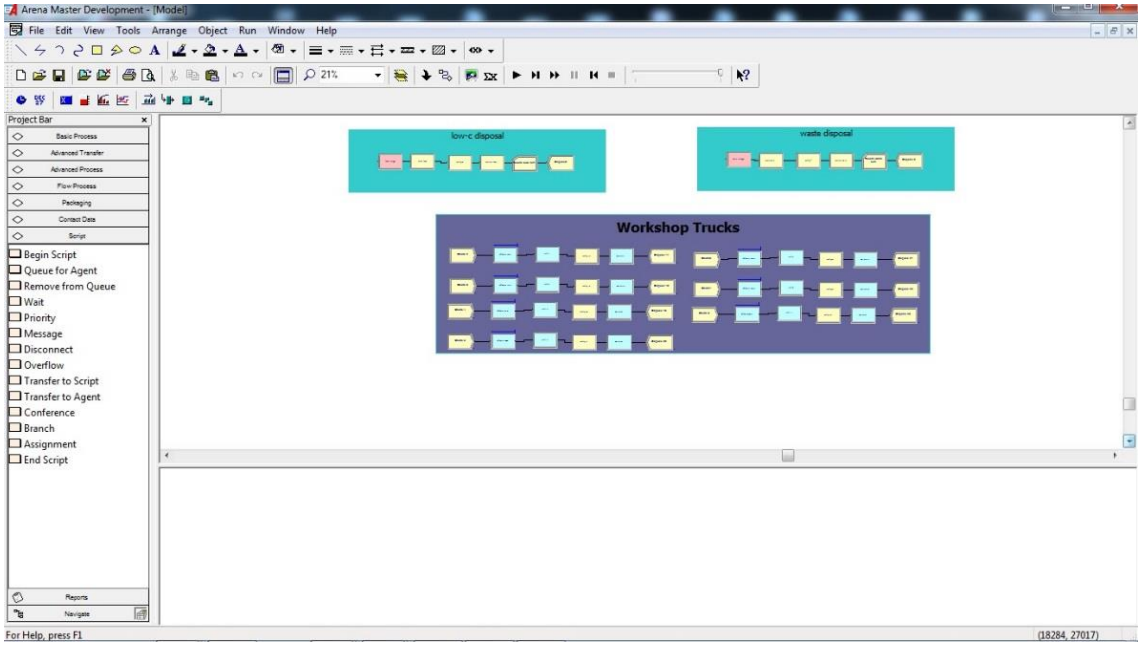
شکل ۱. محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های استخراج و حمل انوع سنگ های معدنی.



شکل ۲. ادامه محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های استخراج و حمل انواع سنگ های معدنی.



شکل ۳. محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های بخش سنگ شکن (کراشر).



شکل ۴. محیط نرم افزار برای تعریف ماژول های کارگاه کامیون ها و تجهیزات حمل و نقل.

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 141-151

Sharif University of Technology

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



Research Note

Economic and Environmental Optimization Model of the Amount of Waste Allocated to Different Methods of Urban Waste Disposal in Gilan Province

Yasin Mazloom Kalimani and Seyed Hesamodin Zegordi*

Faculty of Industrial and Systems Engineering, Tarbiat Modares University
* corresponding author: (zegordi@modares.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:5 August 2024

Revised:30 October 2024

Accepted:1 Dcember 2024

Keywords:

Renewable energy,
economic model,
environment,
Garbage incineration.

Abstract

This article examines the waste management system to assess the feasibility of constructing a waste incineration power plant. Due to the haphazard burial of waste daily in the Saravan region of Rasht, without adherence to proper burial engineering principles, there are several potential environmental consequences. These include the contamination of surface water through the release of leachate, the infiltration of leachate into lower layers, and the risk of groundwater contamination of underground water, which is causing poisoning and severe harm to the local population. Additionally, the feeding of indigenous animals with waste, the release of gas into the environment, and the detrimental effects on the existing plants and wildlife are worth mentioning. Hence, this study aims to provide a framework for assessing the economic and environmental elements of energy generation from municipal garbage in Gilan Province. Additionally, the study will analyze the feasibility of implementing this project from several economic and environmental perspectives. This study examines three methods, namely unsanitary depots (landfills), composting (organic fertilizer companies), and waste incineration facilities with gasification technology, in two scenarios to compare the effects of constructing or not constructing waste incineration power plants. The final model, incorporating GAMS software, is implemented using the exact number programming method. The findings are presented: The feasibility study for constructing a waste incineration plant utilizing gasification technology indicates a daily cost savings of $2,485,915. This plant would be capable of disposing of 600 tons of waste while also considering economic and environmental factors. Despite the fact that the construction of a power plant requires a relatively large initial investment and is apparently expensive, in the end, with a sharp reduction in environmental consequences, as well as electricity production and side income generation in this way, the most optimal method among the available options in waste management is counted.

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:
Mazloom Kalimani, Y. and Zegordi, S.H. 2026. Economic and environmental optimization model of the amount of waste allocated to different methods of urban waste disposal in gilan province, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.141-151. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64872.2409

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

یادداشت فنی

مدل بهینه‌سازی اقتصادی و زیست‌محیطی میزان زباله‌ی تخصیص‌یافته به روش‌های مختلف دفع پسماند شهری در استان گیلان

یاسین مظلوم کلیمانی و سید حسام‌الدین ذگردی *

دانشکده‌ی مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول (zegordi@modares.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۵

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۸/۰۹

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

واژگان کلیدی:

انرژی تجدیدپذیر،

مدل اقتصادی،

محیط‌زیست،

زباله‌سوز.

چکیده

در نوشتار حاضر، سیستم مدیریت پسماند برای ارزیابی احداث نیروگاه زباله‌سوز در نظر گرفته شده است. زباله‌ها، روزانه به‌صورت غیراصولی در منطقه‌ی سراوان رشت بدون رعایت اصول مهندسی دپو می‌شوند؛ که می‌توان به پیامدهای زیست‌محیطی متعددی برای آن اشاره کرد. لذا در مطالعه‌ی حاضر، با ارائه‌ی مدلی به ارزیابی تولید انرژی از پسماند زباله‌های شهری استان گیلان پرداخته و اجرای این طرح از جنبه‌های مختلف اقتصادی و زیست‌محیطی بررسی شده است. همچنین، برای سه روش دپوی غیربهداشتی، کمپوست‌سازی، و تأسیسات زباله‌سوز با فناوری گازی‌سازی طی دو سناریو، احداث و یا عدم احداث نیروگاه زباله‌سوز بررسی و مدل نهایی با نرم‌افزار گمز، تحت روش برنامه‌ریزی عدد صحیح اجرا شده است. لذا نتیجه‌ی امکان‌سنجی احداث نیروگاه زباله‌سوز با فناوری گازی‌سازی، صرفه‌جویی معادل ۲،۴۸۵،۹۱۵ دلار روزانه را با احداث نیروگاه زباله‌سوز به‌منظور دفع ۶۰۰ تن پسماند در مجموع شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی نشان می‌دهد.

۱. مقدمه

رشد فزاینده‌ی مواد زائد تولیدی از فعالیت‌های بشر، از نظر تنوع و مقدار و مضرات بالقوه‌ی آن‌ها بر محیط‌زیست و سلامتی جوامع، آگاهی‌های فزاینده‌ای را در سطح جهانی در مورد نیاز ضروری به استفاده و به کارگیری روش‌های علمی برای دفع ایمن پسماندها ایجاد کرده است.[۱]

۱.۱. پیشینه‌ی پژوهش

از آنجا که نیاز آشکاری برای کاهش تولید پسماندها و تلاش برای بازیافت و استفاده‌ی مجدد از آن‌ها وجود دارد، فناوری‌های استحصال انرژی از پسماندها می‌توانند نقش مهمی در کاهش مشکلات در کنار بازیافت انرژی ذاتی آن‌ها داشته باشند. فناوری‌های مذکور می‌توانند کاهش قابل‌توجهی در میزان کل مقادیر پسماند که نیاز به دفع نهایی دارند، ایجاد کنند و موجب ایجاد دفع بهداشتی بهتری در شرایط کنترل‌شده و با رعایت استانداردهای کنترل آلودگی شوند. در بررسی‌های اقتصادی هر طرح، علاوه‌بر مسائل فنی و مالی، لازم است آثار طرح بر محیط‌زیست لحاظ شود و در محاسبات، هزینه‌های زیست‌محیطی به حساب آیند.

برای نمونه، در برخی نوشتارها، فقط امکان‌سنجی اقتصادی با استفاده از شاخص‌های ارزش فعلی خالص و نرخ بازده داخلی ارزیابی شده است.[۲ و ۳]

امروزه، هزینه‌ی دفن پسماند در زیر خاک، چه از نظر اقتصادی و مخصوصاً زیست‌محیطی خیلی بیشتر شده و عملاً کار را با مشکل مواجه ساخته است. زباله‌سوزی، راه‌حل دیگری برای دفع پسماندهاست، که از سال‌ها قبل در کشورهای پیشرفته‌ی صنعتی دنیا مرسوم بوده است. ارزش حرارتی پسماند، کمبود زمین در بسیاری مناطق و آلودگی‌هایی که دفن پسماندها در محیط‌زیست و آب‌های زیرزمینی ایجاد می‌کنند، از جمله مواردی است که سبب توسعه‌ی استفاده از زباله‌سوزها شده است.

از این رو، زباله‌سوزی یکی از راه‌های نوین دفع پسماند در جوامع پیشرفته‌تر بوده است. دفن، کمپوست، و سوزاندن در دمای بالا، روش‌های اصلی دفع زباله‌های شهری هستند. روش دفن، اگرچه به‌راحتی اجرا می‌شود، اما باعث آلودگی ثانویه‌ی منابع طبیعی، مانند: خاک، جو، و آب‌های زیرزمینی می‌شود. استفاده از روش کمپوست برای دفع زباله، نیاز به محتوای آلی بالایی از زباله دارد و کاهش زباله از این طریق دشوار است و مقدار زیادی از منابع زمین را اشغال می‌کند. در مقابل، روش سوزاندن، که می‌تواند براساس منابع و کاهش نیازها برای تصفیه‌ی زباله‌های جامد شهری، آسیب کمتری به همراه داشته باشد، مؤثرترین روش است. رویکرد سوزاندن، اجزاء قابل احتراق زباله را در دمای بالا می‌سوزاند و آن‌ها کاملاً اکسید می‌شوند و درنهایت، به خاکستر بی‌ضرر و پایدار تبدیل می‌شوند.[۴-۶]

استناد به این مقاله:

مظلوم کلیمانی، یاسین و ذگردی، سیدحسام الدین، ۱۴۰۴. مدل بهینه‌سازی اقتصادی و زیست‌محیطی میزان زباله‌ی تخصیص‌یافته به روش‌های مختلف دفع پسماند شهری در استان گیلان. مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص.۱۴۱-۱۵۱. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64872.2409

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

به‌طورکلی، سوزاندن امکان کاهش قابل‌توجه ضایعات را فراهم می‌سازد و اشغال زمین را تا حد زیادی کاهش می‌دهد و انرژی حرارتی برای گرمایش و تولید برق بازیابی می‌کند. سوزاندن، نوعی فناوری تصفیه‌ی زباله‌های خانگی شهری است، که به‌طورگسترده در برخی از کشورهای پیشرفته‌ی جهان استفاده می‌شود. پس از عملیات سوزاندن، حجم زباله‌ها را می‌توان تا ۹۰٪ کاهش داد. علاوه‌براین، سوزاندن در دمای بالا می‌تواند تعداد زیادی از باکتری‌های بیماری‌زا و مواد سمی را از بین ببرد و درجه‌ی باکتری‌های مضر را که محیط را آلوده می‌کنند، کاهش دهد.[۹-۷]

چگونگی انتخاب یک سیستم مدیریت پسماند جامد شهری با انرژی کارآمد، سازگار با محیط‌زیست، و مقرون به صرفه، چالش بزرگی است که باید توسط تصمیم‌گیرندگان انجام شود.[۱۰]

موضوع موردمطالعه در پژوهش حاضر، با دغدغه‌ی حل یک مسئله‌ی زیست‌محیطی ملی و نیز بر مبنای رفع یک معضل حیاتی بوده است؛ لذا از آنجایی که مدل مطلوبی در بین نوشتارهای موجود یافت نشده است که جوابگوی رفع مشکل منطقه باشد، مدل‌سازی کنونی کاملاً به شکل میدانی و اصطلاحاً از بطن چالش موجود به‌دست آمده است؛ و درواقع، می‌توان همین رویکرد را به‌عنوان یک نوآوری در این زمینه دانست.

۲.۱. ضرورت ارزیابی نحوه‌ی مدیریت پسماند شهری

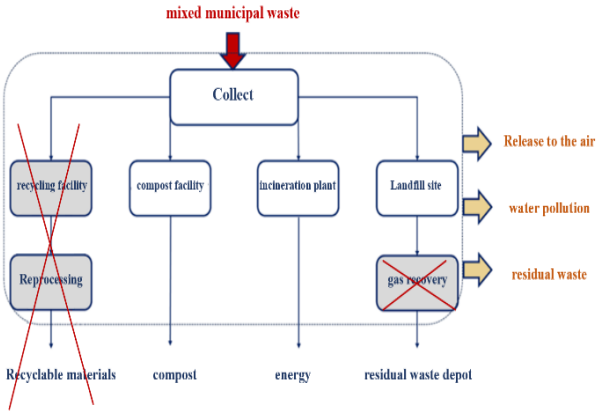
در حال حاضر، هدف نهایی از حفاظت محیط‌زیست، دستیابی به توسعه‌ی پایدار در قالب برنامه‌های اقتصادی هماهنگ با اصول حفاظت از محیط‌زیست و ممانعت از تخریب و تهی‌سازی منابع تجدیدشونده و غیرقابل‌تجدید است.

لذا، برای حل بنیادی مشکلات بحرانی محیط‌زیست باید دیدگاه‌های کلان و زیربنایی توسعه منطبق با قانونمندی‌های حفاظت محیط‌زیست طراحی شوند و هر گونه سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی‌های توسعه‌ی اقتصادی، اجتماعی، و فرهنگی آینده‌ی کشور بر شالوده‌ی حفاظت محیط‌زیست و منابع طبیعی و بهره‌وری خردمندانه از منابع مذکور با نگرش ایجاد تعادل و تناسب بین قانونمندی‌های محیط‌زیست و توسعه‌ی پایدار صورت گیرد.

کاربرد ارزیابی آثار زیست‌محیطی به‌عنوان یکی از ابزارهای مدیریت محیط‌زیست، چنانکه از سه دهه‌ی قبل در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه، معمول بوده است؛ الزام استفاده از این نگرش را برای پروژه‌های بزرگ عمرانی، نظیر: محل‌های دفن زباله‌ی شهری تأکید می‌کند. مشکلات زیست‌محیطی محل‌های دفن زباله‌ی شهری و محیط‌های پیرامونی آن‌ها از دیرباز موردتوجه مردم و مسئولان بوده است.

در دهه‌های اخیر، به ویژه پس از توسعه‌ی دانش مدیریت مواد زائد جامد، محل‌های دفن زباله‌ی شهری به شکلی که در سال‌های گذشته بهره‌برداری شده‌اند، موجب شده است که مسائل مرتبط با محیط‌زیست نیز به‌صورت بحرانی‌تری مطرح شود.

لذا برای کاهش مشکلات زیست‌محیطی موجود، نخستین هدف ارزیابی برای اطمینان‌یافتن از رعایت سیاست‌ها و خط‌مشی‌های تعیین‌شده در برنامه‌ها و فعالیت‌های طرح‌ها و با پروژه‌های مذکور در راستای ضوابط معیارها، قوانین و مقررات زیست‌محیطی دولتی مطرح شده است. از این رو، تهیه‌ی یک مدل ارزیابی، شامل شناسایی کلیه‌ی آثار مهم طرح‌ها و یا پروژه‌های پیشنهادی ساختارهای دفع زباله‌ی شهری، ضروری است که با ارائه‌ی گزینه‌های منطقی



شکل ۱. نمای شماتیک از فرآیند مدیریت زباله‌ی غیرقابل بازیافت.

و مقبول، کمینه‌ی آثار منفی و سوء نظر را با بیشینه‌ی افزایش کیفیت زندگی برای انسان‌ها و بیشترین اعتماد و اطمینان را در سطوح تصمیم‌گیران و مردم ایجاد کند.

در شکل ۱، نمای شماتیکی از فرآیند مدیریت زباله‌ی غیرقابل‌بازیافت مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، روند مدیریت پسماند فقط با درنظرگرفتن زباله‌های غیرقابل بازیافت، که از نظر نوع پسماند مصرفی هم‌پوشانی دارند، در شرایط لندفیل غیربهداشتی، کمپوست‌سازی، و زباله‌سوزی بررسی شده است. زباله‌های کلان‌شهر رشت از سال ۱۳۶۳ به منطقه‌ی جنگلی سراوان انتقال یافته است.

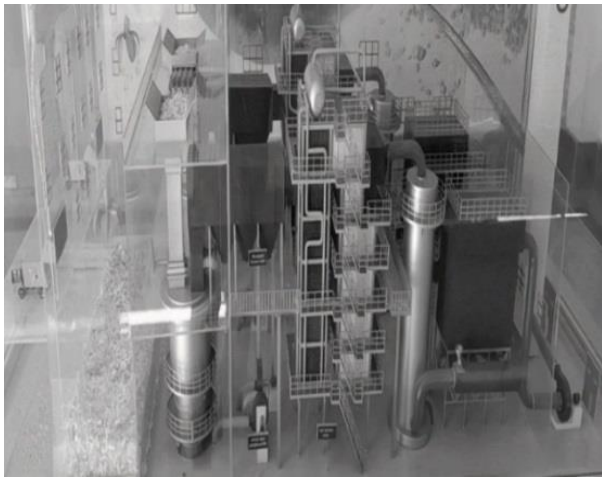
محل تلنبار زباله‌ی سراوان رشت، طبق اصول مهندسی محل دفن، طراحی و اجرا نشده و فاقد اجزاء لازم برای محل دفن بهداشتی بوده است. از اصلی‌ترین مسائل زیست محیطی شناخته‌شده در محل دفن سراوان، می‌توان به آلودگی آب‌های سطحی با انتشار شیرابه، نفوذ شیرابه به لایه‌های زیرین، و احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی، مسمومیت، و آسیب‌های جدی به ساکنان منطقه، تغذیه‌ی حیوانات بومی از زباله‌ها، انتشار گاز در اتمسفر، و آسیب به پوشش گیاهی و حیات وحش موجود اشاره کرد. براساس برآوردها، مقدار پسماند دفن‌شده در دفنگاه سراوان تاکنون بالغ بر حدود ۱۷میلیون تن بوده است و در حال حاضر نیز به طورروزانه حدود ۶۰۰ تن زباله‌ی شهری به منطقه‌ی مذکور منتقل می‌شود.

۳.۱. فناوری گازی‌سازی

نیروگاه زباله‌سوز با فناوری گازی‌سازی، یک روش نوین برای تبدیل زباله‌های شهری به انرژی است؛ که توسط آن، زباله‌ها با استفاده از فرایند گازی‌سازی به گازهای قابل سوخت، شامل: گازهای متان، هیدروژن، اکسیدکربن، و گازهای سنتزی تبدیل می‌شوند، که قابلیت استفاده به‌عنوان سوخت در تولید برق و حرارت را دارند.

فناوری گازی‌سازی در نیروگاه زباله‌سوز، برخی مزایا و فواید مهمی دارد؛ که به دلیل استفاده از زباله‌های شهری به‌عنوان منبع انرژی، می‌تواند به تحقق اهداف مدیریت پایدار زباله‌ها و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی کمک کند. همچنین، استفاده از آن می‌تواند باعث کاهش آلاینده‌های محیطی، ناشی از دفن زباله‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای شود.

مدیریت پسماندها و تولید انرژی پایدار در جوامع شهری به یک چالش جدی تبدیل شده است؛ که به‌منظور مواجهه با آن، نیروگاه‌های زباله‌سوز با تکنولوژی "گازی‌سازی" به‌عنوان یک روش پیشرفته برای تولید انرژی حرارتی- الکتریکی



شکل ۲. ماکت فرایند زباله‌سوزی پسماند شهری.

از زباله‌ها به‌منظور مدیریت بهینه‌ی پسماندها و تأمین انرژی پایدار در حال ظهور هستند.

نیروگاه زباله‌سوز از طریق فرایند "گازی‌سازی"، زباله‌های جامد را به گازهای قابل‌سوخت تبدیل می‌کند، و زباله‌ها در دماهای بالا و در شرایط آب‌وهوایی بی‌هوازی تحت عملیات شیمیایی تجزیه می‌شوند و گازهای قابل‌سوخت مانند متان و هیدروژن تولید می‌شوند.

سپس گازهای اخیر دریک موتور توربین گازی به انرژی حرارتی و سپس از طریق یک ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شوند.[۱۱-۱۴] در شکل ۲، به‌صورت شماتیک، بررسی ساختار کلی نیروگاه زباله‌سوز مشاهده می‌شود.

- **بخش اول**، مربوط به زباله سوزی است؛ که در آن، زباله‌ها با گذر از یک واحد تفکیک و پردازش به واحد زباله‌سوزی وارد می‌شوند. رعایت فناوری گازی‌سازی و پیرولیز سازنده‌ی خارجی با هدف کنترل درجه‌ی حرارت و زمان ماند و همچنین نوع کوره‌های استفاده‌شده به دلیل تولید کمینه‌ی گازهای غیرقابل کنترل و مضر بوده است.

- **بخش دوم**، مربوط به تجهیزات تولید برق نیروگاه است؛ گازهای گرم تولیدشده در حدود ۱۲۰۰ درجه‌ی حرارت با عبور از بویلر، انرژی حرارتی خود را به ژنراتور و توربین جهت تولید برق انتقال خواهد داد.

- **بخش سوم**، مربوط به تجهیزات کنترل آلاینده‌ها در اسید اسکرابر و سیستم فیلتراسیون خروجی گاز با هدف دستیابی به استاندارد محیط‌زیست آمریکا (۲۰۱۲) بوده است؛ که شامل سیستم تصفیه‌خانه‌ی فاضلاب و شیرابه می‌شود، که منوط به رعایت استاندارد پساب خروجی ملی ایران خواهد بود.

۲. ارزیابی ساخت نیروگاه زباله‌سوز

همان‌طور که در بخش مقدمه عنوان شد، با درنظرداشتن روند کلی طرح مدیریت پسماند، ذی‌نفعان طرح عبارت‌اند از:

۱. ساکنان منطقه در وهله‌ی اول، به‌عنوان اصلی‌ترین تأثیرپذیران پیامدهای مختلف وضعیت پسماند منطقه.
۲. سازمان مدیریت پسماند شهرداری.
۳. مجری طرح نیروگاه زباله‌سوز (شرکت خصوصی).
۴. وزارت نیرو به‌عنوان یکی از متولیان امر.

۱.۲. مدل ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی

مدل ریاضی ارزیابی اقتصادی و زیست محیطی اجرای طرح نیروگاه زباله سوز به‌عنوان یکی از روش‌های مدیریت پسماند و نیز استحصال انرژی از زباله به شرح رابطه‌ی ۱، قابل اجرا خواهد بود:

$$MinZ = \sum_i \sum_j \left(-V_{ij} \cdot r_j + c_j + l \cdot rr_j + cc_j \right) \cdot x_{ij} \qquad (1)$$

که در آن، V_{ij} ارزش حرارتی ویژه‌ی زباله‌ی نوع i در تأسیسات نوع j، r_j نرخ خرید خروجی حاصل در تأسیسات نوع j، c_j هزینه‌ی احداث و عملیات تأسیسات نوع j، l هزینه‌ی دپوی زباله‌ی نهایی، rr_j نرخ زباله‌ی باقیمانده پس از عملیات در تأسیسات نوع j، cc_j هزینه‌ی زیست‌محیطی تأسیسات نوع j، X_{ij} به‌عنوان متغیر اصلی مسئله‌ی مقدار زباله‌ی دفع‌شده‌ی نوع i در تأسیسات نوع j، و Z به‌عنوان مقدار خروجی نهایی مسئله‌ی هزینه‌ی دفع زباله از روش‌های مختلف، که هدف آن کمینه‌سازی است.

اما روابط مربوط به محدودیت‌های مدل، به‌صورت رابطه‌های ۲ و ۳ است (رابطه‌ی ۲، درخصوص ظرفیت دفع تأسیسات نوع j و رابطه‌ی ۳، درخصوص تقاضای دفع زباله‌ی نوع i است):

$$capacity = \sum_i X_{ij} \le a_j \qquad (2)$$

$$demand = \sum_j X_{ij} \ge g_i \qquad (3)$$

لذا برای مسئله‌ی ذکرشده، یک متغیر اصلی و دو محدودیت در نظر گرفته شده است.

با توجه به ماهیت طرح موردنظر، فرضیه‌ها به این صورت هستند که در حال حاضر، زباله‌ها به دو شکل دپوی غیربهداشتی و کمپوست‌سازی دفع می‌شوند و روش‌های مذکور، وضعیت جاری ساختار مدیریت پسماند را ترسیم می‌کنند. در واقع، برنامه‌ی پژوهش حاضر، اضافه‌کردن نیروگاه زباله‌سوز به‌عنوان روش سوم ساختار مدیریت پسماند بوده و هدف از اجرای مدل ذکرشده، امکان‌سنجی و ارزیابی وضعیت آن با ساخت نیروگاه زباله‌سوز است. حال باید خاطر نشان ساخت که با توجه مفروضات ذکرشده، عناوین هزینه‌ها و درآمدهای ناشی از اجرای طرح، که در ساختار مدل نیز گنجانده شده‌اند، به شرح جدول ۱ است.

در جدول۲ ، ترکیب‌های موجود در زباله‌ی شهری، که توسط روش‌های مختلف دفع می‌شوند، به‌عنوان یکی از عوامل مهم که در ساختار مدل دخیل است، ارائه شده‌اند.

جدول ۱. هزینه های سرمایه‌گذاری نیروگاه زباله‌سوز با فناوری گازی‌سازی.

Indicator	case
Cost	Land and accessories
	building construction
	Production line equipment
	salary
	Environment caused by pollutants
Income	Sale of compost
	Sale of power plant electricity

جدول ۲. ترکیب‌های پسماند موجود فرآوری‌شده یا دفع‌شده توسط تأسیسات مختلف.

facilities	Garbage composition
Unsanitary depot compost waste incinerator	**Organic materials**
	Inorganic materials: - Rubber - Plastic - Paper - textiles -Wood

۲.۲. روش حل مدل

حل مدل نهایی مسئله با نرم‌افزار گمز[1] در طی دو سناریو (۱. وجود تأسیسات زباله‌سوز؛ ۲. نبود تأسیسات زباله‌سوز) برنامه‌ریزی شده است، تا طرح مذکور را به جهت امکان بهبود وضعیت موجود از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی امکان‌سنجی سازد.

۳. مطالعه‌ی موردی (احداث نیروگاه زباله‌سوز در شهر رشت: استان گیلان)

سیستم مدیریت پسماند زباله‌ی غیرقابل‌بازیافت، در حال حاضر شامل دپوی غیربهداشتی در منطقه‌ی سراوان و نیز کارخانه‌ی کود آلی (کمپوست) در شهرک صنعتی لاکان رشت است، که پژوهش حاضر قصد دارد نیروگاه زباله‌سوز را به‌عنوان گزینه‌ی سوم فرایند مذکور از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی بررسی کند.

زباله‌های شهر رشت و شهرهای حوزه‌ی مرکزی استان گیلان (شامل ۱۳ شهر و ۵۲ دهستان) در حدود ۸۰۰ تن در روز هستند؛ که حدود ۶۰۰ تن از آن‌ها، شامل زباله‌های غیرقابل بازیافت است، که موضوع بحث پژوهش حاضر است. مقادیر تولید زباله در شهر رشت، عمدتاً شامل پسماندهای خانگی و پسماندهای جمع‌آوری‌شده از برخی مراکز تجاری با خصوصیات شبیه پسماند خانگی است، که جزئیات آن در جدول ۳ ارائه شده است.
لذا در بخش کنونی، به بررسی اولیه‌ی هر یک از روش‌های مدیریت پسماند پرداخته شده است.

۱.۳. دپوی غیربهداشتی زباله

زباله‌های کلان‌شهر رشت از سال ۱۳۶۳ به منطقه‌ی جنگلی سراوان انتقال یافته‌اند. منطقه‌ی سراوان در فاصله‌ی ۲۰ کیلومتری جنوب شهر رشت واقع شده است؛ که فاصله‌ی آن تا جاده‌ی اصلی قزوین- رشت، حدوداً ۲ کیلومتر با ارتفاع ۲۰۰ متر از سطح دریاست، که زباله‌ها، روزانه به‌صورت غیراصولی در آن دفن می‌شوند.

محل دفن زباله‌ی سراوان را نمی‌توان به‌عنوان یک محل دفن بهداشتی قلمداد کرد؛ زیرا فاقد بیشتر معیارها و تجهیزات و تمهیدات لازم برای محل دفن بهداشتی است؛ که شامل نقص‌هایی مانند: خاک پوششی موردنیاز روزانه، لاینر، زه‌کشی شیرابه، حفاظ پوششی، و سیستم جمع‌آوری و تصفیه‌ی شیرابه و گاز است. محل تلنبار زباله در یک دره با پوشش گیاهی طبیعی قرار گرفته و مشابه همه‌ی مناطق شمالی ایران به‌علت گسترش جنگل سراوان، توسط درختان احاطه شده است.

مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی شناخته‌شده در محل دفن زباله‌ی سراوان، عبارت‌اند از:

- آلودگی آب‌های سطحی توسط انتشار شیرابه.
- نفوذ شیرابه به لایه‌های زیرین و احتمال آلودگی آب‌های زیرزمینی.
- انتشار گاز در اتمسفر.
- تغذیه‌ی حیوانات بومی از زباله‌ها.
- آسیب به پوشش گیاهی و حیات وحش موجود.

براساس برآوردها، مقدار پسماند دفن‌شده در دفن‌گاه سراوان تاکنون بالغ بر حدود ۱۷میلیون تن است و در حال حاضر نیز به طور روزانه ، حدود ۶۰۰ تن زباله‌ی شهری به آنجا منتقل می‌شود.

شیرابه‌ی زباله، حاوی ترکیب‌ها و آلاینده‌های گوناگون، از جمله فلزات سنگین است. بهترین مکان برای دفن مواد زائد برای جلوگیری از نفوذ شیرابه به آب‌های زیرزمینی، مکان‌هایی هستند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند. در چنین مکان‌هایی عمدتاً به‌دلیل وجود زمین کافی و پایین‌بودن عمق آب‌های زیرزمینی، شرایط دفن نسبتاً ایمن است.

۲.۳. کارخانه‌ی کود آلی (کمپوست)

کارخانه‌ی کود آلی، شامل زمینی به مساحت ۷ هکتار است؛ که دارای سوله‌ی عملیات مکانیکی (دریافت و جداسازی دستی)، سوله‌های مخصوص تخمیر اولیه و مخصوص تخمیر ثانویه، سوله‌ی تولید کود نرم، انبارها (انبار مخصوص قطعات کارخانه و انبار کود) ، و ساختمان‌های اداری و کارگری است.

پسماندها (اعم از تر و خشک)، در سالن دریافت شرکت کود آلی، دپو و سپس به سالن عملیات مکانیکی وارد می‌شوند. پس از طی مراحل جداسازی و تفکیک ضایعات خشک، که بر روی تفاله به‌صورت دستی انجام می‌شود، مواد همجنس جدا و در تونل‌های مخصوص جمع‌آوری می‌شوند. در نهایت، پس از جمع‌آوری و بسته‌بندی به انبار تحویل داده می‌شوند.

جدول ۳. درصد مواد تشکیل‌دهنده‌ی غیرقابل بازیافت زباله‌های شهری.

type of waste	Quantity (tons per day)	Mass percentage (%)
Organic materials	432	72
Plastic	71	11.8
Paper	64	10.7
rubber	15	2.5
textiles	12	2
Wood	6	1
Total	600	100

[1] GAMS

مواد قابل‌تبدیل به کود آلی (زباله‌ی تر) به سالن مسقف تخمیر زباله منتقل و در آنجا با هوادهی مستمر و اختلاط و جابجایی مداوم آبگیری می‌شوند. سپس، توسط دستگاه هوادهنده خشک می‌شوند و در ادامه، تخمیر هوازی نیز صورت می‌گیرد. پس از غربال‌کردن‌های متوالی،کمپوست تشکیل‌شده‌ی قابل‌ارائه به بازار، در انبار محصول جمع‌آوری می‌شود.

شرکت کود آلی گیلان، در حال حاضر دو خط اسمی ۲۵۰ تنی و دو سوله‌ی تخمیر به متراژ ۶۰۰۰ مترمربع دارد. ظرفیت فعلی ورودی زباله در هر خط آن در هر شیفت کاری حدود ۲۰۰ تن در روز است، که زیر سرندی‌های آن‌ها، برای تولید کمپوست تفکیک می‌شوند و پس از ورود به سالن تخمیر، برای مدت ۶۰ روز نگهداری می‌شوند، تا فرایند تخمیر کامل شود. بنابراین، بعد از گذشت دو ماه، کود حاصل از تخمیر به سالن‌های بلوغ وارد و پس از فرآوری و دانه‌بندی برای فروش آماده می‌شود.

براساس آمار ارائه‌شده از شرکت کود آلی، روزانه ۶ تن کود از حدود ۴۰۰ تن زباله‌ی ورودی به خطوط تولید می‌شود. به‌عبارتی، به ازاء هر تن زباله‌ی تر، حدود ۱۵ کیلوگرم کود کمپوست به‌دست می‌آید، که شیرابه‌ی حاصل از آن در حدود ۱۲ مترمکعب در روز و به ازاء هر تن زباله، حدود ۳۰ لیتر است. همچنین شایان ذکر است که هزینه‌ی ناشی از تبدیل هر تن زباله به کود کمپوست، در حدود ۴،۰۰۰،۰۰۰ ریال (معادل ۸ دلار آمریکا) برآورد شده است.

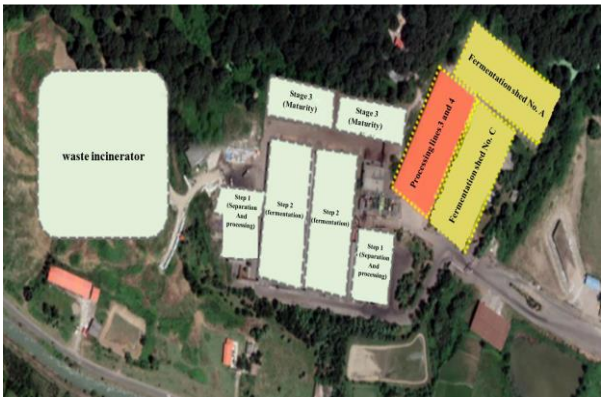
۳.۳. نیروگاه زباله‌سوز

پروژه‌ای که در گزارش حاضر ارزیابی شده است، با عنوان "طرح احداث نیروگاه زباله‌سوز شهر رشت" با ظرفیت پذیرش سالانه حدود ۲۱۸،۰۰۰ و ۶۰۰ تن زائدات جامد شهری در روز در قالب ۴ خط ۱۵۰ تنی با تولید انرژی برق به میزان ۳۸،۰۰۰ مگاوات ساعت خالص انرژی الکتریکی اسمی در سال جهت تزریق به شبکه‌ی سراسری تحت کارفرمایی شهرداری شهر رشت است. این تذکر لازم است که مرتبط با نوع سیستم زباله‌سوزی، مقدار ریجکت خروجی از ۲۵٪ وزنی تا ۵٪ متفاوت است. برای نیروگاه مذکور با فناوری گازی‌سازی، حدوداً مقدار ۱۰٪ ریجکت قابل‌انتظار است.

نیروگاه‌های زباله‌سوز، مزایای زیادی همچون عدم نیاز به اراضی زیاد برای دفن زائدات، عدم آلایندگی محیط‌زیست، تولید انرژی الکتریکی (و حرارتی) در مقیاس نیروگاهی، و داشتن ظرفیت‌های متغیر (امحاء زائدات و تولید انرژی) دارند. لذا دقت در به‌کارگیری سیستم‌های کنترل آلودگی و رعایت استانداردهای زیست‌محیطی، مهم‌ترین بخش استفاده از زباله‌سوزهاست.

گزینه‌های فنی، شامل: زباله‌سوز، دفن بهداشتی، و تولید کود آلی هستند؛ که با توجه به سیاست‌گذاری دفع پسماندهای شهری در شهرهای شمالی کشور، تولید کود آلی و زباله‌سوز در دستور کار قرار گرفته است. در حال حاضر، شرکت کود آلی رشت فعال است، لذا گزینه‌های زباله‌سوز و دفن پسماند نیز در وضع موجود تحلیل شده‌اند. در شکل ۳، جانمایی بخش‌های مختلف مرکز کمپوست و نیز محل احداث نیروگاه زباله‌سوز و همچنین در یک نما، کلیات اماکن مذکور مشاهده می‌شود.

در جدول ۴، آنالیزی از مشخصات و آلاینده‌های موجود در هر یک از روش‌های مدیریت پسماند (دفع زباله) زیر نظر سازمان پسماند شهرداری رشت اعم از این موارد ارائه شده است:



شکل ۳. حوزه‌ی پردازش پسماند بخش مرکزی استان گیلان– شهرک صنعتی لاکان.

۱- شیرابه‌ی حاصل از زباله‌های دپوشده در منطقه‌ی سراوان.
۲- مشخصات آلاینده‌های موجود در شیرابه‌ی حاصل از زباله‌های کمپوست‌شده در شرکت کود آلی (کمپوست).
۳- آلاینده‌های تأسیسات زباله‌سوز (توسط سازمان محیط‌زیست و به درخواست سازمان مدیریت پسماند و شرکت کود آلی رشت به انجام رسیده است).

گزارش نهایی بازنگری انرژی زیست‌محیطی (EER)[2]، طی دو سال با همکاری کامل دولت ایران و کمک مشاوران بین‌المللی و ملی تهیه شده است؛ که شامل این موارد است:

- تجزیه‌وتحلیل وضعیت فعلی با توجه به تولید و استفاده از انرژی.
- ارزیابی چشم‌انداز رشد با توجه به تولید و استفاده از انرژی.
- شناسایی مسائل زیست‌محیطی ناشی از تولید و استفاده از انرژی و برآورد هزینه‌ی خسارت‌ها.
- ارزیابی میزان مشارکت در پدیده‌ی تغییر اقلیم از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای.
- ارزیابی اقدام‌های کاهشی پیشنهادی برای مشکلات زیست‌محیطی شناسایی‌شده‌ی پیشین.

تأکید EER بر آلودگی هواست، که قطعاً در شهرهای بزرگ، شدیدترین و قابل مشاهده‌ترین نشانه‌ی آسیب زیست‌محیطی است. منبع اصلی آلودگی هوا، بخش انرژی است؛ که کلید اقتصاد ایران و موتور اصلی رشد اقتصادی آینده است.

هیئت بین‌المللی تغییرات اقلیمی (IPCC)[3] نیز به‌طورمشترک توسط سازمان جهانی هواشناسی و ایالات متحده تشکیل شده است. برنامه‌ی زیست‌محیطی مذکور به‌منظور ارائه‌ی یک بیانیه‌ی معتبر بین‌المللی از درک علمی تغییرات آب‌وهوایی ایجاد شده است. ارزیابی‌های دوره‌ای IPCC از علل، آثار، و راهبردهای واکنش احتمالی به تغییرات آب‌وهوایی، جامع‌ترین و به‌روزترین گزارش‌های موجود در این زمینه و همچنین، مرجعی استاندارد برای همه‌ی افراد مرتبط با تغییرات آب‌وهوایی در دانشگاه، دولت، و صنعت در سراسر جهان است.

از طریق سه گروه، صدها کارشناس بین‌المللی، تغییرات آب‌وهوایی را در طی گزارش‌هایی ارزیابی کرده‌اند، که از سه جلد اصلی با عنوان تغییرات آب‌وهوایی ۲۰۰۷ تشکیل شده است، که همگی در انتشارات دانشگاه کمبریج موجود

[2] EER

[3] IPCC

جدول ۴. میزان انتشار مؤثرترین آلاینده‌های روش های مختلف مدیریت پسماند (گزارش سازمان محیط‌زیست با درخواست مدیریت پسماند شهرداری رشت).

Pollutant name	chemical mixture	compost (g per ton of waste)	waste incinerator (g per ton of waste)	Landfill (g per ton of waste)
Phosphate	PO_4^{-3}	0	0	1.56
Lead	Pb	107	0.008	107
Zink	Zn	470	0.0069	470
iron	Fe	0	0	0.15
cadmium	Cd	0.2	0.0023	0.2
Manganese	Mn	0	0	0.12
copper	Cu	265	0.000016	265
Chrome	Cr	31	0.0005	0.003
Refinery	O&G	0	0	1.86
animosity	NTU	0	0	4.35
Sulphate	SO_4^{-2}	0	0	3.51
Nitrite	NO_2^-	0	0	0.9
Nitrate	NO_3^-	0	0	1.71
chloride	Cl^-	0	0	71.73
Ammonium	NH_4^+	0	0	29.25
methane	CH_4	0	0	85
nickel	Ni	17	0.002	0
Cobalt	Co	0	0	0
Mercury	Hg	0.01	0.0002	0
Arsenic	As	0.06	0.00003	0
Boron	B	0	0.0044	0
antimony	Sb	0	0.00017	0
hydrochloric acid	HCl	0	55	0
Carbon monoxide	CO	8	122	8
Nitrogen oxides	NO_X	0	686	0
Sulfur dioxide	SO_2	0	86	0
Carbon dioxide	CO_2	0	86400	95

است. لذا از خروجی منابع معتبر اخیر، هزینه‌های برخی از آلاینده‌های زیست‌محیطی مطابق جدول ۵ استخراج شده است:

جدول ۵. هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از انواع آلایندهای منتشرشده از زباله.

pollutants	Cost ($ per ton)
CH_4	0.210
CO_2	0.010
CO	0.188
NOx ($NO_2 – NO_3$)	0.600
SO_2	1.825
HCl (0.88 * SO_2)	1.606
DCB	4.300
Pb (12 * DCB)	51.600
Hg (1400 * DCB)	6.020
Cd (13 * DCB)	55.900

حال با درنظرداشتن هزینه‌های زیست‌محیطی آلاینده‌ها ، محاسبات مربوط به میزان نهایی هزینه‌های مربوط به هر یک از روش‌های مدیریت پسماند در جدول ۶ ارائه شده است.

۴.۳. ارزش حرارتی پسماند

یکی دیگر از موارد مهم و کلیدی در میزان انرژی تولیدی حاصل از سوزاندن زباله، بحث ارزش حرارتی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی پسماند شهری است، که در جدول ۷ به تفکیک ارائه شده است.

۵.۳. آنالیز هزینه‌ای احداث نیروگاه زباله‌سوز

در جدول ۸، مقدار پارامترهای هزینه‌ای بر مبنای فازهای راه‌اندازی پروژه، که پیش‌تر نیز عنوان شده است، بر حسب دلار بیان شده است.

برای آنالیز اقتصادی یک نیروگاه زباله‌سوز با فناوری گازی‌سازی، در ابتدا میزان هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کل با درنظرداشتن پارامترهای اقتصادی و زیست‌محیطی ناشی از روش‌های مختلف مدیریت پسماند محاسبه شده است.

جدول ۶. هزینه‌های زیست‌محیطی ناشی از انواع آلایندهای ناشی از روش‌های مختلف مدیریت پسماند.

pollutants	compost ($ per ton of waste)	waste incinerator ($ per ton of waste)	Landfill ($ per ton of waste)
CH_4	0	0	17.85
CO_2	0	864	0.95
CO	1.50	22.94	1.504
NO_x	0	411.6	1.566
SO_2	0	156.95	0
HCl	0	88.33	0
DCB	0	0	0
Pb	5521.2	0.40	5521.2
Hg	60.2	1.37	60.2
Cd	11.18	0.13	11.18
Total	5594	1546	5614

جدول ۷. ارزش حراتی ویژه‌ی پسماند ورودی زباله‌سوز (آنالیز سازمان مدیریت پسماند شهرداری رشت).

Constituent materials	Specific calorific value (Kj/Ton)	Specific calorific value (Kwh/Ton)
Plastic	25،000	6945
textiles	13،000	3611
Paper	12،000	3333
Organic materials	3،000	833
Wood	15،000	4167
rubber	16،000	4444

* هر کیلووات ساعت، معادل ۳/۶ کیلوژول است.

به ازاء هر کیلووات ساعت برق تولیدی در سال ۱۴۰۲، با توجه به تجدیدپذیربودن برق، از سوی سازمان وزارت نیرو به مبلغ ۲۸،۵۰۰ ریال (حدوداً معادل ۰/۰۶ دلار آمریکا) خریداری شده است.

جدول ۸. هزینه های سرمایه‌گذاری نیروگاه زباله‌سوز با تکنولوژی گازی‌سازی.

parameter	cost ($)
Land and accessories	10.000.000
building construction	12.000.000
Production line equipment	40.000.000
salary	3.000.000
Total	65.000.000

سپس، براساس میزان درآمد نیروگاه و سوددهی پروژه ناشی از فروش برق و میزان بازگشت سرمایه، مدل و خروجی نهایی آن به‌دست آمده است.

با درنظرداشتن این مسئله که چشم‌انداز نیروگاه زباله‌سوز، بازگشت سرمایه در طی مدت ۷ سال است، با فرض انجام فعالیت در تمام روزهای سال با بیشینه‌ی ظرفیت پردازش (۶۰۰ تن در روز)، هزینه‌ی اقتصادی فعالیت نیروگاه به ازاء هر تن زباله، به صورت رابطه‌ی ۱ به‌دست می‌آید:

$$\$ ۴.۴۲ = ۶۰۰ \div ۳۶۵ \div ۷ \div ۶۵،۰۰۰،۰۰۰ \quad (۱)$$

لذا به جهت حصول دیدگاهی بهتر از هزینه‌های طرح، جدول ۹ ارائه شده است.

۶.۳. مدل در مطالعه‌ی موردی

با توجه به ماهیت مسئله درخصوص ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی نیروگاه زباله‌سوز، بدیهی است که به امکان‌سنجی احداث نیروگاه زباله‌سوز پرداخته شده است. سپس، مدل به‌دست‌آمده در فصل پیش طی دو سناریوی مختلف، یعنی ارزیابی شرایط در صورت احداث نیروگاه به‌عنوان سناریوی اول و نیز ارزیابی شرایط حاضر، در صورت عدم احداث نیروگاه زباله‌سوز در سناریوی دوم بررسی شده است. در ادامه، خروجی مدل و نتایج حاصل از اجرای دو سناریوی مذکور نیز ملاحظه می‌شود.

سناریوی ۱. در سناریوی اول، شرایطی لحاظ شده است که در آن، نیروگاه زباله‌سوز با فناوری گازی‌سازی، در کنار دو روش دیگر دفع پسماند، یعنی دپوی غیربهداشتی (لندفیل) و شرکت کمپوست‌سازی (کود آلی)، احداث شده است؛ تا بتوان از سه روش مذکور در جهت مدیریت پسماند زباله‌ی شهری بهره‌برداری کرد.

نتایج حاصل از اجرای مدل در نرم‌افزار گمز تحت شرایط برنامه‌ریزی عدد صحیح نشان می‌دهد که روش بهینه‌ی مدیریت پسماند در صورت احداث تأسیسات زباله‌سوز، همین روش بوده است. لذا، با درنظرداشتن مقدار ۶۰۰ تن از انواع زباله‌های شهری، که معادل تولید روزانه‌ی پسماند شهر رشت و نیز ظرفیت اسمی پردازش زباله در نیروگاه زباله‌سوز است؛ کلیه‌ی مقادیر اخیر، با

جدول ۹. هزینه‌های کلی گزینه‌های مدیریت پسماند.

Facilities (j)	Daily processing capacity (a(j))-ton	Economic cost (c(j))-$	Environmental cost (cc(j))-$	Product purchase rate (r(j))-$	Residual rate-rr(j) %
Landfill	600	10	5614	0	0
Compost	400	8	5594	60	50
Incinerator	600	42	1546	0.06	10

مجموع هزینه (اعم از ساخت، عملیات، و محیط‌زیست) در حدود ۸۸۱،۳۲۵ دلار (با تقریب دو رقم اعشار)، شرایط بهینه را ارائه می‌کنند.

سناریوی ۲. در سناریوی دوم، به بررسی شرایطی پرداخته شده است که در آن، نیروگاه زباله‌سوز احداث نشود و فقط از پتانسیل موجود، یعنی دو روش کمپوست‌سازی توسط شرکت کود آلی رشت و دپوی غیربهداشتی در منطقه‌ی سراوان به‌منظور دفع پسماند استفاده شود.

نتایج حاصل از اجرای مدل مذکور در نرم‌افزار گمز تحت شرایط برنامه‌ریزی عدد صحیح نشان داده است که روش بهینه‌ی مدیریت پسماند در صورت عدم احداث تأسیسات زباله‌سوز، تلفیقی از دو روش اخیر است، یعنی کمپوست‌سازی (با بیشینه‌ی ظرفیت موجود معادل پردازش ۴۰۰ تن پسماند در روز) و دپوی غیربهداشتی (لندفیل) برای دفع مابقی پسماند پردازش‌نشده توسط شرکت کود آلی (کمپوست)، که معادل ۲۰۰ تن در روز است. کلیه‌ی مقادیر اخیر، با مجموع هزینه (اعم از عملیاتی و زیست‌محیطی)، در حدود ۳،۳۶۷،۲۴۰ دلار، شرایط بهینه را ارائه می‌کنند.

۴. نتیجه‌گیری

در استان‌های شمالی کشور، سیستم مدیریت مواد زائد جامد شهری، به این دلایل نیازمند تغییرات و بازنگری اساسی است، تا با انجام اصلاحات لازم در بخش‌های مختلف، کارائی آن به نحو مطلوبی افزایش یابد:

۱- تراکم بالای جمعیت و کمبود فضای مناسب و کافی جهت دفن انبوه زباله‌های اهالی و گردشگران.

۲- ارزش بالای زمین از نظر اقتصادی، اجتماعی، و زیستگاهی.

۳- اقلیم بسیار حساس و شکننده‌ی منطقه.

۴- اهمیت راهبرد فعالیت‌های کشاورزی و گردشگری.

۵- وجود جنگل‌های انبوه و شیب تند دامنه‌ی شمالی البرز.

۶- با توجه به بالابودن سطح آب‌های زیرزمینی در استان‌های شمالی کشور و تولید شیرابه، که آلودگی مضاعفی را به محیط تحمیل می‌کند.

پژوهش حاضر، سعی داشته است که به بررسی و مطالعه‌ی عمیق پیرامون معضل دفع پسماند شهری و نیز استحصال انرژی از آن، به‌عنوان یک منبع کمکی در تأمین الکتریسیته و همچنین کاهش پیامدهای اقتصادی و به‌خصوص زیست‌محیطی بپردازد و به‌منظور بهبود شرایط کنونی، مدلی را به جهت مدیریت پسماند معرفی کند و درنهایت، با اجرای آن درخصوص زباله‌ی شهر رشت در استان گیلان به‌عنوان یک مطالعه‌ی موردی، کارایی و عملکرد مدل مذکور را بسنجد.

۴. ۱. خلاصه‌ی مسئله‌ی پژوهش

یکی از اهداف اصلی پژوهش حاضر، بهبود وضعیت مدیریت پسماند در ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی بوده است. در این راستا، پس از مطالعه‌ی نوشتارها و مشاهده‌ی شرایط موجود در منطقه‌ی سراوان استان گیلان از نظر دفع غیربهداشتی پسماند و نبود روش‌های مطلوب در دفع مناسب زباله‌ها سعی شده است تا با درنظرداشتن احداث نیروگاه زباله‌سوز در نزدیکی منطقه‌ی مذکور (شهرک صنعتی لاکان در محدوده‌ی شهرستان رشت) امکان‌سنجی طرح مذکور در کنار گزینه‌های موجود، یعنی دپوی غیربهداشتی و نیز کمپوست‌سازی توسط شرکت کودآلی، بررسی شود.

لذا، یک مدل ریاضی با درنظرداشتن عوامل و شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی پیشنهاد شده است، که قابلیت تعمیم به سایر مناطق را با درنظرداشتن پارامترهای مربوط به موقعیت موجود داشته باشد. لذا پس از تکمیل مدل، به منظور امکان‌سنجی احداث نیروگاه زباله‌سوز، دو سناریو در شرایط احداث و نیز عدم احداث نیروگاه برای مسئله‌ی اخیر تعریف شده است.

۴. ۲. دستاوردهای پژوهش

نتایج به‌دست‌آمده به‌منظور اجرای مدل ریاضی مسئله در نرم‌افزار گمز (نسخه‌ی ۲۰۱۸) با روش برنامه‌ریزی عدد صحیح استفاده شده‌اند، که خروجی اجرای آن‌ها به گونه‌ای رقم خورده است که در شرایط احداث کارخانه، کلیه‌ی زباله‌ی تولیدی که معادل۶۰۰ تن روزانه برآورد شده است، توسط مدل به نیروگاه تخصیص یافته و با هزینه‌ی نهایی ۸۸۱،۳۲۵ دلار به‌عنوان کارآمدترین و بهترین روش گزارش شده است.

اما در سناریویی که شرایط عدم احداث نیروگاه لحاظ شده است، نتیجه به گونه‌ای بوده است که در ابتدا، شرکت کود آلی به‌عنوان گزینه‌ی بهتر شناخته شده و پس از تکمیل ظرفیت آن، که معادل ۴۰۰ تن بوده است، مابقی ۲۰۰ تن پسماند باقی‌مانده، به روش دپوی غیربهداشتی با مجموع هزینه‌ی ۳،۳۶۷،۲۴۰ واگذار شده است. شایان ذکر است که در صورت وجود ظرفیت مضاف بر وضعیت کنونی، دفع کلیه‌ی پسماند به کمپوست‌سازی تخصیص پیدا می‌کند.

نکته‌ی قابل بحث در این میان به گونه‌ای است که مابه‌التفاوت هزینه‌ها در شرایط احداث و عدم احداث نیروگاه زباله‌سوز، چیزی در حدود ۲،۴۸۵،۹۱۵ دلار است، که معادل حدود ۷۴٪ صرفه‌جویی در مجموع عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی را نشان می‌دهد.

با وجود این، نتایج حاکی از آن است که علی‌رغم اینکه احداث نیروگاه نیاز به سرمایه‌گذاری دارد و به ظاهر پرهزینه است، ولی درنهایت با کاهش شدید پیامدهای زیست‌محیطی و نیز تولید الکتریسیته و ایجاد زمینه‌ی فروش و

درآمدزایی جانبی از این طریق، روش بهینه در بین گزینه‌های موجود مدیریت پسماند به شمار می‌رود.

۳.۴. پیشنهاد پژوهش‌های آتی

از میان رویکردهای متفاوتی که در دفع پسماند شناسایی شده‌اند، روش دفع بهداشتی زیست‌توده با قابلیت استحصال انرژی از گازهای حاصل از آن، نظیر متان، روش قابل‌تأملی است؛ که به پژوهشگران این حوزه پیشنهاد می‌شود با محاسبه‌ی آثار اقتصادی و زیست‌محیطی آن و با استفاده از مدل ریاضی پژوهش حاضر، به مقایسه‌ی آن با رویکردهای موجود بپردازند.

از بُعد فنی نیز بررسی فناوری‌های مختلف موجود در دنیا در زمینه‌ی سوزاندن زباله (در مقایسه با روش گازی‌سازی که در نوشتار حاضر بحث شده است)، موضوع مناسبی به جهت انجام پژوهش محسوب می‌شود.

در پژوهش حاضر تا حد امکان سعی شده است تا آثار اجتماعی نیز در ذیل سایر پارامترهای فنی در نظر گرفته شود، اما در کنار روش‌های مدیریت پسماند، درنظرداشتن پارامترهای اجتماعی مؤثر می‌تواند به منظور کسب نتایج دقیق‌تر شایان توجه باشد.

به‌عنوان پیشنهاد دیگری در مطالعات آتی، بررسی سیاست‌های موجود در حوزه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر، علی‌الخصوص در بخش نیروگاه‌های زباله‌سوز و نقش راهبردی این سیاست‌ها در پیشرفت مدیریت پسماند و بهبود وضعیت انرژی، می‌تواند از جمله موارد حائز اهمیت در پژوهش‌های علاقه‌مندان باشد.

References - منابع

1. Akbulut, A. 2012. Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: Çiçekdağı case study. *J. of Energy*, *44*(1), pp.381–390. DOI:https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.017.
2. Leme, M.M.V., Rocha, M.H., Lora, E.E.S., Venturini, O.J., Lopes, B.M. and Ferreira, C.H. 2014. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *J. of Resources, Conservation and Recycling*, *87*, pp.8–20. DOI:https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.03.003.
3. Luz, F.C., Rocha, M.H., Lora, E.E.S., Venturini, O.J., Andrade, R.V., Leme, M.M.V. and del Olmo, O.A. 2015. Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. *J.* of *Energy Conversion and Management*, *103*, pp.321–337. DOI:https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074.
4. Martínez, J., Ramírez-Seañez, A.R. and Marina-Clemente, J.A. 2020. Factores socioeconómicos y nivel de adopción tecnológica en unidades de producción de piña en Loma Bonita, Oaxaca, México. *J.* of *Investigación y ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, *80*, pp.71–79. DOI:https://doi.org/10.33064/iycuaa2020803006.
5. Zhao, X., Jiang, G., Li, A. and Wang, L. 2016. Economic analysis of waste-to-energy industry in China. *J.* of *Waste Management,* [online] *48*, pp.604–618. DOI:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.014.
6. Cobuloglu, H.I. and Büyüktahtakın, İ.E. 2014. A mixed-integer optimization model for the economic and environmental analysis of biomass production. *J.* of *Biomass and Bioenergy, 67*, pp.8–23. DOI:https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.025.
7. Gavurova, B., Rigelsky, M. and Ivankova, V. 2021. Greenhouse Gas Emissions and Health in the Countries of the European Union. *J.* of *Frontiers in Public Health, 9*. DOI:https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.756652.
8. Kabir, Z. and Khan, I. 2020. Environmental impact assessment of waste to energy projects in developing countries: General guidelines in the context of Bangladesh. *J.* of *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *37*, p.100619. DOI:https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100619.
9. Wang, A. and Dong, W. 2019. Discussion on waste incineration power generation and its process calculation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *490*, p.072047. DOI:https://doi.org/10.1088/1757-899x/490/7/072047.
10. Dong, J., Chi, Y., Zou, D., Fu, C., Huang, Q. and Ni, M. (2014). Energy–environment–economy assessment of waste management systems from a life cycle perspective: Model development and case study. *J.* of *Applied Energy, 114*, pp.400–408. DOI:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.037.
11. Soltani, M., Moradi Kashkooli, F., Dehghani-Sanij, A.R., Nokhosteen, A., Ahmadi-Joughi, A., Gharali, K., Mahbaz, S.B. and Dusseault, M.B. 2019. A

comprehensive review of geothermal energy evolution and development. *J. of Green Energy*, *16*(13), pp.971–1009. DOI:https://doi.org/10.1080/15435075.2019.1650047.

12. Chand Malav, L., Yadav, K.K., Gupta, N., Kumar, S., Sharma, G.K., Krishnan, S., Rezania, S., Kamyab, H., Pham, Q.B., Yadav, S., Bhattacharyya, S., Yadav, V.K. and Bach, Q.-V. 2020. A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities. J. *of Cleaner Production*, *277*, p.123227. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123227.

13. Wibowo, H., Susanto, H., Grisdanurak, N., Hantoko, D., Yoshikawa, K., Qun, H. and Yan, M. 2021. Recent developments of deep eutectic solvent as absorbent for CO2 removal from syngas produced from gasification: Current status, challenges, and further research. J. *of Environmental Chemical Engineering*, *9*(4), p.105439. DOI:https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105439.

14. Li, L., Li, J., Li, Y., Luo, J., Wang, Y. and Wang, X. 2023. Perspective of Waste to Energy and Fuel with Negative Emission Potential: Smart Environmental and Techno-economic Analysis. *Energy & Fuels*,*37*(19),pp.14556–14573. DOI:https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c02109.

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 153-165

Sharif University of Technology

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



Research Note

Design of a Data-Driven Performance Evaluation System for Productivity Enhancement in Continuous Manufacturing Industries

Mahboobeh Barvarzadeh* and Hasan Khademi Zare

Department of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, Yazd University.
* corresponding author: (40201145@stu.yazd.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:17 August 2024

Revised:27 September 2024

Accepted:13 October 2024

Keywords:

Productivity in continuous automated manufacturing industries,
reward and penalty system,
key indicators of team performance,
teamwork,
performance evaluation,
PROMETHEE statistical method.

Abstract

In today's industrial landscape, enhancing productivity in manufacturing sectors, particularly in automated continuous industries, has gained paramount importance. This paper introduces an innovative data-driven reward and penalty system designed to boost productivity. The proposed approach targets agile and team-based performance evaluation, focusing on key indicators such as downtime adjustments, stoppages, rework, and process non-conformities. This methodology is founded on systems thinking and a team-oriented approach, aiming to create a holistic view of operational efficiency. The core of this system lies in its unique integration of statistical methods, specifically entropy and PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) techniques. This combination allows for dynamic weighting of performance indicators in each time period, enabling rapid identification of performance fluctuations and highlighting areas requiring process improvement or correction. By employing this data-driven approach, the system provides a responsive and adaptive framework for continuous improvement. To validate its effectiveness, the system was implemented in a heating radiator manufacturing plant. The implementation process was carefully structured, with an initial three-month period followed by a three-month validation phase. The system's direct impact on human capital was evident, fostering team cohesion and promoting a collective mindset among employees. The results of this implementation were significant and multifaceted. After the six-month trial period, the plant witnessed a remarkable 22% increase in production output. This substantial boost in productivity was accompanied by a 20% reduction in failure rates, indicating improved process reliability and efficiency. Furthermore, the rate of defective products decreased by 1.5%, reflecting enhanced quality control measures. Perhaps most notably, the plant's process audit score saw a significant improvement of 21.5%, demonstrating a comprehensive enhancement in overall operational standards. These impressive outcomes underscore the effectiveness of the proposed system in driving tangible improvements across multiple facets of manufacturing operations. The success of this implementation not only validates the theoretical framework but also provides a practical blueprint for other industries seeking to optimize their productivity and quality metrics. By leveraging data-driven insights and fostering a team-oriented culture, this innovative approach presents a promising solution for manufacturers aiming to stay competitive in an increasingly demanding industrial landscape.

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:
Barvarzadeh, M. and Khademi Zare, H. 2026. Design of a data-driven performance evaluation system for productivity enhancement in continuous manufacturing industries, Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.153-165. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64793.2408

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

یادداشت فنی

طراحی سیستم ارزیابی عملکرد مبتنی بر داده با هدف ارتقاء بهره‌وری در صنایع تولید پیوسته

محبوبه باروزاده* و حسن خادمی زارع

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

*نویسنده مسئول (40201145@stu.yazd.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۳/۰۷/۰۶

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۰۷/۲۲

واژگان کلیدی:

بهره‌وری در صنایع تولید پیوسته‌ی اتوماتیک،
سیستم پاداش و جریمه،
شاخص‌های کلیدی عملکرد تیمی،
ارزیابی عملکرد،
پرامتی.

چکیده

امروزه افزایش بهره‌وری در صنایع تولیدی، بخصوص صنایع پیوسته‌ی اتوماتیک، اهمیت ویژه‌ای یافته است. نوشتار حاضر، یک سیستم نوآورانه و داده‌محور پاداش و جریمه را برای ارتقاء عملکرد بهره‌وری ارائه داده است. رویکرد پیشنهادی، ارزیابی عملکرد تیمی را براساس شاخص‌های کلیدی، شامل: تنظیم‌های کاهشی، توقف‌ها، دوباره‌کاری، و عدم‌انطباق فرایند متمرکز کرده و با تلفیق روش‌های آماری آنتروپی و پرامتی، امکان وزن‌دهی پویا و دوره‌ای شاخص‌ها را فراهم ساخته است. مکانیزم مذکور، شناسایی سریع انحراف‌های عملکردی و نیاز به اقدام‌های اصلاحی را ممکن ساخته است. سیستم ارائه‌شده در یک کارخانه‌ی تولید رادیاتور گرمایشی پیاده‌سازی شده و با تأثیرگذاری در سرمایه‌ی انسانی، تقویت تفکر سیستمی، و تعامل تیمی، نتایج پس از یک دوره‌ی سه‌ماهه‌ی اولیه و اعتبارسنجی در سه‌ماهه‌ی دوم حاکی از افزایش ۲۲ درصدی نرخ تولید، کاهش ۲۰ درصدی نرخ خرابی، کاهش ۱/۵ درصدی محصولات معیوب، و بهبود ۲۱/۵ درصدی امتیاز ممیزی فرایند بوده است.

۱. مقدمه

در عصر رقابت شدید جهانی، افزایش بهره‌وری یکی از عوامل کلیدی موفقیت برای شرکت‌های تولیدی به‌ویژه در صنایع پیوسته و اتوماتیک است.[۱] صنایع تولیدی پیوسته و اتوماتیک، یکی از صنایعی است که نیازمند توجه ویژه برای بهبود بهره‌وری است. اتلاف منابع، هزینه‌های بالا، و کاهش سودآوری از چالش‌های اصلی صنایع پیوسته در صورت عدم‌بهره‌وری مناسب است.[۲] رویکردهای سنتی برای افزایش بهره‌وری، اغلب بر بهبود عملکرد واحدهای انفرادی، مانند: تولید، نگهداری، و تعمیرات (نت)، یا کنترل کیفیت متمرکز بوده‌اند. اما در سیستم‌های پیچیده‌ی تولید پیوسته، واحدهای مذکور به‌شدت به یکدیگر وابسته هستند و عملکرد یک واحد می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در سایر واحدها داشته باشد.[۳] صنایع تولید پیوسته‌ی خودکار به‌دلیل ماهیت پیچیده و وابستگی متقابل مراحل مختلف فرآیند تولید، به‌شدت به عملکرد روان و بدون نقص تجهیزات و ماشین‌آلات وابسته هستند. در این میان، نقش نگهداری و تعمیرات در جلوگیری از خرابی‌ها و توقف تولید، اهمیتی حیاتی دارد. هرگونه خرابی در سیستم‌های مذکور می‌تواند منجر به هزینه‌های هنگفت، از دست‌دادن زمان تولید، و افت کیفیت محصول شود؛ چرا که در صنایع پیوسته، توقف هر یک از عملیات خط منجر به توقف کل تولید می‌شود. از طرفی، کیفیت محصول خروجی در انتهای خط پس از گذر از چندین عملیات بررسی می‌شود، که در بسیاری از موارد رد محصول ممکن است از مواد اولیه‌ی نامرغوب ورودی یا حتی عدم کنترل صحیح در انتهای خط باشد؛ لذا واحد کنترل کیفیت نیز با هشدارهای به موقع و عملکرد مناسب در تولید محصول مرغوب بسیار تأثیرگذار است. لذا ساختاری که بتواند تفکر تیمی و انگیزه در کارکنان بخش‌های تولید، نگهداری، و تعمیرات، و کنترل کیفیت ایجاد کند، نقشی کلیدی در ارتقاء بهره‌وری و سودآوری صنایع مذکور ایفا می‌کند. همچنین رویکردهای جدید برای افزایش بهره‌وری باید بر همکاری و هماهنگی میان واحدهای ذکرشده تأکید کنند. به جهت اهمیت روزافزون موضوع، ارزیابی عملکرد واحدهای تولید با استفاده از شاخص‌های عملکردی، پژوهش‌های فراوانی انجام شده است؛ چرا که ایجاد سیستم‌های ارزیابی عملکرد، یک فعالیت روان‌شناختی و محیط‌شناختی است و وابسته به نوع تولید، فرهنگ سازمانی، سطح دانش سازمانی، و دسترسی به داده‌ها و سایر عوامل، رفتار و ساختار متفاوتی را خواهد داشت. در ادامه، به برخی از مطالعات انجام‌شده پرداخته شده است.

پژوهش‌ها در زمینه‌ی ارزیابی عملکرد صنایع پیوسته از اواسط قرن بیستم با ظهور و گسترش اتوماسیون صنعتی آغاز شده است. اولین مطالعات جدی در این زمینه به دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ میلادی بر می‌گردد. یکی از اولین

استناد به این مقاله:

باروزاده، محبوبه و خادمی زارع، حسن، ۱۴۰۴. طراحی سیستم ارزیابی عملکرد مبتنی بر داده با هدف ارتقاء بهره‌وری در صنایع تولید پیوسته. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۱(۲)، صص.۱۵۳-۱۶۵. https://doi.org/10.24200/j65.2024.64793.2408

حق مولف © نویسندگان

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

مطالعات در زمینه‌ی ارزیابی عملکرد تولید با نگاه به فرایند نگهداری و تعمیرات در صنعت پیوسته توسط لیندبرگ[1] و همکاران (۲۰۱۵)،[۴] انجام شده است. ایشان در یک مطالعه‌ی موردی در یک کارخانه‌ی سیمان، سیستمی را برای ارزیابی عملکرد واحدهای تولید، نگهداری، و تعمیرات براساس شاخص‌های کلیدی عملکرد به‌صورت مجزا طراحی کردند و دریافتند که پس از پیاده‌سازی سیستم مذکور، بهره‌وری ایجاد شده است. توانا و همکاران (۲۰۲۱)،[۵] چارچوبی را برای ارزیابی و وزن‌دهی عوامل مختلف در بهبود کیفیت و رفع موانع بهبود مستمر تولید مبتنی بر روش فازی و سلسله‌مراتبی ارائه کرده‌اند. چان[2] (۲۰۱۹)،[۶] نشان داده است که رهبری مشارکتی می‌تواند اثربخشی سیستم پاداش گروهی را از طریق افزایش رضایت و انگیزه‌ی کارکنان بهبود بخشد. ابزاری و علم[3] (۲۰۱۳)،[۷] نیز با مطالعه‌ی یک شرکت تولید مواد اولیه‌ی الیاف مصنوعی از طریق نظرسنجی خبرگان نشان دادند که انگیزش، مهم‌ترین عامل مؤثر در بهره‌وری شرکت است. شاجار[4] و همکاران (۲۰۲۴)، [۸] در یک مطالعه‌ی موردی در شرکت پتروشیمی جم، یک مدل ارزیابی عملکرد سازمانی را طراحی کردند، که ابعاد مختلفی از عملکرد، از جمله: کیفیت، ایمنی، و رعایت برنامه‌ی زمانی را در نظر گرفته است. انوفری[5] و همکاران (۲۰۱۹)،[۹] از یک رویکرد تحلیلی برای بررسی تأثیر سرمایه‌گذاری در شیوه‌های ناب (که شامل سیستم‌های انگیزشی می‌شود) در عملکرد عملیاتی در صنایع تولیدی استفاده کرده و نشان داده‌اند که اجرای مناسب شیوه‌های مذکور می‌تواند منجر به بهبود قابل‌توجهی در بهره‌وری و عملکرد کلی سازمان شود. عزیزی (۲۰۱۵)،[۱۰] با استفاده از روش OEE[6] و روش‌های آماری، مدلی برای ارزیابی و ارتقاء بهره‌وری در تولید خط لعاب ارائه داده است، که منجر به کاهش حدود ۹ درصدی رخ نقص در خط لعاب شده است. زهرایی و همکاران (۲۰۱۸)،[۱۱] یک مدل شبیه‌سازی کامپیوتری و روش سطح پاسخ به‌عنوان ارزیابی عملکرد در خط تولید رنگ ارائه کرده‌اند، که در نتیجه‌ی آن، زمان خرابی به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است. برخی از مطالعات پیشین نیز در زمینه‌ی افزایش بهره‌وری در صنایع تولیدی پیوسته و اتوماتیک، عمدتاً بر رویکردهای سنتی مانند بهبود عملکرد واحدهای انفرادی، مانند: تولید، نگهداری، و تعمیرات یا کنترل کیفیت متمرکز بوده‌اند.[۱۲] با این حال، رویکردهای اخیر وابستگی شدید واحدها را در سیستم‌های پیچیده‌ی تولید پیوسته و اینکه عملکرد هر واحد می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در سایر واحدها داشته باشد، را نادیده گرفته‌اند. برخی از مطالعات، از جمله گارزا[7] (۲۰۱۸)،[۱۳] به اهمیت رویکردهای یکپارچه برای افزایش بهره‌وری که بر همکاری و هماهنگی میان واحدهای مختلف تأکید می‌کنند، اشاره کرده‌اند. با این حال، مطالعات انجام‌شده‌ی اخیر بیشتر جنبه‌ی نظری داشته و راهکارهای عملی برای تحقق چنین همکاری و هماهنگی را ارائه نکرده‌اند. اما چالش اصلی، شناسایی شاخص‌های مناسب برای ارزیابی عملکرد تیمی در هر صنعت خاص و تعیین اهمیت نسبی آن‌هاست.[۱۴]

مطالعه‌ی حاضر، برای اولین بار از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy AHP) برای شناسایی و وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارهای مرتبط با بهره‌وری در تولید پیوسته و اتوماتیک استفاده کرده است؛ که با توانایی درنظرگرفتن عدم‌قطعیت‌های موجود در قضاوت‌های انسانی، می‌تواند نتایج دقیق‌تر و کاربردی‌تری را ارائه دهد.[۱۵ و ۱۶] به جهت رفع هرگونه عدم‌قطعیت در روش‌های مبتنی بر نظر خبرگان، نوشتارهای ذکرشده نشان می‌دهند که ترکیب روش‌های انتروپی و پرامتی، یک رویکرد کارآمد و مناسب برای حل مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره در حوزه‌های مختلف، از جمله انتخاب تأمین‌کننده، ارزیابی، و مدیریت زنجیره‌ی تأمین است. آگراوال[8] (۲۰۲۲)،[۱۷] به استفاده از روش پرامتی[9] برای رتبه‌بندی و انتخاب بهترین تأمین‌کنندگان پرداخته و مزایای استفاده از روش اخیر را به جای سایر روش‌ها از جمله AHP بیان کرده است. چانگ و همکاران (۲۰۲۱)،[۱۸] نیز یک مدل ترکیبی مبتنی بر روش پرامتی و چندمعیاره برای ارزیابی و انتخاب تأمین‌کننده‌ی پایدار در صنعت الکترونیک ارائه کرده است. نتیجه‌ی کار ایشان، ارائه‌ی یک رویکرد هدفمند و قوی برای انتخاب تأمین‌کننده‌ی پایدار بوده است، که می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در صنعت الکترونیک کمک کند. آذرپور و تیموری (۲۰۱۸)،[۱۹] نیز از روش AHP و پرامتی برای رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان استفاده کرده‌اند.

با مرور پژوهش های پیشین، شکاف پژوهشی به این شرح استنباط شده است:

- ✓ فقدان مطالعات عملی و کاربردی در زمینه‌ی افزایش بهره‌وری در صنعت تولید پیوسته و اتوماتیک رادیاتورهای گرمایشی.
- ✓ کمبود مطالعات در زمینه‌ی طراحی سیستم‌های انگیزشی تیمی مبتنی بر شاخص‌های عملکردی در صنایع تولیدی پیوسته.
- ✓ نداشتن توجه کافی به ابعاد سیستم مدیریت کیفیت در تعریف شاخص‌های عملکردی در مطالعات پیشین.
- ✓ محدودیت در استفاده از رویکردهای مبتنی بر داده برای کاهش عدم قطعیت‌های ناشی از قضاوت‌های انسانی در ارزیابی عملکرد.
- ✓ کمبود مطالعات جامع، که ارتباط بین بهبود عملکرد منابع انسانی و افزایش بهره‌وری کلی سازمان را در صنایع تولیدی پیوسته بررسی کنند.

پژوهش حاضر با ارائه‌ی رویکردی نوآورانه برای افزایش بهره‌وری در تولید پیوسته و اتوماتیک رادیاتورهای گرمایشی، شکاف موجود در مطالعات پیشین را پر می‌کند. نوآوری اصلی پژوهش حاضر، طراحی یک سیستم انگیزشی مبتنی بر شاخص‌های تیمی عملکرد است، که با هدف تقویت همکاری و تعهد کارکنان در واحدهای مختلف برای دستیابی به اهداف مشترک طراحی شده است.

برخلاف برخی مطالعات پیشین، که عمدتاً به‌صورت نظری یا شبیه‌سازی در برخی صنایع مشابه انجام شده‌اند، پژوهش حاضر یک راهکار عملی و سفارشی‌سازی‌شده برای صنعت خاص تولید رادیاتورهای گرمایشی ارائه داده و در تعریف شاخص‌های عملکردی، به‌طور ویژه به ابعاد سیستم مدیریت کیفیت توجه کرده است.

روش‌شناسی پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی مبتنی بر داده، سعی در کاهش عدم‌قطعیت‌های ناشی از قضاوت‌های انسانی دارد. رویکرد مذکور براساس داده‌های واقعی، که از طریق ایجاد ساختارهای مؤثر در ثبت و کنترل اطلاعات به‌دست آمده است، استوار بوده است.

[1] Lindberg
[2] Chan
[3] Abzari & Alam
[4] Shajar
[5] Onofrei
[6] Overall Equipment Effectiveness
[7] Garza
[8] Agrawal
[9] PROMETHEE

انتظار می‌رود پیاده‌سازی سیستم انگیزشی تیمی ارائه‌شده منجر به بهبود در زنجیره‌ای از شاخص‌ها از جمله: کاهش توقف‌های ناخواسته و ضایعات، بهبود کیفیت محصولات، افزایش آمادگی و کارکرد مطلوب تجهیزات، افزایش رضایت شغلی و تعهد کارکنان، و درنهایت، به افزایش بهره‌وری کلی و به‌دنبال آن افزایش سودآوری و مزیت رقابتی سازمان بیانجامد. سیستم مذکور همچنین بستری برای یادگیری سازمانی و بهبود مستمر فرایندها فراهم می‌سازد.

در ادامه، تعاریف ارکان اصلی نوشتار حاضر در سرفصل مفاهیم و مبانی نظری، فرمول‌های ریاضی و روش پژوهش در سرفصل روش‌شناسی پژوهش، تمرکز بر مطالعه‌ی موردی و یافته‌های حاصل از پیاده‌سازی پژوهش در آن در سرفصل مطالعه‌ی کاربردی و یافته‌ها و در انتها، به بحث و نتیجه‌گیری و پیشنهادهای بهبود برای مطالعات آتی پرداخته شده است.

۲. مفاهیم و مبانی نظری

در بخش حاضر، به تعاریف برخی از اصطلاحات کلیدی و کلیدواژگان استفاده‌شده در متن و نیز معرفی سیستم تولیدی موردبحث پرداخته شده است.

۱.۲. بودجه

بودجه، یک برنامه‌ی مالی جامع است، که میزان هزینه‌ها، درآمدها، و سرمایه‌گذاری‌های موردنیاز برای رسیدن به اهداف یک سازمان، پروژه، یا برنامه را در یک بازه‌ی زمانی مشخص تعیین می‌کند. بودجه‌ها می‌توانند برای کل سازمان یا بخش‌های مختلف آن، مانند: تولید، فروش، منابع انسانی، و غیره تهیه شوند.[۲۰]

۲.۲. کارتیمی[10]

کار تیمی، فرایندی است که در آن یک گروه از افراد با مهارت‌ها و تخصص‌های مختلف برای رسیدن به یک هدف مشترک، به‌صورت منسجم و هماهنگ با یکدیگر همکاری می‌کنند. کار تیمی، شامل اجزاء کلیدی، از جمله: تعامل و ارتباط‌های مؤثر، تعهد به اهداف گروهی، احترام به نقش‌ها و مسئولیت‌های یکدیگر، حل مسئله و تصمیم‌گیری مشارکتی، و پذیرش تنوع دیدگاه‌هاست. رهبری، اعتماد متقابل، و انگیزش نیز از عوامل مهم در موفقیت کار تیمی هستند.[۲۲]

۳.۲. ارزیابی عملکرد

ارزیابی عملکرد، عبارت از فرایند هدفمند جمع‌آوری، مقایسه، و ارزیابی داده‌های مربوط به عملکرد کارکنان، فرآیندها، یا سازمان‌ها در مقابل معیارها، استانداردها، و اهداف از پیش تعیین‌شده است؛ که می‌تواند شامل اندازه‌گیری عملکرد، شناسایی نقاط قوت و ضعف، و تدوین برنامه‌های بهبود باشد.[۲۳] وزارت امور داخلی امریکا، ارزیابی عملکرد را به‌صورت فرایندی نظام‌مند تعریف می‌کند، که با نظارت مستمر و ایجاد ظرفیت اجرا، عملکرد را به‌صورت دوره‌ای اندازه‌گیری و رتبه‌بندی کند و به عملکرد مناسب، پاداش دهد.[۲۴]

۴.۲. شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI)[11]

شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI)، معیارهای عینی و قابل اندازه‌گیری هستند که برای ارزیابی میزان پیشرفت در دستیابی به اهداف کلیدی یک سازمان یا فرآیند استفاده می‌شوند و شامل شاخص‌هایی مانند: سودآوری، رضایت مشتری، کیفیت محصول، بهره‌وری، و غیره هستند.[۲۵]

۵.۲. شاخص قابلیت اطمینان تجهیزات (OEE)

شاخص قابلیت اطمینان تجهیزات (OEE)، یک معیار کلیدی برای اندازه‌گیری بهره‌وری کل تجهیزات تولیدی است، که از ترکیب سه عامل دسترسی، عملکرد، و کیفیت محاسبه می‌شود. OEE بیانگر درصدی از ظرفیت تولیدی است که از آن به‌صورت‌مؤثر استفاده می‌شود و می‌تواند برای شناسایی گلوگاه‌ها و فرصت‌های بهبود کمک کند.[۲۱]

۶.۲. روش انتروپی

روش انتروپی، یک روش ریاضی برای اندازه‌گیری عدم‌اطمینان و عدم‌تعادل در توزیع اطلاعات در یک مجموعه‌ی داده‌هاست. در تصمیم‌گیری چندمعیاره، روش انتروپی برای تعیین وزن معیارهای مختلف براساس میزان اطلاعات موجود در داده‌ها استفاده می‌شود.[۲۶]

۷.۲. روش پرامتی

روش پرامتی، یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) برای رتبه‌بندی گزینه‌های مختلف براساس معیارهای متعدد است، که بر پایه‌ی مقایسه‌ی زوجی گزینه‌ها برای هر معیار و سپس تلفیق مقایسه‌های مذکور با استفاده از یک تابع ترجیح مشخص کار می‌کند. وزن‌دهی معیارها نیز بخشی از فرآیند مذکور است. درنهایت، روش پرامتی، یک رتبه‌بندی جامع و اولویت‌های جزئی برای گزینه‌ها ارائه می‌دهد. استفاده از ترکیب روش‌های انتروپی و پرامتی برای وزن‌دهی و رتبه‌بندی در مقایسه با روش‌های سنتی‌تر مانند AHP و تاپسیس، مزایای عینیت بیشتر در محاسبه‌ی وزن معیارها، عدم‌نیاز به مقایسه‌های زوجی پرکار، توانایی کار با داده‌های کمّی و کیفی، انعطاف‌پذیری بیشتر، و درنظرگرفتن بهترین و بدترین گزینه در پرامتی است.[۲۷]

۸.۲. تولید پیوسته و اتوماتیک

تولید پیوسته و اتوماتیک، نوعی سیستم تولید است، که در آن تمام مراحل مختلف فرآیند تولید، مانند: برش، جوشکاری، مونتاژ، و بسته‌بندی به‌صورت خودکار و بدون‌وقفه به هم متصل شده‌اند. این نوع سیستم‌های تولید، معمولاً برای تولید انبوه محصولات استانداردشده استفاده می‌شوند.[۲۸]

۹.۲. تولید رادیاتور گرمایشی پنلی

تولید رادیاتور گرمایشی پنلی، فرآیند صنعتی ساخت انواع رادیاتورهای گرمایشی برای ساختمان‌ها و واحدهای مسکونی است، که شامل مراحل مختلفی، از جمله: برش و خم‌کاری ورق‌های فلزی، جوشکاری، سوراخ‌کاری برای نصب شیرآلات، رنگ‌آمیزی، مونتاژ، و بسته‌بندی است و می‌تواند به‌صورت پیوسته و با استفاده از خطوط تولید اتوماتیک انجام شود.[۲۹] خط تولید رادیاتور به‌طورپیوسته و اتوماتیک عملیات تولید را به‌ترتیب جوش نقطه‌ای پنل و کنوکتور، جوش طولی هر یک از طرفین، جوش عرضی هر یک از طرفین، جوش طرفین رادیاتور به همراه قطعات سه‌راهی و براکت، و مرحله‌ی انتهایی تست رادیاتور کامل در شرایط تعریف‌شده در استاندارد مرتبط است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

نوشتار حاضر، با الهام از مطالعات پیشین و با تکیه بر اصول مدیریت مشارکتی و نظریه‌های انگیزشی، یک سیستم جامع انگیزشی تیمی برای صنایع تولید پیوسته‌ی خودکار ارائه کرده است. ارزیابی تیم‌ها به‌صورت دوره‌ای و با استفاده

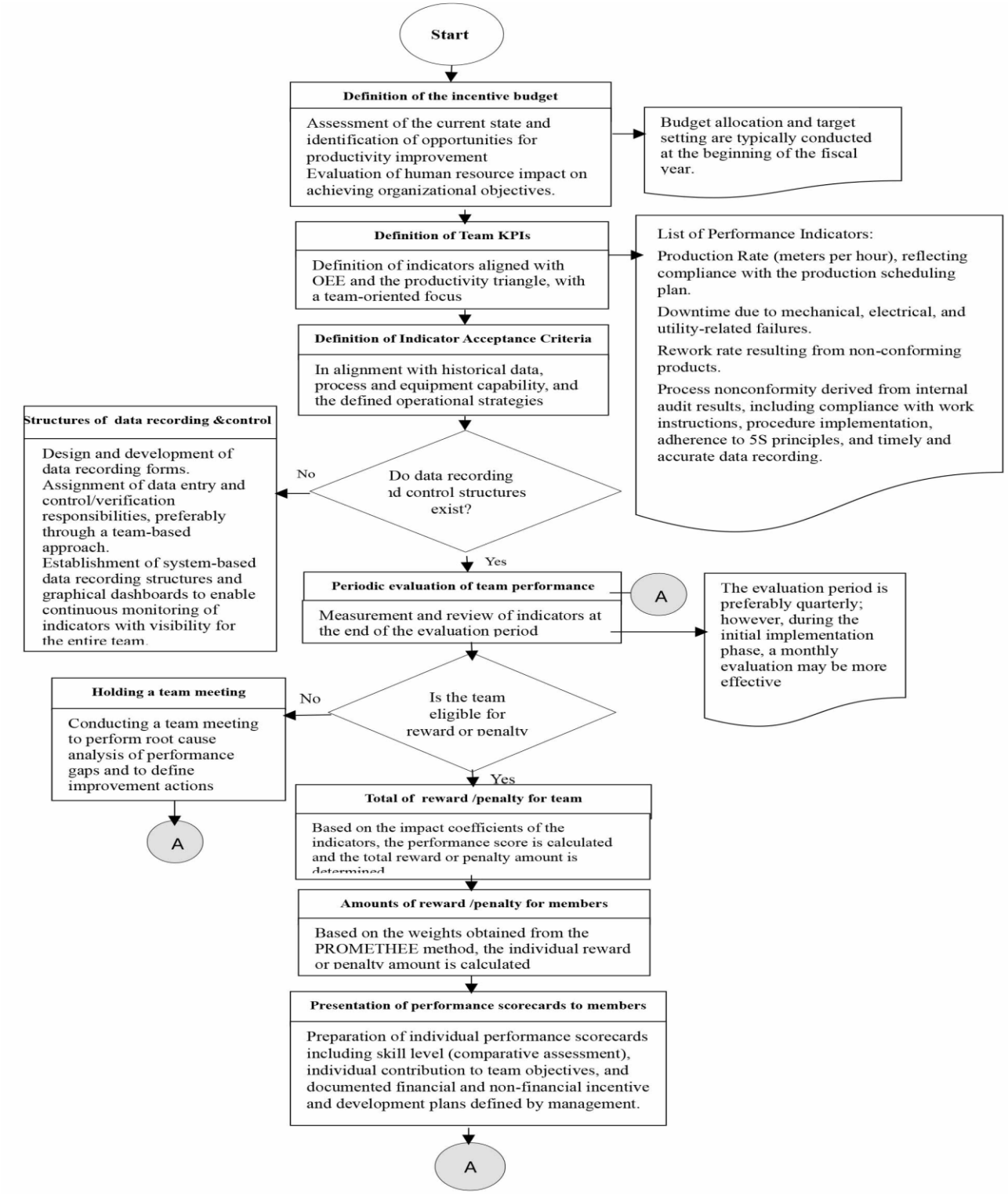
[10] Team Working

[11] Key Performance Indicators

از داده‌های عملکردی واقعی انجام شده است. نتایج ارزیابی به‌طورشفاف در اختیار تیم‌ها قرار گرفته است تا آن‌ها از نقاط قوت و ضعف خود آگاه شوند. سپس براساس رتبه‌بندی تیم‌ها، پاداش‌های انگیزشی اعطا شده است، که شامل: پاداش‌های مالی، مزایای شغلی، فرصت‌های آموزشی، و توسعه‌ی حرفه‌ای و یا هر نوع پاداش دیگر متناسب با فرهنگ سازمانی بوده است. علاوه‌بر پاداش، برای تیم‌هایی که عملکرد ضعیفی داشته‌اند، تدابیر انضباطی و برنامه‌های بهبود نیز در نظر گرفته شده است، تا انگیزه‌ی لازم برای رفع نقاط ضعف و ارتقاء عملکرد در آن‌ها ایجاد شود. در سیستم مذکور، تنبیه نه فقط به‌عنوان عامل بازدارنده، بلکه به‌عنوان فرصتی برای شناسایی مشکلات و حل آن‌ها نیز عمل می‌کند. در شکل ۱، گردش مدل مشاهده می‌شود و در ادامه، به تفصیل هر بخش پرداخته شده است.

۱.۳. تعیین بودجه‌ی مربوط به پاداش تولید متناظر با اهداف سازمانی در ابتدای شروع دوره

مطابق با الزامات کسب و کار، در ابتدای هر سال اهداف سازمانی توسط تیم خبره با حضور مدیران ارشد مشخص و نیازمندی‌های لازم جهت دستیابی به



شکل ۱. نمودار فرایند ارزیابی عملکرد پیشنهادی.

آن‌ها تعیین و بودجه‌بندی مالی سازمان در حوزه‌ی منابع انسانی، تجهیزات، مواد اولیه، و ملزومات تولید، و .. تعیین می‌شود. مقدار بودجه از روش‌های مختلف تحلیلی جبران خدمت و راهبردهای متفاوت تعیین می‌شود.[۳۰] یکی از مزیت‌های این کار، آگاهی بیشتر از وضع موجود و نیز شفاف‌شدن مسیر پیشرفت در راستای دستیابی به اهداف سازمانی است. بالطبع، سازمان‌هایی که اهداف افزایش بهره‌وری را دنبال می‌کنند، باید در زمان هدف‌گذاری و تعیین راهبرد به انگیزه- نیروی انسانی به‌طورخاص توجه کنند. در پژوهش حاضر، از هدف‌گذاری بر مبنای فروش و سودآوری استفاده شده است. با افزایش روند پلکانی از نقطه‌ی سر به سر، مقدار تخصیص بودجه به پاداش نیز افزایش می‌یابد. به جهت کنترل دقیق‌تر، مقدار بیشینه‌ی افزایش بهره‌وری براساس ظرفیت‌های اسمی تعیین و کنترل روند پلکانی، افزایش سودآوری با افزایش راندمان تولید هم‌سو می‌شود. لذا پس از محاسبات لازم در بازه‌های تعیین‌شده، درصد استفاده از بودجه‌ی بیشینه مشخص می‌شود، که روشی پویا و انعطاف‌پذیر است.

۲.۳. تعریف شاخص‌های تیمی عملکردی متناظربا اهداف و وظایف تیم، همراه با تعیین معیار پذیرش

تعیین شاخص‌های عملکردی، یکی از چالش‌های سازمان‌ها در مدیریت عملکرد و کنترل مؤثر سازمان است؛ به همین جهت پژوهش‌های زیادی در این حوزه به‌صورت نظری و بعضاً کاربردی صورت پذیرفته است و ادامه‌دار خواهد بود؛ چرا که سیستم‌های بومی‌سازی‌شده به مراتب کاراتر از سیستم‌های نظری و عمومی هستند. نظر به اینکه هدف از پژوهش حاضر افزایش بهره‌وری است، برای تعیین شاخص‌های عملکردی از مثلث بهره‌وری و نیز خروجی حاصل از بررسی فازی در رتبه‌بندی عوامل مؤثر در شاخص OEE، که توسط غلامیان و نیلی‌پور (۲۰۲۰)،[۳۱] ارائه شده است، استفاده شده است.

در صنایع تولید پیوسته‌ی اتوماتیک، با وجود کاهش تعامل مستقیم انسان با ماشین‌آلات، نیاز به تعامل و مشارکت بین نیروهای انسانی واحدهای تولید، نگهداری و تعمیرات، و کنترل کیفیت به مراتب بیشتر خواهد بود. این امر به دلایل مدیریت سیستم‌های پیچیده، حل مسائل چندبُعدی، مدیریت تغییر، و اشتراک دانش است. همچنین واحدهای مذکور را می‌توان به عنوان رئوس مثلث بهره‌وری در نظر گرفت، که هر یک نقش حیاتی در دستیابی به هدف مشترک افزایش بهره‌وری دارند. این رویکرد حاکم بر طراحی و پیاده‌سازی سیستم ارزیابی عملکرد تیمی در پژوهش حاضر بوده است.

- مثلث بهره‌وری[۱۲]

مثلث بهره‌وری، یک چارچوب مفهومی برای درک و بهبود بهره‌وری در سازمان‌هاست؛ که توسط دیوید سومانت[۱۳] (۱۹۸۴)،[۳۲] در کتاب "مهندسی و مدیریت بهره‌وری" ارائه شده است. طبق نظریه‌ی مذکور، بهره‌وری یک سازمان، تابعی از سه عامل اصلی کارایی[۱۴]، اثربخشی[۱۵]، و کیفیت[۱۶] است؛ که رأس‌های مثلث بهره‌وری را تشکیل می‌دهند. برای دستیابی به بهره‌وری بالا، سازمان‌ها باید در تمام سه جنبه، کارایی، اثربخشی، و کیفیت عملکرد خوبی داشته باشند. سه عامل مذکور در تعامل با یکدیگر هستند و بهبود در یک عامل می‌تواند در دیگر عوامل نیز تأثیرگذار باشد.[۳۳]

در کنار نظریه‌ی مثلث بهره‌وری، شاخص‌های عملکرد KPI ابزارهای مهمی برای اندازه‌گیری و پایش بهره‌وری در سازمان‌ها هستند. KPI ها معیارهای کمّی یا کیفی هستند، که برای ارزیابی پیشرفت در دستیابی به اهداف سازمانی استفاده می‌شوند.[۲۵]

KPI ها باید با راهبردها و اهداف سازمان مرتبط، قابل اندازه‌گیری و دارای حد پذیرش برای کنترل و تحلیل در جهت اطمینان دستیابی به اهداف و شناسایی به موقع انحراف‌ها باشند. در پژوهش حاضر، شاخص‌های مذکور در سه حوزه‌ی کارایی، اثربخشی، و کیفیت از مثلث بهره‌وری و نیز توجه به شاخص‌های OEE مطابق رابطه‌ی ۱ تعریف شده‌اند.

$$P = \left(\frac{pr}{pl}\right)*100 \qquad (1)$$

که در آن، P درصد تحقق برنامه‌ی تولید، pr میزان محصول تولیدشده، و pl میزان تولید برنامه‌ریزی‌شده هستند. در پژوهش حاضر، از شاخص P به جهت ارزیابی بهره‌وری کل تیم و درصد فعال‌شدن بودجه‌ی پاداش استفاده شده است.

شاخص دیگری با نام تنظیم‌های کاهشی RP در پژوهش حاضر بررسی شده است، که مکمل شاخص P است (رابطه‌ی ۲). شاخص RP، میزان تولیدنشده مطابق با برنامه به‌دلیل کاهش متر در ساعت دستگاه توسط سرپرست تولید در زمان مشخص را نمایش می‌دهد، که به‌دلایل مختلف، از جمله: مهارت کادر تولید، شناسایی مشکل بالقوه از سوی کادر فنی یا تولید، عدم مرغوبیت لازم مواد، و متریال به دلایل تأیید اجباری یا عدم مهارت کنترل کیفیت و... ایجاد می‌شود.

$$RP = \left(\frac{pl - pr}{pl}\right)*100 \qquad (2)$$

شاخص M ، به جهت ریشه‌یابی مشکلات و نیز لزوم افزایش روزافزون مهارت تیم متشکل از تولید، نت، و کنترل کیفیت است، که مطابق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$M = \left(\frac{mt}{at}\right)*100 \qquad (3)$$

که در آن، M درصد توقف‌ها، mt مدت زمان توقف، و at مدت زمان در دسترس (مطابق با برنامه) است.

با توجه به اینکه تمرکز نوشتار حاضر در ارزیابی عمکرد تیم بوده است، زمان در دسترس منطبق بر زمان برنامه‌ریزی‌شده بوده و از توقف‌های راهبردی چشم‌پوشی شده است.

شاخص Q، بیانگر درصد محصول یا خروجی نامنطبق است؛ که مطابق رابطه‌ی ۴ محاسبه می‌شود:

$$Q = \left(\frac{pq}{pr}\right)*100 \qquad (4)$$

که در آن، pq تعداد یا مقدار محصول/ خروجی نامنطبق و pr تعداد یا مقدار کل محصول/ خروجی تولیدشده هستند.

شاخص A، امتیاز عدم انطباق فرایند است، که مطابق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

[12] Productivity Triangle
[13] Sumanth
[14] Efficiency
[15] Effectiveness
[16] Quality

جدول ۱. شاخص ها و گزینه ها.

Indicators (Affecting Productivity)	Options (Team Members)
Production Schedule Attainment	Production
Setup Reduction Time	
Stoppages	Electrical Maintenance
Rework	Mechanical Maintenance
Process Deviation	Facilities Maintenance
	Quality Control

جدول ۲. حدود پاداش و جریمه برای شاخص‌ها.

Indicator Title	Responsibles	Reward Criterion	Penalty Criterion	Evaluation Method
Production Schedule Attainment	Production, Maintenance, Quality Control	93%	89%	Records / Statistics Officer / Quality Assurance / Audit documents
Setup Reduction Time		10%	15%	
Stoppages		2.5%	3%	
Rework		1.5%	2%	
Process Deviation		300	300	

$$A = r * (Nc) \quad (5)$$

که در آن، Nc تعداد عدم انطباق‌ها و r شدت عدم انطباق هستند.

شاخص A، میزان انطباق اجرای دستورالعمل‌ها و روش‌های کاری را متناظر با استانداردها نشان می‌دهد، که برگرفته از الزامات استانداردهای ISO ۹۰۰۱ و 5S است. اندازه‌گیری شاخص A علاوه‌بر اطمینان از اجرای الزامات، اثربخشی آن‌ها را نیز رصد می‌کند و در صورت هرگونه انحراف، بررسی‌های لازم جهت هرگونه اصلاح به موقع صورت می‌پذیرد. به‌علاوه، انگیزه‌ی کارکنان را به مطالعه‌ی روش‌ها و مشارکت در بهبود آن‌ها تضمین می‌کند.

۳.۳. تعیین معیار پذیرش یا حدود هدف‌ها و شاخص‌ها

تعیین حدود و مقادیر هدف‌ها برای شاخص‌های عملکردی، یک موضوع مهم و چالش‌برانگیز در مدیریت عملکرد است و باید به گونه‌ای تعیین شوند که از یک طرف، قابل دستیابی و واقع‌بینانه باشند و از طرف دیگر، فشار و انگیزه‌ی لازم برای بهبود مستمر را ایجاد کنند. معمولاً این روش‌ها برای تعیین حدود مذکور استفاده می‌شوند:

۱. استفاده از داده‌های گذشته و روند تاریخی عملکرد.[۳۴]

۲. الگوبرداری از رقبا و صنعت.[۳۵]

۳. استفاده از تئوری محدودیت‌ها و روش‌های بهینه‌سازی.[۳۶]

۴. استفاده از روش دلفی و نظرهای خبرگان.[۳۷]

استفاده از داده‌های گذشته و روند تاریخی عملکرد، یکی از رایج‌ترین روش‌هاست. با بررسی عملکرد قبلی، می‌توان حدود و هدف‌های جدید را با توجه به بهترین عملکرد گذشته، میانگین عملکرد، و روند بهبود تعیین کرد. در پژوهش حاضر، حدود شاخص‌ها از ترکیب روش ذکرشده و اطلاعات سازنده‌ی دستگاه و نیز توان و ظرفیت نیروی انسانی تعیین شده‌اند (جدول ۲).

۴.۳. وزن دهی شاخص‌ها و گزینه‌ها

به جهت اطلاع از میزان تأثیرگذاری شاخص‌ها در هدف، لازم است که وزن آن‌ها تعریف شود. روش‌های زیادی برای وزن‌دهی وجود دارد، که با توجه به دسترسی به داده‌ها و نوع آن‌ها، وجود تیم خبرگان و اطمینان از همکاری به موقع و مؤثر ایشان و نیز اهداف مسئله، انتخاب روش صورت می‌پذیرد.

به جهت ترجیح بر استفاده از روش‌های مبتنی بر داده، در ابتدا فرم‌ها، نرم‌افزار، و ساختار جمع‌آوری و ثبت داده‌ها فراهم شده‌اند. سپس بر روی آن‌ها آزمایش صورت گرفته و پس از یک دوره‌ی ۶ ماهه‌ی وزن‌دهی، شاخص‌ها به روش انتروپی و در وزن‌دهی گزینه‌ها بر تأثیر در شاخص‌ها، از روش پرامتی استفاده شده است (در جدول ۱، شاخص‌ها و گزینه‌ها ارائه شده‌اند). گزینه‌ها، واحدهای تشکیل‌دهنده‌ی تیم و تأثیرگذار در بهره‌وری و افزایش راندمان هستند. در ادامه، روش‌های مذکور تشریح و داده‌های مطالعه‌ی موردی در فصل بعد شرح داده شده‌اند.

الف) روش انتروپی شانون برای وزن‌دهی معیارها

روش انتروپی، یک روش عینی برای تعیین وزن معیارها در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره است، که براساس پراکندگی داده‌ها در هر معیار عمل می‌کند. هر چه پراکندگی و اطلاعات یک معیار بیشتر باشد، وزن بیشتری به آن تعلق می‌گیرد.

ژی هانگ[۱۷] و همکارش (۲۰۰۶)،[۳۸] روش انتروپی را به‌صورت کامل و با جزئیات بیشتر تشریح کرده‌اند. ایشان از انتروپی شانون برای محاسبه‌ی وزن

[17] Zhi-hong

معیارها استفاده کرده‌اند، که کاربرد گسترده‌تری در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره دارد.

انتروپی شانون مطابق رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه می‌شود:

$$K = \left(\frac{1}{\ln(m)} \right) \quad (6)$$

$$E_j = -K * \sum_{i=1}^{m} p_{ij} * \ln(p_{ij}) \quad (7)$$

که در آن‌ها، E_j انتروپی شانون برای معیار j، p_{ij} نرمالیزه‌کردن x_{ij} از طریق $p_{ij} = x_{ij} / \sum_i x_{ij}$، m تعداد گزینه‌ها، و K ثابت برای نرمالیزه‌کردن انتروپی شانون در بازه‌ی [۱و۰] هستند.

سپس درجه‌ی عدم اطمینان d_j و وزن معیار w_j مطابق روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند:

$$d_j = 1 - E_j \quad (8)$$

$$w_j = d_j / \sum_j d_j \quad (9)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود، انتروپی شانون با درنظرگرفتن احتمال وقوع داده‌ها در معیار j، عدم اطمینان را محاسبه می‌کند. هر چه عدم اطمینان بیشتر باشد، معیار حاوی اطلاعات بیشتری است و وزن بالاتری دریافت می‌کند.

ب) روش پرامتی برای رتبه‌بندی گزینه‌ها

روش پرامتی، یک روش رتبه‌بندی ارجحیت برای گزینه‌ها براساس معیارهای چندگانه است؛ که در آن، ارجحیت گزینه‌ها از طریق محاسبه‌ی جریان‌های ورودی و خروجی صورت می‌گیرد.[۳۹] پرامتی ۲، یک روش رتبه‌بندی کامل برای تصمیم‌گیری چندمعیاره است، که گزینه‌ها را از بهترین به بدترین مرتب می‌کند و از ترکیب دو جریان ورودی و خروجی برای هر گزینه استفاده می‌کند. مراحل اجرای روش پرامتی ۲ عبارت‌اند از:

۱. محاسبه‌ی درجه‌ی ارجحیت $p_j(a,b)$ گزینه‌ی a نسبت به b در هر معیار j با استفاده از تابع ترجیح مناسب (خطی، گوسی، درجه‌ی ۲، و ...).

۲. محاسبه‌ی شاخص ارجحیت $\pi(a,b)$ از طریق میانگین وزنی درجه‌ی ارجحیت‌ها، که در پژوهش حاضر w از روش انتروپی حاصل شده است (مطابق رابطه‌ی ۱۰).

$$\pi(a,b) = \sum_j w_j * p_j(a,b) \quad (10)$$

۳. محاسبه‌ی جریان خروجی $q^+(a)$ و ورودی $q^-(a)$ برای هر گزینه‌ی a (مطابق رابطه‌های ۱۱ و ۱۲):

$$q^+(a) = 1/(n-1) * \sum_x \pi(a,x) \quad (11)$$

$$q^-(a) = 1/(n-1) * \sum_x \pi(x,a) \quad (12)$$

۴. محاسبه‌ی جریان خالص q(a) برای هر گزینه‌ی a (مطابق رابطه‌ی ۱۳):

$$q(a) = q^+(a) - q^-(a) \quad (13)$$

۵. رتبه‌بندی گزینه‌ها براساس مقادیر q(a) از بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین.

در روش پرامتی ۲، علاوه‌بر q^+ و q^- که به‌ترتیب توان رقابتی و ضعف هر گزینه را نشان می‌دهند، از q(a) به‌عنوان جریان خالص استفاده می‌شود، که رتبه‌ی نهایی گزینه‌ها را مشخص می‌کند.

معیارهای رتبه‌بندی در روش پرامتی ۲ عبارت‌اند از:

- گزینه‌ای با بزرگ‌ترین q(a)، بهترین گزینه است.

- اگر q(a) صفر باشد، گزینه‌ی a نه بهتر است و نه بدتر.

- اگر q(a) مثبت باشد، گزینه‌ی a از گزینه‌های دیگر با q(a) منفی بهتر است.

روش مذکور، امکان رتبه‌بندی کامل گزینه‌ها را فراهم می‌سازد و برای حل مسائل پیچیده‌ی تصمیم‌گیری چندمعیاره مناسب است.

۴. مطالعه‌ی موردی و یافته‌های پژوهش

در بخش کنونی، به ارائه‌ی داده‌های پیاده‌سازی و نتایج حاصل از آن پرداخته شده است. مطالعه‌ی موردی پژوهش حاضر، یک کارخانه‌ی تولید رادیاتور گرمایشی پنلی بوده است، که در گروه صنعت پیوسته و اتوماتیک قرار دارد و حدود ۴ نوع رادیاتور را در ۱۰ گروه سایزی (براساس طول) تولید می‌کند. بزرگ‌ترین مشکل کارخانه‌ی مذکور، راندمان پایین است. با عارضه‌یابی انجام‌شده، جلسه با خبرگان، و بررسی داده‌های گذشته مشخص شد که مشکل پیش‌آمده به‌علت نبود فرایند مناسب و تعامل صحیح بین واحدهای تأثیرگذار در بهره‌وری و نیز عدم انتقال دانش بین واحدهای اخیر بوده است؛ که در جهت رفع آن‌ها، در ابتدا ساختارهای تولیدی از نیروی انسانی تا فرایندها و فرم‌ها و ساختارهای نرم‌افزاری در یک دوره‌ی ۶ ماهه اصلاح شده است. پس از آن، به جهت ایجاد تعامل و تفکر تیمی میان واحدهای تولید، نت، و کنترل کیفیت و نیز اطمینان از اجرای صحیح ساختارهای اصلاح‌شده، سیستم ارزیابی عملکرد تیمی مبتنی بر داده‌های رکوردشده، طراحی و اجرا شده است. طبق فرایند تعریف‌شده در شکل ۱، در گام اول، بودجه‌ی تعریف‌شده برای انگیزش کارکنان ۱۰ میلیون تومان در نظر گرفته شده است. در گام‌های دوم و سوم، فهرست شاخص‌های مؤثر با هدف بهره‌وری و حدود پذیرش برای پاداش و نیز حدود جریمه‌ی شاخص‌ها تعریف و در جدول ۲ ارائه شده است.

همان‌گونه که قبلاً گفته شد، اعداد مذکور براساس تحلیل‌های مالی، داده‌های گذشته، اطلاعات سازنده‌ی دستگاه، استهلاک دستگاه، و توانایی و پتانسیل نیروی انسانی درنظر گرفته شده‌اند. در گام چهارم، ابتدا باید از وجود و درستی داده‌ها و فرایند صحیح ثبت و درک مشترک تمام اعضا نسبت به آن اطمینان حاصل شود. در پژوهش حاضر، بررسی ساختارهای تولید، اصلاح، آموزش، و ایجاد ساختار قابل اطمینان برای ثبت و تحلیل داده‌ها، حدود ۶ ماه به طول انجامیده است. نمودارهای ابتدایی در حین پیاده‌سازی در شکل ۲ مشاهده می‌شود. مطابق نمودارها، روند بهبود در طی اصلاح ساختارها نیز ملاحظه می‌شود. پس از اتمام اصلاحات، دستورالعمل‌های کاری، روش‌های اجرایی، و چک‌لیست‌های ممیزی تهیه و در دوره‌های یک ماهه به مدت ۳ ماه، فرایند و نیروی انسانی ارزیابی شده است.

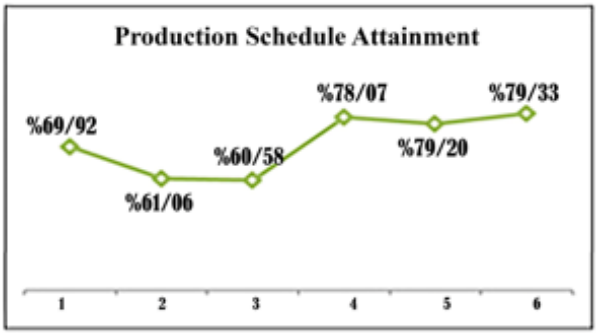
گام بعدی، اندازه‌گیری بهره‌وری یا راندمان تولید است، تا وضعیت پاداش یا جریمه مشخص شود. از آنجا که مدیریت متریال در تولید انواع محصول و نیز

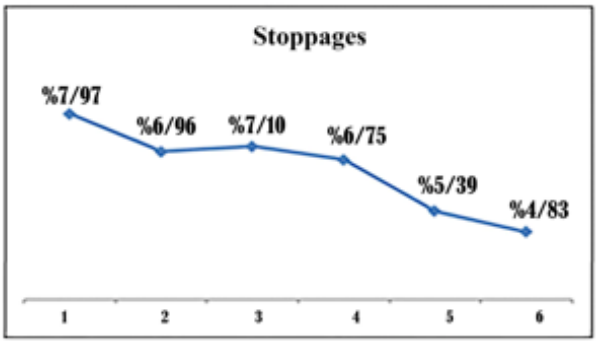
جدول ۳. ورودی روش انتروپی (۶ ماه).

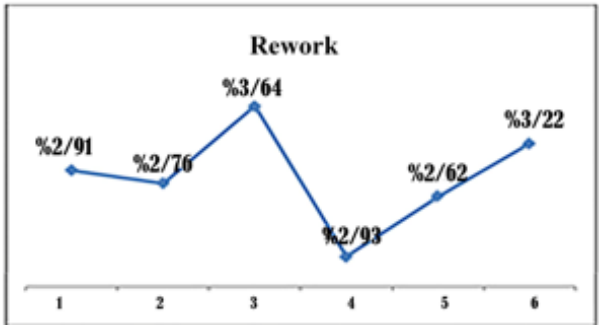
Alternatives	Process Deviation	Rework	Stoppages	Setup Reduction Time
Production	0.26	0.32	0.21	0.54
Electrical Maintenance	0.23	0.3	0.3	0.16
Mechanical Maintenance	0.26	0.22	0.38	0.21
Facilities Maintenance	0.13	0.06	0.08	0.01
Quality Control	0.13	0.10	0.03	0.08

جدول ۴. خروجی روش انتروپی: وزن شاخص‌ها.

Alternatives	Process Deviation	Rework	Stoppages	Setup Reduction Time
Production	-0.35	-0.36	-0.33	-0.33
Electrical Maintenance	-0.34	-0.36	-0.36	-0.30
Mechanical Maintenance	-0.35	-0.33	-0.37	-0.33
Facilities Maintenance	-0.26	-0.16	-0.21	-0.04
Quality Control	-0.26	-0.23	-0.11	-0.20
Sum of Column	-1.56	-1.46	-1.37	-1.20
Ej	0.97	0.9	0.85	0.74
Ej-1	0.03	0.1	0.15	0.26
wj	0.06	0.18	0.28	0.48







شکل ۲. نمودارهای روند شاخص‌ها در طی اجرای روش پیشنهادی.

لزوم به حرکت تیم به سوی بهبود و قابل درک‌بودن دستیابی به هدف برای همه‌ی اعضا حائز اهمیت است، لذا برنامه‌ی تولید مطابق با هدف‌گذاری تنظیم و بیشینه‌ی۹۰٪ آن جهت تأمین سفارش‌ها منظور شده و در ابتدای هفته‌ی بعد بروزرسانی داده‌ها صورت پذیرفته است. امتیاز تحقق برنامه به این صورت محاسبه شده است:

از بازه‌ی ۹۲ تا ۱۰۰ درصد، با هر یک واحد افزایش، یک واحد امتیاز مثبت و در بازه‌ی ۸۹ تا ۸۳ به ازاء هر واحد کاهش، یک واحد امتیاز منفی لحاظ می‌شود. درصد مربوط به سه ماهه‌ی دوم برای شاخص مذکور، ۹۵/۶۹٪ محاسبه و امتیاز دریافتی ۵۰٪ بوده است. میزان کل مبلغ پاداش برای ماه iأم به‌صورت رابطه‌ی ۱۴ محاسبه شده است؛ که در آن، R_i مبلغ پاداش کل ماه iأم، S_i امتیاز تحقق برنامه‌ی ماه iأم، و B بیشینه‌ی بودجه هستند.

$$R_i = S_i * B \qquad R_7 = 0.5*10000000 = 5000000 \quad (14)$$

اگر مقدار شاخص تحقق برنامه از ۸۹ کمتر شود، جریمه به آن تعلق می‌گیرد و امتیاز منفی در مقدار بودجه ضرب می‌شود. در گام بعدی، باید مقدار به‌دست‌آمده از بودجه‌ی پاداش ماه هفتم به شاخص‌های تأثیرگذار تخصیص داده شود؛ بنابراین، نیاز به محاسبه‌ی وزن شاخص‌ها با استفاده از روش انتروپی است. در جدول ۳، که نشانگر ورودی روش انتروپی برای محاسبه‌ی وزن هر شاخص در دستیابی به هدف افزایش بهره‌وری است؛ داده‌های مربوط به عدم‌دستیابی به اهداف شاخص‌ها متأثر از هر یک از اعضاء تیم مشاهده می‌شود.

طبق خروجی انتروپی (مطابق جدول ۴)، شاخص توقف‌های بیشتری در تحقق برنامه یا افزایش بهره‌وری تأثیر دارد. مبلغ تعلق‌گرفته به هر شاخص طبق جدول ۴ مطابق رابطه‌ی ۱۵ محاسبه شده است:

$$r_i = w_i * p_i \quad (15)$$

$r_1 = 2418766$. $r_2 = 1402812$

$r_3 = 903045$. $r_4 = 275378$

جدول ۵. پاداش تعلق‌گرفته برای هر شاخص.

Reward Amount	Score	Period Ranking	indicator
0.4*2418765=967506	4/10	6.9	Setup Reduction Time
0.4*1402812=561125	4/10	1.53	Stoppages
0.34*903044=307035	4/12	1.18	Rework
0.5*275380=137690	6/12	168	Process Deviation

جدول ۶. وزن‌های خروجی مؤلفه‌های روش پرامتی ۲.

Component Weight(s)	q- - q+	q-	q+	Alternatives
53%	53%	0.05	0.58	Production
16%	16%	0.12	0.28	Electrical Maintenance
23%	23%	0.11	0.34	Mechanical Maintenance
3%	-50%	0.51	0.01	Facilities Maintenance
5%	-43%	0.45	0.02	Quality Control

جدول ۷. محاسبه‌ی پاداش کل برای هر یک از اعضاء تیم/ گروه.

Sum of Reward	Process Deviation	Rework	Stoppages	Setup Reduction Time	Alternatives
1045878	72975	162729	297396	512778	Production
315737	22030	49126	89780	154801	E-Maint.
453872	31668	70618	129059	222526	M-Maint.
59201	4131	9211	16834	29025	Fac. Maint.
98668	6884	15352	28056	48375	QC

که در آن، r_i پاداش تعلق‌گرفته به هر یک از شاخص‌های توقف‌ها، دوباره‌کاری، و عدم انطباق ممیزی است. حال با توجه به میزان تحقق حدود پذیرش هر شاخص مطابق جدول ۲، امتیاز شاخص محاسبه و مبلغ پاداش تعلق‌گرفته مطابق جدول ۵ محاسبه شده است. واضح است درصورت عدم‌تحقق حدود پذیرش، مبلغ پاداشی تعلق نمی گیرد و ممکن است حتی ضرایب منفی و جریمه نیز منظور شود.

- شاخص تنظیم‌های کاهشی با هر کاهش ۱ درصدی از معیار پذیرش ۱ امتیاز کسب می‌کند..
- شاخص دوباره‌کاری نیز با هر کاهش ۰/۲۵ درصدی از معیار پذیرش ۲ امتیاز کسب می‌کند.
- شاخص دوباره‌کاری نیز با هر کاهش ۰/۵ درصدی از معیار پذیرش ۲ امتیاز کسب می‌کند.
- شاخص عدم انطباق ممیزی با هر ۵۰ واحد کاهش از معیار پذیرش ۲ امتیاز کسب می‌کند.

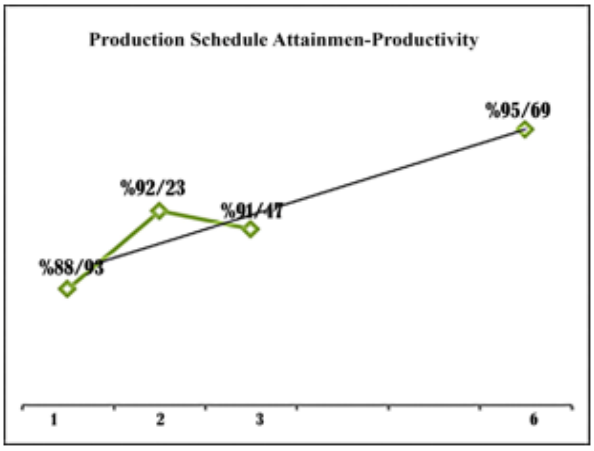
بدیهی است عکس موارد اخیر، مطابق با جدول ۲ برای جریمه صادق است.

در گام ششم، باید ضریب تأثیر هر یک از اجزاء تیم بر هر شاخص تعیین و پاداش هر یک از اجزاء مشخص شود. به این منظور، از روش پرامتی ۲ استفاده شده و خروجی آن به قرار جدول ۶ بوده است. گرچه جدول اخیر، نت تأسیسات و کنترل کیفیت را به‌صورت دو عامل غیرمؤثر نشان می‌دهد، اما با تحلیل داده‌ها مشخص است که فرایندها و فعالیت‌های دو عضو اخیر، تقریباً به حالت پایدارتری رسیده است و لذا، ۷٪ باقیمانده از مجموع درصدهای دیگر اعضا به نسبت میزان منفی‌بودن بین دو عضو تقسیم شده است. واضح است اگر شرایطی پیش آید که هر یک از اعضا به حالت پایدارتری برسند، با اجرای مجدد روش‌های انتروپی و پرامتی، وزن‌های متفاوتی وجود خواهد داشت.

گام هفتم، محاسبه‌ی مجموع پاداش هر یک از اعضاست، که در جدول ۷ ارائه شده است. هر یک از اعضاء تیم، قطعاً تعدادی کارکنان دارند و میزان به‌دست‌آمده برای هر یک از اعضاء تیم، باید به نسبت اهمیت شغلی، که در تعیین حقوق افراد مؤثر بوده است، به افراد تخصیص داده شود.

۵. اعتبارسنجی

فرایند پیشنهادی به‌مدت ۳ ماه به‌صورت ماهانه و به جهت اعتبارسنجی ۳ ماه بعد، به‌صورت فصلی در شرکت تولیدکننده‌ی رادیاتور گرمایشی اندازه‌گیری شده است، که نتایج آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۳. نتایج و اعتبار فرایند پیشنهادی.

در زمان پیاده‌سازی با اصلاحات و آموزش‌های انجام‌شده، نمودار تحقق برنامه یا بهره‌وری، روند صعودی به خود گرفته و از بیشترین مقدار ۷۸٪ به حدود ۸۹٪ رسیده است، که خود دست‌کم ۱۴٪ افزایش بهره‌وری را ایجاد کرده است. به مراتب دوره‌ی ۶ ماهه‌ی اجرا، افزایش ۸ درصدی را محقق ساخته است. لذا در مجموع، ۲۲٪ بهره‌وری از زمان شروع تا انتهای ارزیابی مشاهده شده است. همچنین، کارخانه موفق شده است که با انگیزه‌ی ایجادشده در کارکنان و تفکر تیمی و تعامل میان اعضاء تأثیرگذار به میزان بیشینه‌ی بهره‌وری دست یابد.

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در نوشتار حاضر، یک سیستم نوآورانه‌ی پاداش و جریمه مبتنی بر داده برای ارتقاء بهره‌وری ارائه شده است. رویکرد پیشنهادی، عملکرد تیمی را با شاخص‌های تنظیم‌های کاهشی، توقف‌ها، دوباره‌کاری، و عدم انطباق فرایند مبتنی بر رویکرد تیمی را موردهدف قرار داده و با تلفیق روش‌های آماری انتروپی و پرامتی مبتنی بر داده، وزن‌دهی پویای شاخص‌ها در هر دوره‌ی زمانی را برای شناسایی سریع تغییرات در عملکرد و نیاز به اصلاح یا بهبود فرآیندها فراهم کرده است. سیستم اخیر در یک کارخانه‌ی تولید رادیاتور گرمایشی پیاده‌سازی شده و با تأثیر مستقیم در سرمایه‌های انسانی و ایجاد تعامل و تفکر تیمی پس از یک دوره‌ی ۳ ماهه‌ی اولیه و اعتبارسنجی در ۳ ماهه‌ی دوم، نتایج به‌دست‌آمده، ۲۲٪ افزایش تولید، ۲۰٪ کاهش نرخ خرابی، ۱/۵٪ کاهش محصولات معیوب، و ۲۱/۵٪ افزایش امتیاز ممیزی فرایند را در پی داشته‌اند.

به لحاظ دستیابی به نتایج مشترک با مطالعات صورت‌گرفته، براساس یافته‌های نوشتار غلامیان و نیلی‌پور (۲۰۲۰)،[۳۱] با توجه به نتایج وزن فازی معیارهای شکست ابزار، خرابی ماشین‌آلات، و تعمیرات اصلاحی به ترتیب در اولویت‌های اول تا سوم قرار گرفته‌اند، که در ضرایب خروجی پژوهش حاضر نیز تنظیم‌های کاهشی و نگهداری و تعمیرات، وزن‌های بالاتری داشته‌اند.

به‌عنوان پیشنهاد برای مطالعات آتی، در صورت جمع‌آوری داده‌های حاصل از مدل ارزیابی عملکرد در چندین دوره، می‌توان وزن‌های موردنیاز در پژوهش را از روش ماشین لرنینگ به‌دست آورد.

در بخش تخصیص پاداش به کارکنان نیز می‌توان درصورت وجود داده‌های مربوط به مهارت‌ها، تجارب، رویکرد تیمی، و عوامل مرتبط دیگر از روش‌های داده‌محور برای وزن‌دهی به آن‌ها استفاده کرد.

References - منابع

1. Aneja, R. and Arjun, G., 2021. Estimating components of productivity growth of Indian high and medium-high technology industries: A non- arametric approach. *Social Sciences & Humanities Open*, *4* (1), pp.100-180. https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2021.100180
2. Bag, S., Gupta, S. and Foropon, C., 2019. Examining the role of dynamic remanufacturing capability on supply chain resilience in circular economy. *Management Decision*, *57* (4), pp.863-885. https://doi.org/10.1108/MD-07-2018-0724
3. Fraser, K., Hvolby, H.-H. and Tseng, T.-L.(B.), 2015. Maintenance management models: a study of the published literature to identify empirical evidence: A greater practical focus is needed. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *32* (6), pp.635-664. https://doi.org/10.1108/IJQRM-11-2013-0185
4. Lindberg, C.F., Tan, S.T., Yan, J. and Starfelt, F., 2015. Key performance indicators improve industrial performance. *Energy Procedia*, 75, pp.1785-1790. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.474
5. Tavana, M., Sahebi, A. and Valaei, N., 2021. An integrated fuzzy framework for analyzing barriers to the implementation of continuous improvement in manufacturing. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *38*(1), pp.116-146. https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2020-0072
6. Chan, S.C.H., 2019. Participative leadership and job satisfaction: The mediating role of work engagement and the moderating role of fun experienced at work. *Leadership & Organization Development Journal*, *40*(3), pp.319-333. https://doi.org/10.1108/LODJ-06-2018-0215
7. Abzari, M. and Alam, R., 2013. Investigating factors affecting productivity in chemical companies [In Persian]. *Industrial Engineering and Management*, *29*(2), pp.53-62. https://sjie.journals.sharif.edu/article_5245.html
8. Shajar, M., Ghasemi, M. and Mohseni, A., 2024. Designing a Performance Evaluation Model in Macro Government Organizations (Case Study: Jam Petrochemical Company) [In Persian]. *Journal of System Management (JSM)*, *10*(1), pp.207-224. https://doi.org/10.30495/JSM.2023.1993183.1857
9. Onofrei, G., Prester, J., Fynes, B., Humphreys, P. and Wiengarten, F., 2019. The relationship between investments in lean practices and operational

performance: Exploring the moderating effects of operational intellectual capital. *International Journal of Operations & Production Management*, *39*(3), pp.406-428. https://doi.org/10.1108/IJOPM-04-2018-0201

10. Azizi, A., 2015. Evaluation improvement of production productivity performance using statistical process control, overall equipment efficiency, and autonomous maintenance. *Procedia Manufacturing*, *2*, pp.186-190. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.032

11. Zahraee, S.M., Rohani, J.M. and Wong, K.Y., 2018. Application of computer simulation experiment and response surface methodology for productivity improvement in a continuous production line: Case study. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, *30*(3), pp.207-217. https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.04.003

12. Muchiri, P. and Pintelon, L., 2008. Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, *46(*13), pp.3517-3535. https://doi.org/10.1080/00207540601142645

13. Garza-Reyes, J.A., 2018. Lean and green—a systematic review of the state of the art literature. *Journal of Cleaner Production*, *182*, pp.615-635. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.097

14. Arabioun, A., Abdi Jomayran, A., Bahadori Kosj Rad, Z. and Abolhasani, S.M., 2015. Investigation of key performance indicators in the product manufacturing process with an entrepreneurship approach [In Persian]. In: *International Conference on Management and Social Sciences*. Available at: https://sid.ir/paper/828291/fa

15. Emrouznejad, A. and Marra, M., 2017. The state of the art development of AHP (1979–2017): A literature review with a social network analysis. *International Journal of Production Research*, *55*(22), pp.6653-6675. https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1364976

16. Ayhan, M.B., 2013. A fuzzy AHP approach for supplier selection problem: A case study in a gear motor company. *International Journal of Production Research*, *51*(11), pp.3477-3494. https://doi.org/10.1080/00207543.2012.757183

17. Agrawal, N., 2022. Multi-criteria decision-making toward supplier selection: exploration of PROMETHEE II method. *Benchmarking: An International Journal*, *29*(7), pp.2122-2146. https://doi.org/10.1108/BIJ-02-2021-0071

18. Chang, T.-W., Pai, C.-J., Lo, H.-W. and Hu, S.-K., 2021. A hybrid decision-making model for sustainable supplier evaluation in electronics manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, *156*, 107283. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107283

19. Naji-Azarpoor, S. and Teimouri, E., 2018. Evaluation and selection of contractors in construction projects using supply chain management approach and PROMETHEE method [In Persian]. *Industrial Engineering and Management*, *34*(1.1), pp.29-37. doi: 10.24200/j65.2018.5545

20. Shawe, R., 2023. Budget and Organization Management. *Open Journal of Business and Management*, *11*, pp.910-919. https://doi.org/10.4236/ojbm.2023.113049

21. Smirnov, M.B. and Abdilova, G.B., 2021. Ways of improvement of technological equipment performance. *Theory and Practice of Meat Processing*, *6*(1), pp.87-96. https://doi.org/10.21323/2414-438X-2021-6-1-87-96

22. Oyefusi, F., 2022. Team and Group Dynamics in Organizations: Effect on Productivity and Performance. *Journal of Human Resource and Sustainability Studies*, *10*(1). https://doi.org/10.4236/jhrss.2022.101008

23. Alsakarneh, A., Shatnawi, H.A., Alhyasat, W.B.A.K., Zowid, F., Alrababah, R.A.M. and Eneizan, B., 2024. The effectiveness of human resource management practices on increasing organizational performance and the mediating effect of employee engagement. *Uncertain Supply Chain Management*, *12*(2), pp.1141-1154. https://doi.org/10.5267/j.uscm.2023.11.019

24. Amiri, M., Taghavi-Fard, M.T. and Eftekhari, H., 2020. Presenting a linear model for evaluating the performance of decision-making units with a data envelopment analysis and common weights approach: Case study of pharmaceutical companies listed on the Tehran Stock Exchange [In Persian]. *Industrial Engineering and Management*, *36*(1.2), pp.3-14. https://doi.org/10.24200/j65.2019.52190.1938

25. Parmenter, D., 2020. Key performance indicators: Developing, implementing, and using winning KPIs, *Journal of Business Performance Management*, *24*(2), pp.155-170. ISBN: 978-1-119-62077-8

26. Delgado, A. and Romero, I., 2016. Environmental conflict analysis using an integrated grey clustering and entropy-weight method: A case study of a mining project in Peru. *Environmental Modelling & Software*, *77*, pp.108-121. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.12.011

27. Yazdani, M., Zarate, P., Zavadskas, E.K. and Turskis, Z., 2019. A Combined Compromise Solution (CoCoSo) method for multi-criteria decision-making problems. *Management Decision*, *57*(9), pp.2501-2519. https://doi.org/10.1108/MD-05-2017-0458

28. Groover, M.P., 2019. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. 5th ed. Pearson. ISBN-13: 978-0132393218

29. Kalpakjian, S. and Schmid, S.R., 2020. *Manufacturing Engineering and Technology*. 8th ed. Pearson. ISBN-13: 978-1-292-42229-9

30. Shawe, R., 2023. Budget and Organization Management. *Open Journal of Business and Management*, *11*(3). https://doi.org/10.4236/ojbm.2023.113049

31. Gholamian, B. and Nili Pour Tabatabaei, S.A., 2020. Application of fuzzy AHP technique in identifying and ranking factors affecting equipment effectiveness (OEE) [In Persian]. In: *First National Conference on Optimization of Production and Service Systems*, Rudsar. Available at: https://civilica.com/doc/1163747

32. Sumanth, D.J., 1984. *Productivity engineering and management*. McGraw-Hill. ISBN: 9780070624269

33.Tangen, S., 2005. Demystifying productivity and performance. *International Journal of Productivity and Performance Management*, *54*(1), pp.34-46. https://doi.org/10.1108/17410400510571437

34. Marr, B., 2012. *Key Performance Indicators (KPI): The 75 measures every manager needs to know*. 1st ed. Financial Times Press. ISBN: 978-0273750116

35. Horváthová, J., Mokrišová, M. and Vrábliková, M., 2021. Benchmarking—A Way of Finding Risk Factors in Business Performance. *J. Risk Financial Manag.*, *14*(5), 221. https://doi.org/10.3390/jrfm14050221

36. Goldratt, E.M., 2012. *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. 30th ed. North River Press. ISBN-13: 978-0884271956

37. Dwivedi, P.P. and Sharma, D.K., 2022. Application of Shannon entropy and CoCoSo methods in selection of the most appropriate engineering sustainability components. *Cleaner Materials*, *5*, 100118. https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100118

38. Zhi-hong, Z., Yi, Y. and Jing-nan, S., 2006. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment. *Journal of Environmental Sciences*, *18*(5), pp.1020-1023. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(06)60032-6

39. Behzadian, M., Kazemzadeh, R.B., Albadvi, A. and Aghdasi, M., 2010. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200(1), pp.198-215. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.021

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

Sharif Industrial Engineering and Management Journal (2026), **41**(2), 167-177

Sharif University of Technology

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



Research Note

Evaluation Model for the Establishment of Industries in the Hinterland of Ports with AHP and VIKOR (Case Study of Shahid Rajaee Port)

Naser Shabakhty* and Hassan Asadzadeh

School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology.
* corresponding author: (shabakhty@iust.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received:29 October 2023

Revised:25 May 2024

Accepted:23 July 2024

Keywords:

Analytic hierarchy process (AHP),
vikor method,
heavy industries,
Hinterland,
shahid rajaee port.

Abstract

The topic of industrial location has lately gained significant global attention and importance in recent years. Evaluating the placement of heavy industries in a studied region involves considering criteria such as environmental factors, infrastructure, foundational impacts, and natural elements. Methods like the Analytic Hierarchy Process (AHP) and VIKOR within a Geographic Information System (GIS) environment can be used for this evaluation. In the present study, an initial and preliminary assessment of the placement of heavy industries in the hinterland of Shahid Rajaee's port has been conducted as a case study. By utilizing higher-level documents and studying the target region at each stage, including determining criteria based on the region, collecting data and information, and ultimately integrating this information and maps, we can be guided to the optimal location for industry placement. Therefore, the methodology will be practical and based on descriptive-analytical methods. Using the VIKOR method within a Geographic Information System (GIS) software environment, the potential locations in the hinterland of Shahid Rajaee's port have been divided into four hypothetical zones, numbered 1 to 4. The results of this research indicate that the most suitable areas for the establishment of heavy industries are those with access to main roads, flat terrain, prevailing wind direction, and distance from regional interferences as the determining criteria. The study highlights the importance of a systematic approach to industrial location, considering multiple factors to ensure the optimal placement of heavy industries. By integrating various data sources and using advanced analytical methods, the research provides a comprehensive framework for evaluating potential industrial sites. This approach not only helps in identifying the most suitable locations but also ensures that the environmental and infrastructural impacts are minimized, leading to sustainable industrial development in the region. Also, the results show that the eastern lands of the hinterland have a special priority due to their proximity to the road and the existing facilities for the establishment of heavy industries, and in the next stage, the western lands should be allocated for light and administrative-welfare industries due to the access to the road from the west side.

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:
Shabakhty, N. and Asadzadeh, H. 2026. Evaluation model for the establishment of industries in the Hinterland of ports with AHP and VIKOR (case study of shahid rajaee port), Sharif Industrial Engineering and Management Journal, **41**(2), pp.167-177. https://doi.org/10.24200/j65.2025.66084.2426

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

یادداشت فنی

مدل ارزیابی استقرار صنایع در پس‌کرانه‌ی بنادر به کمک AHP و VIKOR (مطالعه‌ی موردی: پس‌کرانه‌ی بندر شهیدرجایی)

ناصر شابختی* **و حسن اسدزاده**

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

*نویسنده مسئول (shabakhty@iust.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۶/۲۳

واژگان کلیدی:

پس‌کرانه،

صنایع سنگین،

بندر شهیدرجایی،

مدل ویکور (VIKOR)،

مدل سلسله مراتبی AHP.

چکیده

در سال‌های اخیر، انتخاب مکان بهینه برای استقرار صنایع سنگین، به‌ویژه در مناطق بندری، به یکی از دغدغه‌های اصلی برنامه‌ریزان توسعه‌ی پایدار تبدیل شده است. فشارهای زیست‌محیطی، لزوم بهره‌برداری مؤثر از زیرساخت‌ها، و ضرورت جلوگیری از ناهماهنگی‌های کاربری زمین، اهمیت موضوع اخیر را دوچندان کرده است. با توجه به معیارهایی از قبیل: عوامل زیست‌محیطی، زیرساخت، و آثار زیربنایی و عوامل طبیعی، می‌توان نحوه‌ی استقرار صنایع سنگین را ارزیابی کرد. در مطالعه‌ی حاضر، با استفاده از روش‌های AHP و ویکور در محیط GIS، استقرار صنایع سنگین در پس‌کرانه بندر رجایی بررسی شده است. با توجه به مطالعه‌های اسناد بالادستی و منطقه‌ی موردنظر، معیارها تعیین و داده‌ها جمع‌آوری شده‌اند. اطلاعات به‌دست‌آمده و نقشه‌های مذکور تلفیق شده‌اند تا مکان بهینه‌ی صنایع مشخص شود. روش کار توصیفی- تحلیلی و کاربردی بوده است. با توجه به روش ویکور، که محیط نرم‌افزار GIS مکان‌های قابل‌استقرار پس‌کرانه‌ی بندر شهیدرجایی را به چهار منطقه‌ی فرضی از ۱ تا ۴ بخش‌بندی کرده است، نتایج نشان می‌دهند که مناسب‌ترین مناطق برای استقرار صنایع سنگین، مکان‌هایی با دسترسی به جاده‌های اصلی، هموار‌بودن منطقه، جهت باد غالب، و دوربودن از مداخله‌های منطقه‌ای هستند. یافته‌ها نشان داده‌اند که رویکرد پیشنهادی موجب بهبود دقت تصمیم‌گیری مکانی، کاهش تداخل‌های کاربری، و انطباق بهتر با الزام‌های زیست‌محیطی در فرآیند مکان‌یابی شده است.

۱. مقدمه

ضرورت و اهمیت انتخاب مکان برای بنگاه صنعتی تا حدی است که در ادبیات حوزه‌ی اخیر، به‌عنوان یکی از عوامل تأثیرگذار در موفقیت اقتصادی بنگاه صنعتی به‌شمار می‌رود؛ زیرا مکان آن می‌تواند در رشد اشتغال بنگاه، خروج بنگاه از صنعت، سودآوری بنگاه، و رقابت آن تأثیر بگذارد. این موضوع برای شهرک‌های صنعتی اهمیتی دوچندان دارد؛ چون می‌تواند اهداف گروه‌های مختلف را برآورده سازد. از دیدگاه برنامه‌ریزان توسعه‌ی منطقه‌ای، شهرک‌های صنعتی منجر به اشتغال‌زایی، جلوگیری از مهاجرت افراد منطقه، متوازن‌ساختن سیاست‌های توسعه، حمایت از رشد سریع صنایع، جذب سرمایه‌های داخلی و خارجی، کاهش سرمایه‌گذاری اولیه برای ایجاد زیرساخت‌های تولیدی می‌شوند، و بهترین مکان برای انباشت سرمایه هستند.[۱]

رشد صنعت به‌طور مجتمع، منطقه، ناحیه، قطب، یا شهرک صنعتی پدیده‌ای است که از لحاظ اهمیت، از آغاز قرن بیستم میلادی در توسعه‌ی صنعت کشورهای جهان و استفاده از امکانات و قابلیت‌های هر منطقه به آن توجه شده است. هر کشوری که در راه صنعتی‌شدن گام بر می‌دارد، باید از لحاظ آمایش سرزمین و تقسیم نیروی کار در مناطق مختلف کشور با هدف توسعه‌ی صنعتی محورها و قطب‌ها، مکان‌هایی را برای تجمع واحدهای صنعتی به شکل شهرک یا مجتمع، انتخاب و سازماندهی کند؛ که متأثر از عواملی، مانند: رشد جمعیت، اشتغال، محدودیت زمین، حفاظت و توسعه‌ی محیط‌زیست، و تعیین کاربری زمین‌های صنعتی است. بدین ترتیب، از رشد بی‌رویه‌ی صنعت در برخی نواحی و مناطق، به‌ویژه از آلودگی محیط‌زیست جلوگیری می‌شود.[۲]

در پژوهش حاضر تلاش شده است با استفاده از چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره، به بررسی و تحلیل معیارهای مؤثر در استقرار صنایع سنگین در منطقه‌ی موردمطالعه پرداخته شود و درنهایت، با تلفیق روش‌های AHP[1] و ویکور[2]، مکان بهینه برای توسعه‌ی صنعتی در قالب سناریوهای مختلف شناسایی و ارزیابی شود.

[1] Analytic Hierarchy Process

[2] VIKOR (Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje)

استناد به این مقاله:

شابختی، ناصر و اسدزاده، حسن، ۱۴۰۴. مدل ارزیابی استقرار صنایع در پس‌کرانه‌ی بنادر به کمک AHP و VIKOR(مطالعه‌ی موردی: پس‌کرانه‌ی بندر شهیدرجایی). مهندسی صنایع و مدیریت شریف ، ۴۱(۲)، صص.۱۶۷-۱۷۷. https://doi.org/10.24200/j65.2025.66084.2426

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۵X

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

۲. پیشینه‌ی نظری پژوهش

در ادامه، به مطالعات انجام‌شده در زمینه‌ی مکان‌یابی صنایع پرداخته شده است. محموده[1] و همکاران (۲۰۲۴)،[۳] در پژوهشی در رابطه با توسعه‌ی یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاری برای انتخاب محل نیروگاه هسته‌ای با استفاده از روش‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و ویکور با تمرکز بر عوامل اجتماعی-اقتصادی فرض کرده‌اند که انتخاب محل مناسب برای نیروگاه هسته‌ای در اندونزی برای راه‌حل‌های انرژی پایدار، حیاتی است. سپس ۱۰ معیار اجتماعی-اقتصادی، شامل: شبکه‌ی انتقال، هزینه‌های عملیاتی، تأثیر اقتصادی، امنیت، شبکه‌ی حمل‌ونقل، ملاحظات قانونی، تأثیر در گردشگری، مالکیت زمین، سایت‌های تاریخی، و پذیرش عمومی ارزیابی و بررسی شده‌اند. در پژوهش اخیر، از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (Fuzzy-AHP) برای اولویت‌بندی معیارهای اخیر و روش ویکور فازی برای ارزیابی دو محل احتمالی: کالیمانتان[2] شرقی و کالیمانتان غربی استفاده شده است. محاسبات با استفاده از نرم‌افزارهای ماکروسافت اکسل[3] و اکسپرت چویز[4] انجام و نتیجه گرفته شده است که امنیت، شبکه‌ی انتقال، و شبکه‌ی حمل‌ونقل از اولویت‌های اصلی هستند. روش ویکور فازی، کالیمانتان غربی را به‌عنوان محل بهینه برای ساخت نیروگاه هسته‌ای شناسایی کرده است.[۳]

کارجی[5] و همکاران (۲۰۲۴)،[۴] نیز در رابطه با انتخاب فناوری انرژی‌های تجدیدپذیر برای ساختمان‌های هتل با یک رویکرد هدفمند براساس روش‌های AHP و ویکور، در مطالعه‌یی به ارزیابی فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر (RETs)[6] برای ساختمان‌های هتل پرداخته و بر معیارهایی، مانند: هزینه‌ی اولیه‌ی سرمایه‌گذاری، ظرفیت تولید انرژی، و آثار زیست‌محیطی تمرکز داشته‌اند. در پژوهش اخیر، از روش‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و ویکور برای ارزیابی و رتبه‌بندی ۸ فناوری انرژی تجدیدپذیر، از جمله پنل‌های فتوولتائیک و پمپ‌های حرارتی استفاده شده است. همچنین، با استفاده از مصاحبه‌های کارشناسی، بررسی‌های ادبیات، و مطالعه‌ی معیارهای کلیدی شناسایی‌شده و روش‌های اخیر برای تعیین مناسب‌ترین فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر دریافته‌اند که پنل‌های فتوولتائیک به‌دلیل تعادل بین هزینه، کارایی، و پایداری، بهترین انتخاب هستند. این رویکرد جامع به ذی‌نفعان کمک می‌کند تا تصمیم‌های آگاهانه‌ای برای دستیابی به اهداف انرژی صفر خالص در ساختمان‌های هتل بگیرند.[۴]

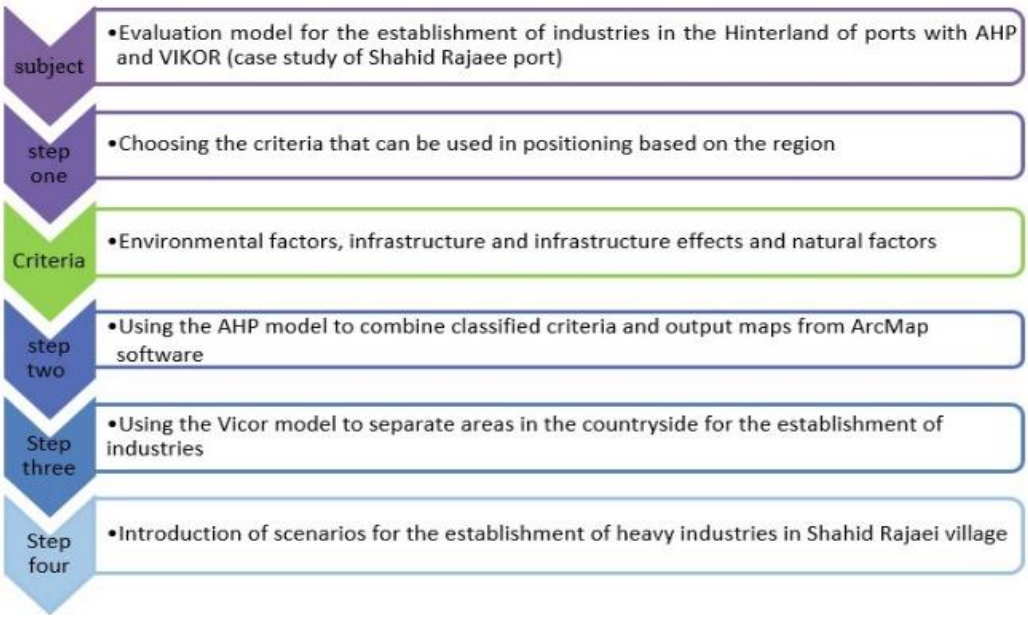
گلتوم[7] و همکاران (۲۰۲۴)،[۵] نیز در رابطه با ادغام روش‌های AHP و ویکور برای انتخاب مسیر بهینه‌ی مقصد، مطالعه و فرض کرده‌اند که ادغام روش‌های AHP (فرآیند تحلیل سلسله مراتبی) و ویکور (رتبه‌بندی مصالحه‌ای چندمعیاری) می‌تواند به‌طورمؤثر، مشکل ایجاد مسیرهای بهینه به جاذبه‌های گردشگری تاریخی در شهر مدان[8] را حل کند. معیارهای ارزیابی، شامل: دسترسی، امکانات، و جاذبه‌ها بوده‌اند. در پژوهش اخیر از پرسش‌نامه‌های مقایسه‌ی زوجی AHP براساس ارزیابی‌های کارشناسان و نیز از نرم‌افزار آرکمپ[9] برای پردازش داده‌ها و همچنین از فایل‌های شکلی شهر مدان و داده‌های آماری مربوط به تعداد بازدیدکنندگان و امکانات جاذبه‌ها استفاده شده است. ادغام روش‌های AHP و ویکور به همراه تحلیل شبکه‌ای، در تعیین انتخاب مسیر بهینه برای گردشگری تاریخی در شهر مدان مؤثر بوده است. در مطالعه‌ی مذکور نتیجه گرفته شده است که راهبرد به‌روزشده، هم عملی و هم واقع‌بینانه، برای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل مؤثر است.[۵]

یوزیچویچ[10] و همکارانش (۲۰۲۱)،[۶] پژوهشی در رابطه با مکان‌یابی بندر خشک برای بندر ریجکا[11] ، که یکی از مهم‌ترین مسیرهای حمل‌ونقل راهبردی اتحادیه‌ی اروپا TEN-T (راه‌های ترانزیتی مدیترانه و بالتیک[12] - آدریاتیک[13]) در کرواسی است؛ با استفاده از روش AHP انجام داده و فرض کرده‌اند که ایجاد یک بندر خشک برای بندر ریجکا، ازدحام را کاهش می‌دهد و نیازهای فزاینده‌ی بار را برآورده می‌سازد. معیارهایی برای ارزیابی فرضیه‌ی اخیر، شامل: عوامل فنی، فناوری، سازمانی، زیست‌محیطی، اطلاعات و ارتباطات (IT)[14]، اقتصادی، حقوقی، و نظارتی و عوامل خاص در نظر گرفته است. در پژوهش ذکرشده از روش AHP (فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی) و نیز از ابزار نرم‌افزاری اکسپرت چویز برای تحلیل و رتبه‌بندی مکان‌های بالقوه‌ی بندر خشک براساس معیارهای تعریف‌شده استفاده شده است. همچنین، ارزیابی برای سه گروه از مکان‌های بندر خشک احتمالی فاصله‌های نزدیک، متوسط، و دور صورت گرفته و مکان‌های بهینه‌ی بندر خشک برای بندر ریجکا به‌عنوان میکلاولیه[15]، ولیکا گوریتسا[16]، و وینکووتسی[17] به ترتیب فاصله‌های نزدیک، متوسط، و دور شناسایی شده‌اند، که ظرفیت و کارایی بندر را افزایش می‌دهند و به توسعه‌ی منطقه‌ای و ادغام در شبکه‌ی حمل‌ونقل اتحادیه‌ی اروپا کمک می‌کنند.[۶]

ژنگ[18] و همکاران (۲۰۱۱)،[۲] بر روی موضوع بهینه‌سازی مکان‌های بندرهای خشک برای منطقه‌ی اقتصادی غربی کشور تایوان با استفاده از سیستم‌های مکان‌یابی جغرافیایی (GIS) بر مبنای حمل‌ونقل داخلی مرسوم و براساس پیوندهای متعدد از طریق جاده و فقط تعداد محدودی از طریق راه‌آهن مطالعه کرده‌اند. حمل‌ونقل ریلی به‌طورکلی محدود به خدمات‌رسانی به مناطق شهری بزرگ در فواصل نسبتاً طولانی از بندر است؛ و مفهوم بندر خشک مبتنی بر یک بندر دریایی است، که مستقیماً از طریق راه‌آهن به بنادر خشک داخلی متصل می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده، آثار افزایش ظرفیت ریل را نشان داده است؛ که با افزایش آن، کانتینرهای حمل‌شده توسط ریل افزایش یافته و باعث کاهش کل هزینه‌ی حمل‌ونقل شده است. به‌علاوه در پژوهش اخیر مشاهده شده است که با اضافه‌کردن بندر خشک و یا زیادکردن تعداد مسیرهای ریلی، هزینه‌ی حمل‌ونقل کاهش یافته است.[۲]

رحیمی و برنا (۲۰۱۷)،[۷] پژوهشی بر روی استقرار صنایع سنگین در بندرهای ماهشهر و امام خمینی (ره) با هدف مکان‌یابی صنایع سنگین در بندرهای مذکور با توجه به عوامل مختلفی، از قبیل: محیطی، طبیعی، و زیربنایی انجام داده‌اند. روش پژوهش اخیر بر مبنای کاربردی و براساس ماهیت توصیفی-

[1] Mahmudah
[2] Kalimantan
[3] Microsoft Excel
[4] Expert Choice
[5] Kargi
[6] Renewable energy technologies
[7] Parapat Gultom
[8] Medan
[9] ARCMAP
[10] Josip Božičević
[11] Rijeka
[12] Baltic
[13] Adriatic
[14] Information Technology
[15] Miklavlje
[16] Velika Gorica
[17] Vinkovci
[18] Qingcheng ZENG



شکل ۱. مراحل کلی پژوهش.

تحلیلی بوده و به‌منظور دستیابی به تعیین مکان مناسب و درجه‌بندی اولویت، از ماتریس مقایسه‌های زوجی در AHP استفاده شده است. بندرهای ماهشهر و امام خمینی به ۴ محدوده‌ی ضعیف، متوسط، خوب، و عالی تقسیم‌بندی شده و نتایج نشان داده‌اند که نواحی شمالی و مرکزی از محدوده‌های ضعیف و متوسط و قسمتی از ناحیه‌ی مرکزی و جنوب محدوده‌ی مذکور در ناحیه‌های خوب و عالی قرار گرفته‌اند.[۷]

احدنژاد و همکاران (۲۰۱۴)،[۸] نیز پژوهشی در مورد مکان استقرار صنایع در اراضی بخش مرکزی منطقه‌ی آزاد ارس با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری سلسله‌مراتبی (AHP) (توسط نرم‌افزار اکسپرت چویز)، روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (ویکور) (توسط نرم‌افزار اکسل)، و مکان صنایع (توسط نرم‌افزار آرکمپ) انجام داده‌اند. در پژوهش اخیر، زیرمعیارهای صورت‌گرفته، شامل: مناطق حفاظت شده، گسل (اصلی یا فرعی)، فاصله از جاده (اصلی)، فاصله از خطوط انتقال گاز، فاصله از خطوط برق فشار قوی، فاصله از مراکز جمعیتی، فاصله از خطوط ریل، فاصله از سد، فاصله از مسیل و آبراهه‌ها، کاربری اراضی، فرسایش، و شیب بوده‌اند. بعد از مدل‌سازی زیرمعیارها نتایج پژوهش ذکرشده نشان داده است که اراضی بخش مرکزی منطقه‌ی آزاد ارس، بالاترین قابلیت و اراضی بخش مرکزی، کمترین قابلیت برای استقرار صنایع را دارند. همچنین از آنجایی که تمامی پهنه‌ها برای استقرار صنایع از نظر مساحت، ارزش یکسانی نداشته‌اند، اقدام به جداسازی اراضی بالای ۲۰۰ هکتار شده است. برای اولویت‌بندی پهنه‌های بالای ۲۰۰ هکتار از مدل ویکور استفاده شده و نتایج نشان داده است که ۵ پهنه، مساحتی بیشتر از ۲۰۰ هکتار داشته‌اند و در ادامه، با استفاده از ۸ معیار، که در مکان‌یابی استقرار صنایع می‌توانند ضروری باشند، اقدام به اولویت‌بندی پهنه‌های مذکور شده است.[۸]

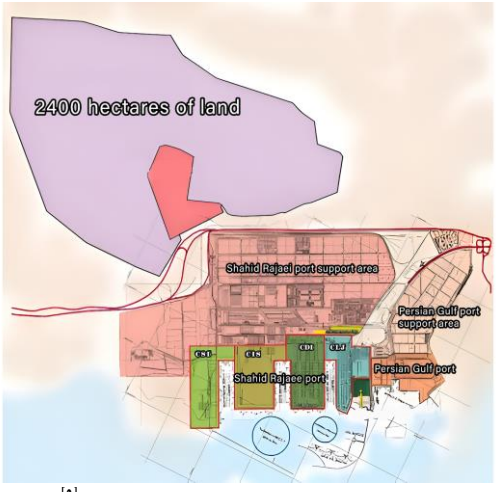
۳. روش پژوهش

در مطالعه‌ی حاضر، با رویکرد اسنادی و نرم‌افزاری از مواد و داده‌های ذکرشده برای تولید معیارهای موردنیاز در پژوهش استفاده شده است. به‌علاوه انتخاب روش‌های AHP و VIKOR با توجه به مطالعات پیشین، الگوگیری از مطالعات مشابه در حوزه‌ی مکان‌یابی صنعتی، و همچنین تناسب ساختار روش‌های مذکور با ماهیت پروژه صورت گرفته است. AHP به‌منظور استخراج وزن نسبی معیارها و VIKOR برای رتبه‌بندی گزینه‌های مکانی و انتخاب راه‌حل مصالحه‌ای استفاده شده‌اند. در پژوهش حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ی لندست به تهیه‌ی نقشه‌ی اراضی ۲۴۰۰ هکتاری بندر شهیدرجایی پرداخته شده است. سپس با استفاده از سایت earthexplorer.usgs.gov، نقشه‌ی ارتفاعات منطقه (DEM)[19] تهیه و سپس نقشه‌ی شیب منطقه در محیط نرم‌افزار GIS تولید شده است. در پژوهش حاضر به‌منظور دستیابی به هدف تعیین مکان مناسب و درجه‌بندی اولویت آن‌ها، ماتریس مقایسه‌های زوجی در AHP تشکیل شده است. معیارهایی که برای مکان‌یابی صنایع سنگین در پس‌کرانه‌ی شهیدرجایی در نظر گرفته شده است، عبارت از عوامل زیست‌محیطی، زیرساخت، آثار زیربنایی، و عوامل طبیعی هستند. زیرمعیارهای عوامل طبیعی، شامل: جهت باد، شیب، و ارتفاع هستند. زیرمعیارهای زیرساخت و آثار زیربنایی شامل: دسترسی به انرژی (دسترسی به نفت، دسترسی به گاز، دسترسی به برق، و دسترسی به آب) و دسترسی به راه‌ها بوده است. در انتها، زیرمعیار عوامل زیست‌محیطی عبارت از کاربری اراضی و پوشش گیاهی بوده‌اند. همه‌ی معیارهای اخیر طوری تنظیم شده‌اند که ارجحیت در گزینه‌ها نسبت به معیارها در اولویت بوده و از طریق نرم‌افزار اکسپرت چویز انجام شده است. سپس با استفاده از روش ویکور و تلفیق نتایج روش‌های ذکرشده و واردکردن در محیط نرم‌افزار GIS، نقشه‌ی مکان صنایع سنگین در پس‌کرانه‌ی شهیدرجایی به‌دست آمده است (در شکل ۱، مراحل کلی پژوهش ملاحظه می‌شود).

۴. محدوده‌ی موردمطالعه‌ی فرضی

برای مطالعه‌ی موردی از پس‌کرانه‌ی مجتمع بندری شهیدرجایی بندرعباس، که از مهم‌ترین بنادر ایران به شمار می‌رود، استفاده شده است. بندر شهیدرجایی در فاصله‌ی ۲۳ کیلومتری غرب بندرعباس مرکز استان هرمزگان واقع شده است و با بیش از ۲۴۰۰ هکتار وسعت (محدوده‌ی عملیاتی و پس‌کرانه)، ظرفیت پذیرش سالانه بیش از ۸۸ میلیون تن کالا را دارد. در آخرین

[19] Digital Elevation Model



شکل ۲. پلان منطقه‌ی موردمطالعه‌ی فرضی.[۹]

رتبه‌بندی برترین بنادر جهان، که در سپتامبر ۲۰۱۳ منتشر شده است، بندر شهیدرجایی در رتبه‌ی ۵۹ جهان قرار گرفته است (پلان فرضی آن در شکل ۲ مشاهده می‌شود).[۹]

۵. روش کار

۱.۵. فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP

روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) توسط ساعتی (۱۹۸۰)، [۱۰] معرفی شده است. روش AHP، روشی توانمند و منعطف در دسته‌ی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است، که به‌وسیله‌ی آن می‌توان مسائل پیچیده را در سطوح مختلف حل کرد. به این دلیل به آن مدل سلسله‌مراتب گفته می‌شود که به‌صورت یک مدل درختی و مراتب‌وار است. روش AHP هر دو ارزیابی عینی و ذهنی را در یک ساختار یکپارچه بر مبنای مقیاس‌هایی با زوج مقایسه، ترکیب و به تحلیل‌گران کمک می‌کند تا جوانب اساسی یک مسئله را در یک قالب سلسله‌مراتبی سازماندهی کنند. از جمله مزایای روش AHP، می‌توان به موارد: سنجش سازگاری قضاوت‌های تصمیم‌گیرندگان، ایجاد مقایسه‌های زوجی در انتخاب راهکار و گزینه‌ی بهینه، توان درنظرگرفتن معیارها و زیرمعیارها در ارزیابی گزینه‌ها، ایجاد قابلیت دستیابی به بهترین گزینه از طریق مقایسه‌های زوجی اشاره کرد.[۱۰] در روش AHP، مسئله‌ی تصمیم‌گیری به سطوح مختلف هدف، معیارها، زیرمعیارها، و گزینه‌ها تقسیم می‌شود. در فرایند اخیر، گزینه‌های مختلفی در تصمیم‌گیری دخالت داده می‌شوند و امکان تحلیل حساسیت روی معیارها و زیرمعیارها وجود دارد. تحلیل حساسیت به این معناست که با تغییر وزن معیارها در رتبه‌ی گزینه‌ها چه تغییری ایجاد می‌شود. از مزایای دیگر روش AHP، تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی تعیین میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم است. فرایند AHP با تجزیه‌وتحلیل مسائل پیچیده، آن‌ها را به شکل ساده تبدیل می‌کند. ارزیابی اهمیت نسبی معیارهای تصمیم‌گیری و مقایسه‌ی گزینه‌های تصمیم‌گیری با توجه به هر معیار با مقایسه‌های زوجی انجام می‌شود، که شامل ایجاد یک ماتریس مقایسه در هر سطح از سلسله‌مراتب، با شروع از سطح دوم و پایین‌آمدن آن، محاسبه‌ی وزن‌های نسبی برای هر عنصر سلسله‌مراتب، و در آخر تخمین نرخ سازگاری برای بررسی سازگاری داوری بوده است.[۱۱]

۲.۵. تشکیل ماتریس مقایسه‌های زوجی

در این مرحله عناصر هر سطح نسبت به سایر عناصر مرتبط با خود در سطح بالاتر به‌صورت زوجی مقایسه و ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی تشکیل

جدول ۱. مقادیر ضریب اهمیت برای مقایسه‌های زوجی.[۱۲]

Preferences	Numerical value
Absolutely more important or absolutely desirable	9
Very strong importance or desirability	7
Strong importance or desirability	5
A little more important or a little more desirable	3
Same utility	1
Preferences between the above intervals	2,4,6,8

می‌شوند. جهت تعیین اهمیت و ترجیح در مقایسه‌های زوجی از طیف ۱ تا ۹ ساعتی، ارائه‌شده در جدول ۱، استفاده شده است.[۱۲]

۳.۵. عوامل مؤثر در مکان‌یابی صنایع سنگین

با توجه به موضوع پژوهش حاضر، در بخش کنونی به معرفی معیارهای در نظرگرفته‌شده برای استقرار صنایع سنگین پرداخته شده است. معیارهای مؤثر در مکان‌یابی صنایع سنگین در پژوهش حاضر، ابتدا از طریق مرور نظام‌مند ادبیات موضوع، تحلیل اسناد بالادستی منطقه‌ی بندر شهیدرجایی و مصاحبه با ۱۰ کارشناس خبره در حوزه‌ی سواحل، صنایع، و محیط‌زیست شناسایی شده‌اند. در مرحله‌ی نخست، سه معیار اصلی، شامل: عوامل طبیعی، عوامل زیربنایی، و عوامل محیط‌زیستی به‌عنوان چارچوب اولیه انتخاب شده‌اند. سپس با تلفیق نتایج حاصل از بررسی منابع پیشین، تحلیل شرایط زیرساختی منطقه، شناخت محلی، و بازدیدهای میدانی، سه معیار مذکور به ۱۰ زیرمعیار تفکیک شده‌اند. فرآیند حاضر با استفاده از اجماع میان متخصصان انجام شده است، تا ابعاد مختلف تصمیم‌گیری به شکل جامع‌تری پوشش داده شود. درنهایت، به‌منظور حفظ سادگی ساختار سلسله‌مراتبی و جلوگیری از ابهام در وزن‌دهی، فقط زیرمعیارهای نهایی اخیر در مدل AHP لحاظ شده‌اند. سپس اطلاعات موردنیاز تهیه و با استفاده از توانمندی‌های روش GIS به لایه‌های اطلاعاتی موردنیاز تبدیل و درنهایت، آثار متقابل هر کدام از معیارها در مکان‌یابی صنایع سنگین ارزیابی شده‌اند. در جدول ۲، معیارها به ریزمعیار ارائه شده‌اند.[۱۴]

۴.۵. تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها

با توجه به امتیازدهی خبرگان که عددی از ۱ تا ۹ را با توجه به سؤال‌های طرح‌شده انتخاب کرده‌اند، به مقایسه‌ی بین سه شاخص اصلی پرداخته شده است. نتایج مربوط به خروجی نرم‌افزار اکسپرت چویز و ماتریس مقایسه‌های زوجی معیارهای اصلی در جدول ۳ ارائه شده‌اند، که طبق آن، نرخ ناسازگاری ۰/۰۴ به‌دست آمده است.[۱۴]

اعداد داخل جدول ۳، نشانگر اولویت شاخص سطر نسبت به شاخص ستون مرتبط است. به‌علاوه، اعداد به رنگ قرمز، وضعیت معکوس، یعنی اولویت ستون نسبت به سطر را نشان می‌دهند. در شکل ۳، رتبه‌بندی و ارزش وزنی تعیین‌شده‌ی شاخص‌ها مشاهده می‌شود.

در شکل ۴ و جدول ۴، رتبه بندی و ارزش وزنی تمامی زیرمعیارها ملاحظه می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، مشخص می‌شود که ارتفاع، بیشترین ارزش و دسترسی به جاده‌ی فرعی (جاده‌ی خاکی)، کمترین ارزش را داشته‌اند. این

جدول ۲. معیارهای پژوهش حاضر برای استقرار صنایع سنگین.[۱۴]

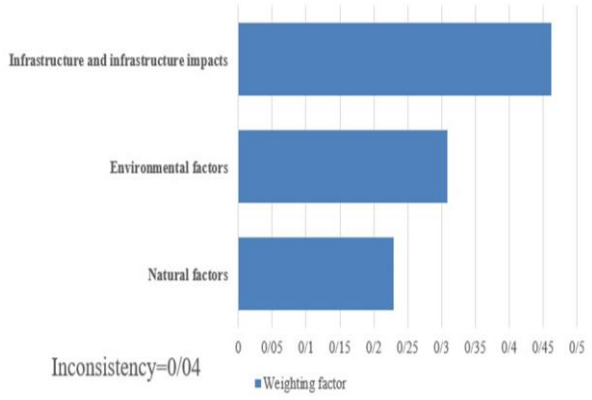
Sub-criteria		Criteria	Objective
land use and vegetation		**Environmental factors**	Optimal location for heavy industries in Shahid Rajaee Port hinterland
access to oil	access to energy	Infrastructure And Infrastructure Impacts	
access to gas			
access to electricity			
access to water			
Distance from main roads	access to roads		
Distance from side roads			
Wind direction		Natural factors	
Height			
Slope			

جدول ۳. مقایسه‌های زوجی معیارهای اصلی (خروجی نرم‌افزار EC2000).[۱۴]

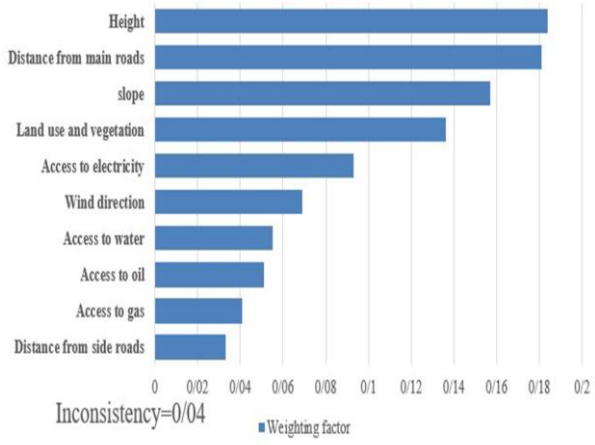
	Infrastructure And Infrastructure Impacts	Environmental factors	Natural factors
Infrastructure And Infrastructure Impacts		1.64341	1.82901
Environmental factors			1.65047
Natural factors	Icon:0.01		

جدول ۴. رتبه‌بندی و ارزش وزنی شاخص تمامی زیرمعیارها.[۱۴]

Number	Sub-Criterion	Weighted Value	Rank	Nember	Sub-Criterion	Weighted Value	Rank
1	Height	0.184	1	6	Wind direction	0.069	6
2	Distance from main	0.181	2	7	Access to water	0.055	7
3	Slope	0.157	3	8	Access to oil	0.051	8
4	land use and vegetation	0.136	4	9	Access to gas	0.041	9
5	access to electricity	0.093	5	10	Distance from side roads	0.033	10



شکل ۳. رتبه‌بندی و ارزش وزنی شاخص اصلی (خروجی نرم‌افزار EC2000).[۱۴]

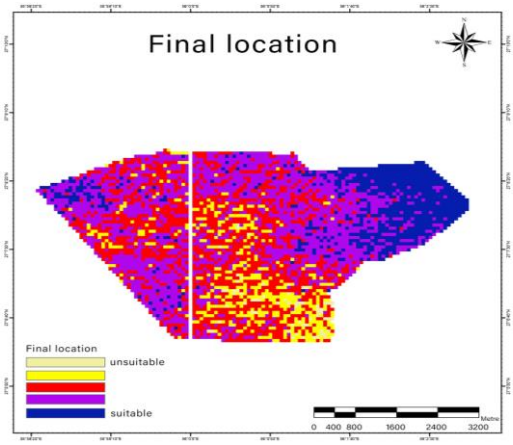


شکل ۴. رتبه‌بندی و ارزش وزنی تمامی زیرمعیارها (خروجی نرم‌افزار EC2000) [۱۴]

تذکر لازم است که نرخ سازگاری در این حالت، مساوی ۰/۰۴ از ارزیابی نتایج حاصل شده است.

بنابراین، شاخص‌ها به ترتیب اولویت (اهمیت) مطابق جدول ۴ هستند.

در شکل ۵، با استفاده از روش AHP در محیط نرم‌افزار GIS، به تحلیل و بررسی مکان‌های مناسب برای استقرار صنایع سنگین در پس‌کرانه‌ی بندر شهیدرجایی پرداخته شده است. براساس خروجی نرم‌افزار GIS، مناطق مناسب برای استقرار صنایع سنگین به رنگ تیره و مناطق نامناسب به رنگ روشن مشاهده می‌شوند. مطابق شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که منطقه‌های شرقی و شمال شرقی پس‌کرانه، بهترین مکان برای استقرار صنایع سنگین هستند؛ در حالی که مناطق جنوبی پس‌کرانه، نامناسب‌ترین منطقه برای استقرار صنایع سنگین در پس‌کرانه‌ی ۲۴۰۰ هکتاری شهید رجایی محسوب می‌شوند.[۱۴]



شکل ۵. نقشه‌ی صنایع سنگین مکان‌یابی فرضی به‌دست‌آمده به روش AHP[۱۴].

گام ۹) تعیین وزن نسبی معیار (مطابق رابطه‌ی ۲۱).

۵. ۵. مدل ویکور

واژه‌ی ویکور (VIKOR) از حروف اختصاری عبارت صربستانی Vlse Kriterijumsk Optimizacija Kompromisno Resenje گرفته شده است؛ که پس از گسترش کاربرد روش تاپسیس[۲۰] توسط اپریکویک[۲۱] (۱۹۸۴)،[۱۳] برای حل مشکلات تاپسیس ارائه شده است. ویکور، روشی مبتنی بر ماتریس تصمیم برای انتخاب گزینه‌ی بهینه براساس تعدادی معیار است؛ به همین دلیل مقایسه‌ی روش ویکور و تاپسیس همیشه موردتوجه پژوهشگران بوده است. اپریکویک پس از مطرح‌شدن منطق فازی، روش ویکور فازی را ارائه کرده و در سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷ آن را توسعه داده است. روش اخیر مبتنی بر برنامه‌ریزی توافقی مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره است و مسائلی با معیارهای نامتناسب و ناسازگار را ارزیابی می‌کند.[۱۳]

در روش ویکور، ابتدا بهترین (f_i^*) و بدترین (f_i^-) مقدار هر معیار تعیین می‌شود. سپس برای هر گزینه‌ی j ، شاخص‌های فاصله‌ی تجمعی و بیشینه به‌ترتیب مطابق روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند:[۱۳]

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} W_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \quad (1)$$

$$R_j = \max\left\{ W_i \frac{f_i^* - f_{ij}}{f_i^* - f_i^-} \right\} \quad (2)$$

سپس شاخص ترکیبی Q_i طبق رابطه‌ی ۳ به‌دست می‌آید:[۱۳]

$$Q_i = v\left[\frac{S_j - S^-}{S^* - S^-}\right] + (1-v)\left[\frac{R_i - R^-}{R^* - R^-}\right] \quad (3)$$

که در آن‌ها، W_i وزن معیار (استخراج‌شده از AHP)، f_{ij} عملکرد گزینه‌ی j در معیار i، و v پارامتر راهبردی تصمیم‌گیرنده (در مطالعه‌ی حاضر $v = ۰/۵$) هستند. رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها براساس مقادیر Q_i و قواعد انتخاب راه‌حل مصالحه انجام شده است.[۱۳]

۵.۶. ماتریس تصمیم‌گیری

در گام نخست، ماتریس تصمیم‌گیری[۲۲] براساس داده‌های حاصل از نظرهای خبرگان و مقایسه‌های انجام‌شده بین گزینه‌ها (مثلاً پنج عامل کلیدی پژوهش) تشکیل شده است، که ساختار آن مطابق جدول ۵ است.

۵. ۷. محاسبه‌ی شاخص ویکور (Q) و رتبه‌بندی گزینه‌ها

در بخش حاضر، مقادیر قطعی S ،R ، و Q به‌دست آمده‌اند. در جدول ۶، مقادیر به‌دست‌آمده از روابط و رتبه‌ی گزینه‌ها ارائه شده است..

۵. ۸. انتخاب بهترین گزینه

در مرحله‌ی کنونی با توجه به مقادیر S، R، و Q مربوط به گزینه‌ها، که به‌صورت نزولی مرتب شده‌اند، تصمیم گرفته می‌شود. برای تصمیم‌گیری دو شرط بررسی و براساس آن‌ها، سه حالت به‌وجود می‌آید، که براساس آن‌ها تصمیم گرفته می‌شود.

الف) شرط اول: شرط مزیت قابل‌قبول

طبق رابطه‌ی ۴، شرط یک بررسی شده و این نتیجه به‌دست آمده است.

جدول ۵. ماتریس تصمیم‌گیری.

	Region 4	Region 3	Region 2	Region 1
land use and vegetation	1.64	3.48	5.48	7.56
access to oil	1.39	3.95	5.73	7.75
access to gas	1.92	3.66	5.67	7.01
access to electricity	2.09	3.68	6.64	8.49
access to water	2.12	4.11	6.44	8.22
Distance from main roads	2.48	4.63	7.36	8.71
Distance from side roads	1.80	3.70	5.83	7.32
Wind direction	2.10	4.06	5.47	7.80
Slope	1.54	3.90	5.78	7.69
Height	1.60	3.93	6.05	7.95

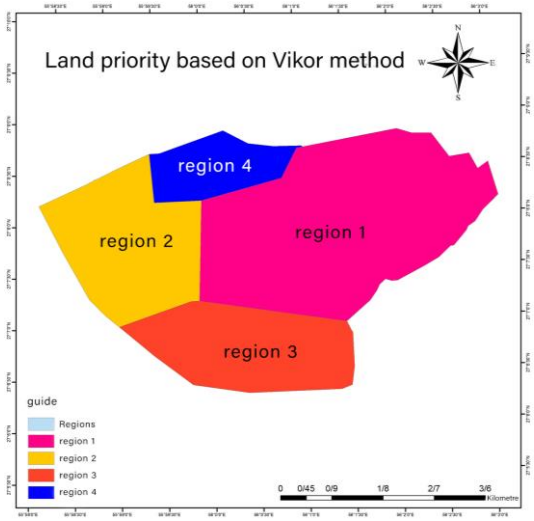
[20] **TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)**

[21] Opricovic

[22] Decision Matrix

جدول ۶. مقادیر قطعی R، S ، و Q.[۱۴]

Region	R	Rank R	S	Rank S	Q	Rank Q	Final status
Region 1	0.121	3	0.231	1	0.187	2	The most suitable area
Region 2	0.0846	1	0.3	2	0.128	1	Suitable
Region 3	0.118	2	0.423	3	0.53	3	Needs further investigation.
Region 4	0.181	4	0.503	4	1	4	Inappropriate



شکل ۶. خروجی روش ویکور در تعیین قرارگیری صنایع سنگین.[۱۴]

$$Q(A_2)-Q(A_1)=0.059 \qquad \frac{1}{n-1}=\frac{1}{3}=0.33 \qquad (4)$$

شرط یک برقرار نیست. پس‌شرط دوم مطابق رابطه‌ی ۵ بررسی می‌شود.

در بخش کنونی، براساس رابطه‌ی ۵، اولویت گزینه‌ها بررسی شده است.

$$\frac{1}{n-1}+Q(A_1)=0/461 \qquad Q(A_m)=0/461 \qquad (5)$$

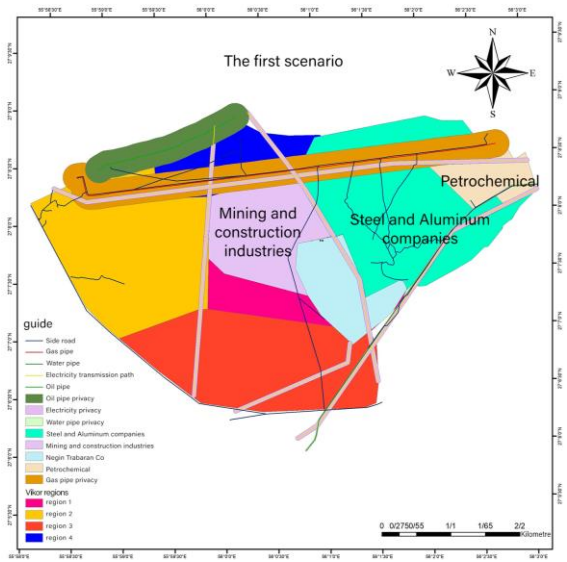
با توجه به جدول ۶ و مقدار به‌دست‌آمده از رابطه‌ی ۵، شرط دوم بررسی شده است، که طبق نتایج به‌دست‌آمده، دو منطقه‌ی مناسب فرضی (منطقه‌های ۲ و ۱: به ترتیب شرق و غرب پس‌کرانه) برای استقرار صنایع سنگین وجود دارند. در شکل ۶، خروجی نتایج روش ویکور در محیط نرم‌افزار GIS مشاهده می‌شود.[۱۴]

۶. سناریوهای استقرار صنایع سنگین در پس‌کرانه‌ی بندر شهید رجایی با GIS

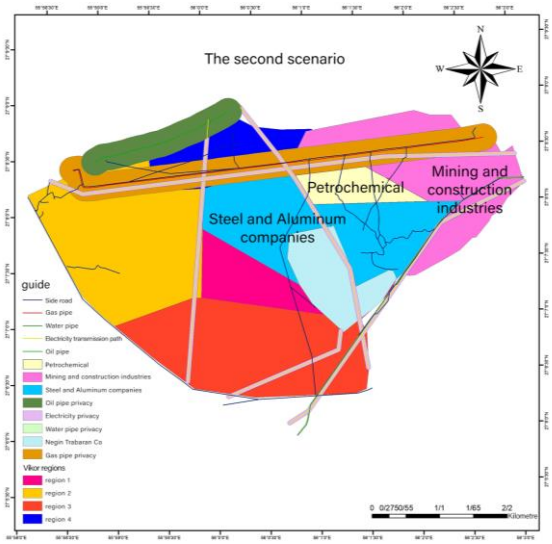
در بخش حاضر، با توجه به موارد ارزیابی‌شده، سناریوهایی برای استقرار صنایع سنگین در پس‌کرانه‌ی بندر شهیدرجایی با استفاده از نرم‌افزار آرکمپ بیان شده‌اند.

۶. ۱. سناریوی اول

در سناریوی اول، مطابق شکل ۷ مشاهده می‌شود که صنعت پتروشیمی در شمال شرق پس‌کرانه، سپس صنعت فولاد و آلومینیوم در کنار صنعت پتروشیمی در شرق پس‌کرانه، و بعد از آن صنایع معدنی و ساختمانی در مرکز پس‌کرانه قرار گرفته‌اند.



شکل ۷. سناریوی اول استقرار صنایع سنگین در اراضی ۲۴۰۰ هکتاری بندر شهیدرجایی.



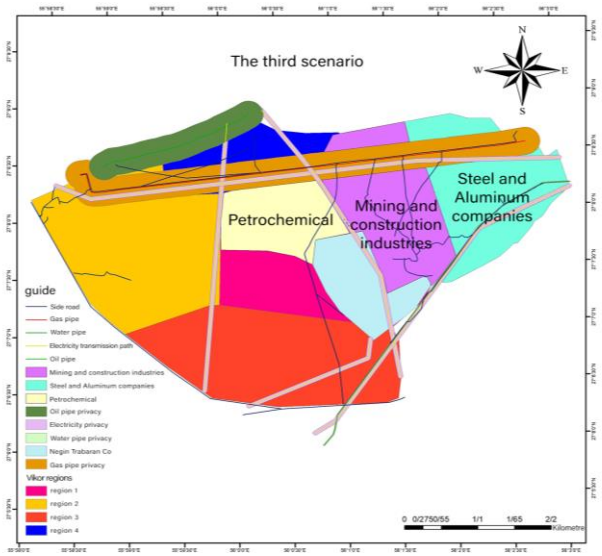
شکل ۸. سناریوی دوم استقرار صنایع سنگین در اراضی ۲۴۰۰ هکتاری بندر شهیدرجایی.

۶. ۲. سناریوی دوم

در سناریوی دوم، مطابق شکل ۸ مشاهده می‌شود که صنایع معدنی و ساختمانی در شرق و شمال شرق پس‌کرانه و در کنار آن صنعت پتروشیمی در شرق پس‌کرانه، و سپس صنعت فولاد و آلومینیوم در قسمت مرکزی پس‌کرانه‌ی شهیدرجایی قرار گرفته‌اند.

جدول ۷. مقایسه‌ی سناریوهای پیشنهادی.

Scenario	explanation	main advantage
First Scenario	By strategically locating petrochemical facilities away from residential areas and placing related industries (such as steel and aluminum) in close proximity to each other, both environmental and traffic interference has been reduced.	Minimal environmental impact and suitable distribution of industries
Second Scenario	The main industries are located in the east and center, and transportation to the main roads is easy, but it may interfere with recreational use.	Balanced distribution of capacities and good access to infrastructure.
third scenario	The linear arrangement of small industries in the center and northeast prevents high density, but increases their distance from transit routes.	Minimal spatial interference and suitable for small units.



شکل ۹. سناریوی سوم استقرار صنایع سنگین در اراضی ۲۴۰۰ هکتاری بندر شهیدرجایی.

۶. ۳. سناریوی سوم

در سناریوی سوم، مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود که صنعت فولاد و آلومینیوم در شرق پس‌کرانه و در کنار آن صنایع معدنی و ساختمانی، و سپس پتروشیمی در مرکز پس‌کرانه‌ی کنار صنایع دیگر قرار گرفته‌اند.

در ادامه، سه سناریوی پیشنهادی برای استقرار صنایع سنگین در پس‌کرانه‌ی بندر شهیدرجایی از منظر مزیت اصلی و محدودیت‌های هر یک، در جدول ۷ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در نتیجه، سناریوی اول به‌دلیل تعادل میان کاهش آثار زیست‌محیطی، بهره‌برداری منطقی از زیرساخت‌ها و هم‌افزایی صنایع مرتبط، به‌عنوان مناسب‌ترین گزینه شناسایی شده است. سناریوی دوم با توزیع متعادل واحدها قابل قبول بوده است. سناریوی سوم، نیز به‌دلیل نیاز به سرمایه‌گذاری اضافی در زیرساخت کمتر در اولویت قرار گرفته است.

۷. نتیجه‌گیری

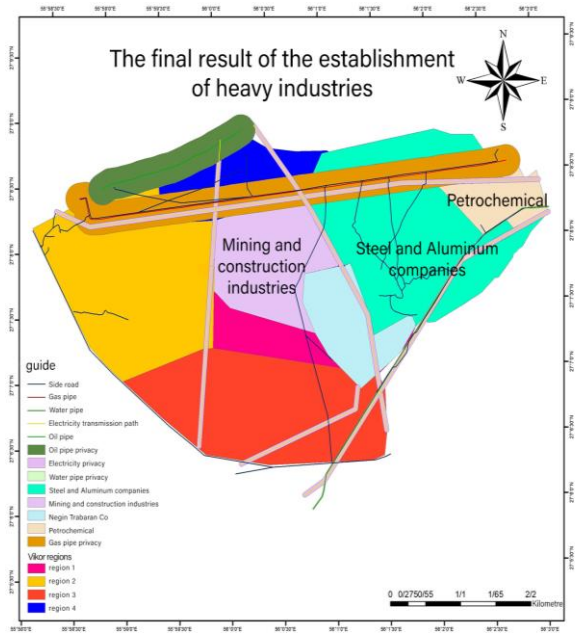
در پژوهش حاضر، با بهره‌گیری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی AHP و VIKOR، مکان‌های مختلفی برای استقرار صنایع سنگین در منطقه‌ی بندر شهیدرجایی شناسایی شده‌اند. ابتدا، معیارهای مؤثر در مکان‌یابی از طریق مرور ادبیات، اسناد بالادستی، و مصاحبه با خبرگان استخراج و در سه دسته‌ی کلی: عوامل طبیعی، زیربنایی، و محیط‌زیستی طبقه‌بندی شده‌اند. سپس با استفاده از AHP ، وزن نسبی هر معیار تعیین شده است. در ادامه، وزن‌های مذکور در مدل VIKOR استفاده شده‌اند تا ارزیابی گزینه‌های مکانی صورت گیرد. نتایج حاصل، نواحی با اولویت بالا برای استقرار صنایع را نشان می‌دهد، که از نظر شاخص‌های مختلف توازن مناسبی دارند.

همچنین، با تفسیر نقشه‌ی نهایی پهنه‌بندی، چند سناریوی پیشنهادی در قالب تحلیل سیاست‌محور ارائه شده است، تا راهکارهای اجرایی برای بهره‌برداری از نتایج ذکرشده در سطوح برنامه‌ریزی منطقه‌ای فراهم شود. یافته‌های پژوهش می‌توانند به‌عنوان ابزاری قابل‌اتکا برای کاهش تعارض‌های محیط‌زیستی، افزایش بهره‌وری زیرساختی، و حمایت از توسعه‌ی پایدار صنعتی در منطقه استفاده شوند. براساس نتایج به‌دست‌آمده از تلفیق روش‌های AHP و VIKOR، منطقه‌ی شرقی پس‌کرانه‌ی بندر شهیدرجایی به‌عنوان بهترین گزینه برای استقرار صنایع سنگین شناسایی شده است. این برتری از منظرهای مختلفی، مانند: دسترسی به زیرساخت‌های اصلی مانند جاده‌ی آسفالته، شبکه‌های برق، آب، و گاز، منطقه‌ی اخیر در رتبه‌ی نخست قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های طبیعی نیز مانند زمین هموار و شیب مناسب، هزینه‌ی آماده‌سازی زمین در مرحله‌ی دوم، و ملاحظات زیست‌محیطی نظیر فاصله از مناطق مسکونی و رفاهی در مرحله‌ی سوم یا انتهایی قرار گرفته‌اند؛ که سبب کاهش آثار منفی صنایع سنگین می‌شوند.

همچنین، منطقه‌ی غربی نیز در اولویت دوم قرار دارد و با توجه به شرایط موجود، مناسب برای استقرار صنایع سبک و خدماتی تشخیص داده شده است. نتایج پژوهش حاضر، با ارائه‌ی رویکردی ساختاریافته می‌تواند مبنای تصمیم‌گیری نهادهای مسئول در توسعه‌ی زیرساخت‌های صنعتی با کمترین آسیب محیط‌زیستی و بیشترین بهره‌وری فضایی باشد. نتیجه‌ی نهایی استقرار انواع صنایع سنگین با رنگ‌های مختلف در شکل ۱۰ مشاهده می‌شوند.

۸. بحث

نتایج تلفیق روش‌های AHP و VIKOR نشان داده است که سناریوی اول، با استقرار پتروشیمی در شمال‌شرق و صنایع فولاد و آلومینیوم در شرق، به‌دلیل دسترسی به زیرساخت‌های اصلی و کاهش تداخل زیست‌محیطی نسبت به سایر



شکل ۱۰. خروجی نتیجه‌ی نهایی پژوهش حاضر با استفاده نرم‌افزار GIS.

گزینه‌ها برتری دارد. چینش اخیر ضمن ایجاد همجواری منطقی میان صنایع مرتبط و حفظ فاصله‌ی مناسب از مناطق مسکونی، توانسته است هزینه‌های آماده‌سازی زمین و آثار منفی زیست‌محیطی را به میزان کمینه برساند. تقسیم معیارهای کلی به زیرمعیارهای دقیق‌تر نیز موجب شده است تا تحلیل مسائل مکانی چندبُعدی‌تر و واقعی‌تر صورت گیرد، رویکردی که در مطالعات مشابه حوزه‌ی GIS نیز توصیه شده است.

از نکات قوت پژوهش حاضر می‌توان به تلفیق داده‌های میدانی و اسنادی اشاره کرد؛ زیرا بازدیدهای صحرایی و تحلیل اسناد بالادستی، اعتبار معیارها و نتایج را افزایش داده است. همچنین، استفاده از ساختار سلسله‌مراتبی تفصیلی و تفکیک سه معیار اصلی به ۱۰ زیرمعیار، امکان شناسایی تأثیر جزئی‌ترین عوامل را در ارزیابی مناطق فراهم آورده است. افزودن جدول مقایسه‌ای سناریوها و فلوچارت فرآیند تصمیم‌گیری نیز شفافیت و وضوح ارائه‌ی نتایج را به‌طور قابل‌توجهی ارتقاء داده است.

با این حال، حدود تعمیم نتایج، محدود به منطقه‌ی بندر شهیدرجایی است و ممکن است نتایج در دیگر مناطق بندری با ویژگی‌های متفاوت تغییر کنند. علاوه‌بر این، شاخص‌های محیط‌زیستی و زیرساختی با گذر زمان ممکن است دچار تغییر شوند؛ لذا، وزن‌دهی معیارها نیازمند بازنگری دوره‌ای خواهد بود. برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود مدل حاضر در مقیاس ملی یا بین‌المللی به آزمون گذاشته شود تا قابلیت تعمیم بیشتری یابد. همچنین، ادغام روش‌های فازی در AHP و VIKOR می‌تواند خطاهای قضاوتی را کاهش دهد. درنهایت، تکمیل چارچوب تصمیم‌گیری با تحلیل هزینه- فایده‌ی اقتصادی پروژه‌های استقرار صنایع سنگین، جنبه‌های مالی و اقتصادی مدل را تقویت خواهد کرد.

References - منابع

1. Nasorllahi, Z. and Salehi, F. O., 2012. Criteria of Eco-industrial park location and their prioritization with using Fuzzy AHP and triangular Fuzzy number. *Quarterly Journal Of Economic Growth And Development Research*, *2*(7), 66-51. [In Persian]. doi:https://www.magiran.com/paper/1048271.
2. Zeng, Q., Liu, Y., Yang, Z., and Yu, B., 2011. Optimization of Dry ports location for Western Taiwan Straits economic zone. In ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems (pp. 103-110).
3. Mahmudah, R. S. Putri, D. I., Abdullah, A. G. Shafii, M. A., Hakim, D. L. and Setiadipura, T., 2024. Developing a Multi-Criteria Decision-Making model for nuclear power plant location selection using Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Fuzzy VIKOR methods focused on socio-economic factors. *Cleaner Engineering and Technology*, 19, 100737. doi: https://doi.org/ 10.1016 /j.clet. 2024.100737.
4. Arıkan Kargı, V. S. and Cesur, F., 2024. Renewable Energy Technology Selection for Hotel Buildings: A Systematic Approach Based on AHP and VIKOR Methods. Buildings, *14*(9), 2662. doi: https://doi.org/10.3390/buildings14092662.
5. Gultom, P. and Nababan, E. S.,2024. Integration of AHP and VIKOR Method to Select the Optimum Destination Route. *Journal of Research in Mathematics Trends and Technology*, *6*(1), 24-34. doi: https://doi.org/10.32734/jormtt.v6i1.17717.
6. Božičević, J. Lovrić, I. Bartulović, D. Steiner, S. Roso, V. and Pašagić Škrinjar, J .,2021. Determining optimal dry port location for Seaport Rijeka using AHP decision-making methodology. Sustainability, *13*(11), 6471. doi: https://doi.org/10.3390/su13116471.
7. Rahimi, A. and Borna, R., 2017. Application of analytical hierarchy process (AHP) in site selection of heavy industry using gis in ports of emam khomeini and mahshahr. *Regional Planning* [In Persion] , *6*(24), 115-128.https://www.magiran.com/paper/1661228.
8. Ahadnejad, M. and Norozi, M. J., 2014. An Analysis of the location of land to establish industry using AHP and VIKOR Methods (Case Study: central

section of Aras Free Zone) [In Persion].https://www.magiran.com/paper/1283640.

9. Technology, I. U., 2023. Plan to study the process of attracting investment in 2400 hectares of Dry Port in Shahid Rajaei port [In Persion].
10. Karayalcin, I. I .,1982. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation: Thomas L. SAATY McGraw-Hill, New York, 1980, xiii+ 287 pages,£ 15.65
11. Soleimani, R. Balandeh, N. and Jamali, F., 2013. Using GIS for location Analysis of Heavy Industries establishment. T*he 5th Conference & Exhibition on Environmental Engineering*. tehran. [In Persian].
12. Malczewski, J., 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International journal of geographical information science*, *20*(7), 703-726., doi: https://doi.org/10.1080/13658810600661508.
13. Huang, J. J. Tzeng, G. H. and Liu, H. H.,2009. A revised VIKOR model for multiple criteria decision making-The perspective of regret theory. In Cutting-Edge Research Topics on Multiple Criteria Decision Making: *20th International Conference*, MCDM 2009, Chengdu/Jiuzhaigou, China, June 21-26, 2009. Proceedings (pp. 761-768). Springer Berlin Heidelberg, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-02298-2_112.
14. Asadzadeh, H. and Shabakhty,N., 2022. Evaluation model for the establishment of industries in the Hinterland of ports with AHP and VIKOR (case study of Shahid Rajaee port). *13th International Congress on Civil Engineering*. Tehran[In Persian]:https://civilica.com/doc/1852861.

این صفحه عمداً خالی گذاشته شده است.

مشخصات مقالات ارسالی

- مقاله به‌صورت دو ستونی در قالب نرم افزارWord با قلم B Nazanin سایز ۱۰/۵ با فاصله سطر ۱/۵ ارائه شود.
- اجزای اصلی مقاله، شامل مقدمه، عناوین بخش‌های اصلی، زیربخش‌ها و نتیجه‌گیری به صورت شماره بندی و کاملاً مشخص باشد.
- تعداد کلمات عنوان مقاله حداکثر ۱۲۰ حرف نوشته شود.
- مقاله حداکثر ۲۰ صفحه باشد، با احتساب نمودارها و جداول، حداکثر ۱۵ شکل و خلاصه مقاله به زبان انگلیسی.
- چکیده فارسی مقاله ۱۵۰ تا۲۰۰ کلمه باشد.
- صفحات عنوان فارسی و انگلیسی شامل عنوان مقاله، اسامی نویسندگان و ذکر نویسنده مسئول، درج مرتبه علمی و آدرس سازمانی همه نویسندگان و رایانامه ایشان ذکر باشد.
- مقاله توسط اساتید دانشگاه یا محققین صنعتی با ایمیل سازمانی ارسال شود (در صورت ارسال مقاله توسط دانشجو، ضروری است معرفی نامه از طرف استاد راهنما مبنی بر تایید ارسال مقاله توسط دانشجو همراه با مقاله ارسال شود).
- لازم و ضروری است همه شکل‌ها از کیفیت و وضوح بالایی برخودار باشند.
- از آنجا که مجله با فرمتی مشخص آراسته می‌شود جهت یکسان سازی شکل ها، همه مطالب شکل‌های مقاله در محیط ورد به صورت یکدست با فونت Times و سایز یکسان حتما به زبان انگلیسی آورده شود.
- عنوان جداول در بالای آنها و عنوان شکل‌ها و نمودارها در زیر آنها نوشته شود.
- همه مطالب داخل شکل‌ها، نمودارها، تصاویر و جداول به زبان انگلیسی آورده شود.
- شکل‌ها به صورت JPG در محیط ورد آورده شود و از رسم شکل در محیط ورد خودداری شود.
- شکل‌های چند قسمتی در قالب یک شکل آورده شود.
- در شکلهای چند قسمتی که هر کدام از قسمت های شکل الف، ب، ... دارند، هم در فایل شکل هم در متن به صورت a، b و ... آورده شوند.
- اشاره به شکل ها، جداول، نمودارها و پیوست در متن به زبان فارسی و به صورت ساده (بدون استفاده از هیچ فرمتی همچون ارجاع دهی در بخش Cross-reference و ...) آورده شود.
- شکل ها خارج از جدول در متن آورده شود.
- کلمات انگلیسی آورده شده در شکل‌ها، نمودارها، تصاویر و جداول حتما به صورت پانویس در متن مقاله ذکر شوند.
- همه فرمول‌ها در محیط Mathtype با سایز ۱۰-۱۱ آورده شوند.
- همه روابط و علائم ریاضی استفاده شده در متن به صورت equation و با فونت همراستا با متن آورده شوند.
- علائم ریاضی استفاده شده در فرمول ها و متن سازگار باشند (از نظر ایتالیک غیر ایتالیک و همینطور بولد و غیربولد بودن).
- اعداد پارامترها و فرمول های استفاده شده در متن به زبان انگلیسی درج شود.
- کلیه فرمول ها و علائم ریاضی در متن با سایز ۱۰-۱۱ در محیط Mathtype آورده شود.
- شماره تمامی فرمول ها خارج از محیط Mathtype، روبه روی فرمول در ورد با اعداد انگلیسی نوشته شود.
- همه مطالب داخل جداول با فونت ۱۰-۱۱ و تیتر جداول با فونت ۱۲ نوشته شود.
- خلاصه مقاله به زبان انگلیسی (بین ۳۰۰ تا ۳۵۰ کلمه) با سایز ۱۱ و فونت Times و فاصله سطر ۱ ارائه شود.

یادآوری مهم و ضروری:

- کلیه‌ی مراجع مورد استفاده، شماره‌بندی (از شماره یک و به‌طور مسلسل) و در متن مقاله در داخل کروشه [] مشخص شود. در بخش مراجع کلیه منابع مورد استفاده به زبان انگلیسی و با فرمت Harvard باتوجه به مثال‌های زیر نوشته شوند. مراجع فارسی نیز به انگلیسی ترجمه شده و در انتها واژه‌ی [In Persian] داخل براکت قید شده و سال آنها نیز به میلادی برگردان شوند.
- در انتهای مقاله در بخش مراجع، اعداد هر مرجع به صورت مثال های آورده شده ذکر شود (.2 , .1.... ,)
- تمامی DOI ها در مراجع به صورت لینک آبی رنگ آورده شود.
- براساس بخشنامه وزارت علوم و قوانین مجله حتما مراجع به صورت (Harvard) دقیقا طبق نمونه آورده شده (اعم از آوردن نقطه و کاما بعد از هر اسم، پرهیز از آوردن et al سال انتشار بدون پرانتز، ابتدای اولین حرف از اولین کلمه عنوان به صورت بزرگ، اسم ژورنال ایتالیک و ابتدای هر کلمه حرف بزرگ آورده شود. شماره والیوم ایتالیک، شماره دوره ساده آورده می‌شود. شماره گذاری مراجع طبق مثال‌های زیر در انتهای مقاله درج شود.
- شماره مراجع در متن به زبان فارسی در براکت درج شود.

Examples:

- Journals:

1. Sabzevari, S. and Shahabian, F., 2018. Optimum selection of corrugated sandwich panels shape and materials subjected to blast loading . *J. of Structural and Construction Engineering*, *5*(17), pp.39-52 [In Persian] . https://doi.org/10.22065/jsce.2018.126299.1531.

- Conference:

2. Pandhare,V., Singh, J. and Lee, J., 2019. Convolutional neural network based rolling-element bearing fault diagnosis for naturally occurring and progressing defects using time-frequency domain features .*In 2019 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Paris)*, pp. 320-326. IEEE. https://doi.org/10.1109/PHM-Paris.2019.00061

- Book:

3. Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 2002. *Digital Image Processing,* Second Edn., Prentice-Hall., Inc. Newjersey.

Industrial Engineering and Management
Sharif

2

Winter
2026

Editor-in-Chief: Kourosh Eshghi

This Journal is published under the auspices of Sharif University of technology, Office of the Vice-Chancellor-in-Charge of Research.

The Journal is published Semiannually in Farsi language, aims at establishing a relationship between scientists active in different branches of science and technology and, in particular, at providing a forum for exchange of knowledge between scientists and technologists related to scientific problems prevailing in contemporary society. The journal also strives to present practical and theoretical analyses of these issues and facilitates the circulation of modern scientific findings by scientists and researchers for practical application. In addition, ``**Sharif**'' publishes original papers focusing on issues of concern to universities, including research, technological advancements, and topics related to matters of higher education.

P.O.BOX 11155-8639 AZADI AVENUE, TEHRAN, I.R. IRAN
Phone: (98-21) 66005419 - 66164093 Fax: (98-21) 66012983
Web: http://journal.sharif.ir
http://www.globalsciencejournals.com
E-mail: pajouhesh@sharif.edu

CONTENTS

3 **An Integrated Framework Using F-PIPRECIA and Z-WASPAS Methods to Evaluate the Barriers to the Implementation of Smart Logistics**
Ali Memarpour Ghiaci, Mohammadreza Zahedi and Morteza Abbasi

19 **A Multi-Objective Model for Environmentally Sustainable Healthcare Facility Location-Allocation: Child Cancer Hospitals Establishment in Iran in 2030**
Mohammad Fattahi and Arash Nemati

31 **An Integrated Problem of Handling Equipment Scheduling and Storage Space Allocation for Inbound Containers at Container Terminal**
Zahra Sadat Fani Sadrabadi and Mehdi Alinaghian

45 **Topic Modeling and Sentiment Analysis of Customers Using Natural Language Processing and Machine Learning Techniques**
Razieh Rahimi and Reza Ghasemy Yaghin

63 **Designing a Model for Sustainable Power Transmission Capacity Using Systems Dynamics Approach**
Mohammad Taghi Farahnak, Mohammad Ali Afshar Kazemi, Ali Mohaghar and Mohammad Ali Keramati

79 **Development of a Data-Driven Quality Management Model for Creative Industries**
Mohammadsaleh Soltani and Abdollah Aghaie

93 **Modeling and Solving Dynamic Maximal Covering Location Problem Considering Backup Services; Case Study of a Crisis Event in District 3 of Tehran**
Hanieh Sabiza, Jafar Bagherinejad and Roghayyeh Alizadeh

111 **Developing Machine Learning Algorithm for Energy Supply Optimization in Virtual Power Plants**
Bentolhoda Dehghani, Mohammad Mehdi Lotfi and Alireza Sedighi

RESEARCH NOTES:

127 **Analytical Based Simulation Modeling for Short-Term and Long-Term Planning in Open Pit Mining**
Milad Abolghasemian, Maryam Daneshmand-Mehr and Erfan Hasannayebi

141 **Economic and Environmental Optimization Model of the Amount of Waste Allocated to Different Methods of Urban Waste Disposal in Gilan Province**
Yasin Mazloom Kalimani and Seyed Hesamodin Zegordi

153 **Design of a Data-Driven Performance Evaluation System for Productivity Enhancement in Continuous Manufacturing Industries**
Mahboobeh Barvarzadeh and Hasan Khademi Zare

167 **Evaluation Model for the Establishment of Industries in the Hinterland of Ports with AHP and VIKOR (Case Study of Shahid Rajaee Port)**
Naser Shabakhty and Hassan Asadzadeh

APPENDIX

180 **TOTAL PAGE NUMBER**